

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA PROGRAMABLE



FRANCISCO FRANCO OBANDO DIAZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DAPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE INGENIERIA FÍSICA
POPAYÁN
2004

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA PROGRAMABLE

FRANCISCO FRANCO OBANDO DIAZ

Informe de pasantía presentado como requisito
parcial para optar al título de
Ingeniero Físico

Director:

Ing. Mario Andrés Córdoba B.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DAPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE INGENIERIA FÍSICA
POPAYÁN
2004

Nota de aceptación

Director

Ing. Mario Andrés Cordoba

Jurado

Ing. Germán A. Bacca

Jurado

Ing. Leonairo Pencue Fierro

Popayán, 13 de febrero de 2004

CONTENIDO

pág

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCION | 1 |
| 1. SISTEMAS TERMICOS | 2 |
| 1.1 PROPAGACIÓN DEL CALOR | 2 |
| 1.1.1 <i>Conducción</i> | 2 |
| 1.1.2 <i>Convección</i> | 4 |
| 1.1.3 <i>Radiación</i> | 4 |
| 1.2 SECADO | 5 |
| 1.2.1 <i>Transferencia de masa en el secado.....</i> | 6 |
| 1.2.2 <i>Secado con aire.....</i> | 7 |
| 1.2.3 <i>Secado de granos.....</i> | 9 |
| 1.2.4 <i>Eficiencia térmica del secado.....</i> | 10 |
| 1.3 SECADORAS | 11 |
| 1.3.1 <i>Tipos de secadoras</i> | 12 |
| 2. PRINCIPIOS DE CONTROL Y CONTROLADORES | 15 |
| 2.1 CONTROL DE PROCESOS | 15 |
| 2.2 EL PRINCIPIO DE REALIMENTACION | 16 |
| 2.3 ACCIONES BASICAS DE CONTROL | 17 |
| 2.3.1 <i>Acción de control On-Off</i> | 18 |
| 2.3.2 <i>Acción de control proporcional</i> | 19 |
| 2.3.3 <i>Acción de control integral</i> | 20 |
| 2.4 CONTROL PID | 21 |
| 2.4.1 <i>Acción proporcional</i> | 21 |
| 2.4.2 <i>Acción integral</i> | 22 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.4.3 | <i>Acción derivativa</i> | 23 |
| 2.4.4 | <i>Ajuste de los parámetros de controladores PID</i> | 25 |
| 2.4.4.1 | Método de tanteo | 26 |
| 2.4.4.2 | Técnicas de malla cerrada | 27 |
| 2.4.4.3 | Técnicas de malla abierta | 29 |
| 2.5 | IMPLEMENTACION DIGITAL | 30 |
| 2.5.1 | <i>Muestreo</i> | 30 |
| 2.5.2 | <i>Prefiltrado</i> | 31 |
| 2.5.3 | <i>Discretización</i> | 32 |
| 2.5.4 | <i>Cuantización</i> | 36 |
| 3. | LOS MICROCONTROLADORES | 37 |
| 3.1 | FAMILIA DE LOS PIC | 37 |
| 3.2 | RECURSOS DE LOS MICROCONTROLADORES | 37 |
| 3.2.1 | <i>La arquitectura</i> | 38 |
| 3.2.2 | <i>El procesador</i> | 39 |
| 3.2.3 | <i>La memoria</i> | 40 |
| 3.2.4 | <i>Puertas de entrada y salida</i> | 41 |
| 3.2.5 | <i>El reloj principal</i> | 41 |
| 3.2.6 | <i>Recursos auxiliares</i> | 41 |
| 3.3 | EL PIC16F877 | 42 |
| 3.3.1 | <i>Características generales</i> | 42 |
| 3.3.2 | <i>Periféricos</i> | 43 |
| 3.4 | HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DE APLICACIONES | 44 |
| 3.4.1 | <i>Desarrollo del software</i> | 44 |
| 3.4.2 | <i>Depuración</i> | 46 |
| 4. | CONTROLADOR DE TEMPERATURA | 47 |
| 4.1 | DESCRIPCION GENERAL | 47 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.2 | OPCIONES DEL CONTROLADOR | 48 |
| 4.3 | MODOS DE CONTROL | 49 |
| 4.3.1 | <i>Control manual</i> | 49 |
| 4.3.2 | <i>Control On-Off</i> | 50 |
| 4.3.3 | <i>Control PID</i> | 50 |
| 4.4 | CONFIGURACION DE LOS PARAMETROS DEL CONTROLADOR | 52 |
| 4.4.1 | <i>Análisis de la respuesta transitoria</i> | 53 |
| 4.4.2 | <i>Simulación del control PI</i> | 57 |
| 4.5 | DISEÑO ELECTRONICO DEL CONTROLADOR | 59 |
| 4.5.1 | <i>Sensores</i> | 60 |
| 4.5.2 | <i>Acondicionamiento de señal</i> | 60 |
| 4.5.3 | <i>Controlador e interfaz de usuario</i> | 62 |
| 4.5.4 | <i>Etapas de potencia y actuador</i> | 63 |
| 4.6 | PROGRAMACION EMBEBIDA DEL MICROCONTROLADOR | 64 |
| 4.6.1 | <i>Programa de configuración del controlador</i> | 65 |
| 4.6.2 | <i>Programa de adquisición de datos</i> | 71 |
| 4.6.3 | <i>Programa para la implementación de las acciones de control</i> | 72 |
| 4.6.4 | <i>Programa para el posicionamiento de la cortina</i> | 74 |
| 5. | INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR EN LA PLANTA | 76 |
| 5.1 | GRAFICAS DE RESPUESTA | 79 |
| 6. | CONCLUSIONES | 81 |
| | BIBLIOGRAFIA | 82 |
| | ANEXOS | 83 |

LISTA DE TABLAS

pág

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabla 2.1 | Parámetros para el controlador PID | 28 |
| Tabla 4.1 | Descripción del registro R_control | 66 |
| Tabla 4.2 | Contenido de los mensajes para la interfaz con el usuario | 66 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág |
|---|-----|
| Figura 1.1 Relación entre la razón de secado y la humedad del producto | 7 |
| Figura 1.2 Curva de secado generalizada..... | 9 |
| Figura 1.3 Tipos de secadoras..... | 14 |
| Figura 2.1 Diagrama de bloques de un sistema de control industrial..... | 18 |
| Figura 2.2 Características de un controlador on-off..... | 19 |
| Figura 2.3 Característica de un controlador proporcional..... | 19 |
| Figura 2.4 Simulación de un sistema de control proporcional..... | 22 |
| Figura 2.5 Simulación de un sistema de control proporcional e integral..... | 23 |
| Figura 2.6 Interpretación geométrica de la acción derivativa como un control predictivo..... | 24 |
| Figura 2.7 Simulación de un sistema de control en lazo cerrado proporcional, integral y derivativo | 25 |
| Figura 2.8 Respuesta a una señal escalón con una razón de asentamiento de $\frac{1}{4}$ | 26 |
| Figura 2.9 Respuesta deseada en el controlador..... | 28 |
| Figura 2.10 Curva de reacción | 29 |
| Figura 2.11 Muestreo de una señal con efecto Aliasing | 31 |
| Figura 2.12 Diagrama de un filtro Butterworth de segundo orden..... | 32 |
| Figura 3.1 Arquitectura Von Neumann, arquitectura Harvard | 38 |
| Figura 4.1 Diagrama esquemático del controlador | 47 |
| Figura 4.2 Esquema básico de una secadora estática de granos | 49 |
| Figura 4.3 Diagrama de bloques de un sistema de primer orden | 53 |
| Figura 4.4 Curva de respuesta exponencial | 55 |
| Figura 4.5 Salida del sistema ante una entrada rampa unitaria | 56 |
| Figura 4.6 Respuesta a un impulso unitario | 56 |
| Figura 4.7 Panel frontal de la simulación de control PI para un sistema de primer orden | 58 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 4.8 | Diagrama de bloques del control PI para un sistema de primer orden..... | 59 |
| Figura 4.9 | Diagrama de bloques del sistema de control | 60 |
| Figura 4.10 | Sensor de temperatura lm35z | 60 |
| Figura 4.11 | Acondicionamiento de señal | 61 |
| Figura 4.12 | Sensado y acondicionamiento de señal | 62 |
| Figura 4.13 | Diagrama del controlador del sistema de control | 63 |
| Figura 4.14 | Sistema interno del controlador de temperatura programable | 64 |
| Figura 4.15 | Diagrama de flujo de la rutina de inicio y configuración del controlador | 68 |
| Figura 4.16 | Diagrama de flujo de la rutina de inicialización y adquisición de datos | 72 |
| Figura 4.17 | Diagrama de flujo de la rutina de las acciones de control..... | 74 |
| Figura 4.18 | Diagrama de flujo de la rutina para el manejo del motor de paso | 75 |
| Figura 5.1 | Controlador de temperatura programable | 76 |
| Figura 5.2 | Secadora estática de granos con controlador de temperatura | 77 |
| Figura 5.3 | Mecanismo del actuador | 78 |

LISTA DE ANEXOS

pág

| | |
|--|----|
| Anexo A. Programa en ensamblador para la configuración de los puertos..... | 83 |
| Anexo B. Programa en ensamblador para la interfaz con el usuario..... | 84 |
| Anexo C. Programa en ensamblador para la adquisición de datos..... | 87 |
| Anexo D. Programa en ensamblador del control PI..... | 89 |
| Anexo E. Programa en ensamblador de la finalización de las tareas..... | 92 |
| Anexo F. Programa en ensamblador para el control del motor de paso..... | 93 |

INTRODUCCIÓN

La Automatización es algo prácticamente imprescindible en el mundo de la Industria actual, dados los niveles de productividad, fiabilidad y rentabilidad que han de cumplir los productos elaborados a fin de ser competitivos en el mercado. También es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo.

Aunque el concepto de controlador ha permanecido invariable a través del tiempo, su implementación física ha variado frecuentemente. Hace tres décadas, los controladores se construían exclusivamente con componentes de lógica discreta, posteriormente se emplearon los microprocesadores, que se rodeaban con *chips* de memoria y dispositivos de entrada y salida sobre una tarjeta de circuito impreso. 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 sencillo pero completo computador contenido en el corazón de un circuito integrado (*chip*).

El trabajo desarrollado consiste en el diseño y construcción un sistema embebido de control de temperatura con aplicación particular en una secadora estática de granos. El algoritmo de control es capaz de controlar la temperatura dentro de la máquina de secado y además posee diferentes opciones de configuración para el manejo de la máquina. El programa dentro del microcontrolador permite realizar control manual, *on – off* y PI sobre el proceso, además, ofrece indicadores de temperatura, una alarma, manejo de tiempo, encendido y apagado automático del ventilador que inyecta el flujo de aire caliente al interior de la secadora.

1. SISTEMAS TERMICOS

1.1 PROPAGACIÓN DEL CALOR.

Puesto que el calor es la energía de la actividad molecular, una forma simple de transferencia del mismo, denominada *conducción*, será la comunicación directa de la energía molecular a través de una sustancia por medio de colisiones entre sus moléculas. Los metales contienen electrones *libres*, que hacen de ellos buenos conductores de la electricidad; estos electrones contribuyen también poderosamente a la conducción del calor, por esto, los metales son magníficos conductores térmicos.

Convección es una forma de transmisión del calor de un lugar a otro por movimiento de la materia caliente. Otro tipo de transferencia de calor puede ser por combinación de *radiación* y *absorción*. En la radiación, la energía térmica se transforma en energía radiante, similar en su naturaleza a la luz. En realidad, una parte de esta radiación es luminosa. En esta forma, la energía radiante puede atravesar distancias enormes antes de ser absorbida por un cuerpo y transformada de nuevo en calor.

1.1.1 Conducción. En este proceso, la transferencia de energía térmica se puede ver en una escala atómica como un intercambio de energía cinética entre moléculas, donde las partículas menos energéticas ganan energía al chocar con las partículas más energéticas. Así, al poner una barra metálica dentro de una flama mientras se sostiene por un extremo, se puede ver que aumenta la temperatura del metal en el otro extremo. La energía térmica llega al otro extremo mediante la conducción. La manera en la que se transfiere la energía térmica de la flama, a través de la barra y hacia el otro extremo, puede comprenderse examinando qué es lo que ocurre con los átomos y electrones del metal. Al principio, antes de que la barra se ponga en la flama, los átomos y electrones del metal vibran en torno de sus posiciones de equilibrio con cierta amplitud. A medida

que la flama calienta la barra, los átomos y electrones del metal cercanos a la flama empiezan a vibrar con amplitudes cada vez más grandes. Estos, a su vez, chocan con sus vecinos y transfieren una parte de su energía en los choques. Lentamente, los átomos y electrones de la barra más alejados aumentan su amplitud de vibración, hasta que las vibraciones de mayor amplitud llegan al extremo por el que se sostiene la barra. El efecto de este incremento en la vibración es un aumento en la temperatura del metal. A pesar de que la transferencia de energía térmica a través de un metal puede explicarse de modo parcial por las vibraciones atómicas y el movimiento de electrones, la tasa de conducción depende también de las propiedades de la sustancia que es calentada. En general, los metales son buenos conductores de energía térmica, en tanto que los materiales como asbesto, corcho, papel y fibra de vidrio son pobres conductores. Los gases también son malos conductores debido a su naturaleza dispersa. Los metales son buenos conductores de energía térmica porque contienen números muy grandes de electrones que son relativamente libres de moverse por el metal y pueden transportar energía de una región a otra.

La conducción ocurre sólo si hay una diferencia de temperatura entre dos áreas del medio conductor. En los experimentos se ha encontrado que la energía térmica Q transferida en un tiempo Δt , fluye del extremo más caliente al extremo más frío. La tasa a la cual fluye el calor, $Q/\Delta t$ es proporcional al área de sección transversal y a la diferencia de temperatura, e inversamente proporcional al espesor:

$$\frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.1)$$

utilizando H para representar la tasa de transferencia de energía térmica, será $H = Q/\Delta t$, y considerando espesores infinitesimales dr y cambios de temperatura dT , la ley de conducción de calor es:

$$H = -kA \frac{dT}{dr} \quad (1.2)$$

donde la constante de proporcionalidad k se denomina la conductividad térmica de un material, y dT/dr es el gradiente de temperatura, el signo negativo de la expresión indica que la variación de la temperatura va en oposición al gradiente.

1.1.2 Convección. Para que exista transmisión de calor por convección se considera que el calor fluirá a través de un medio cuyas moléculas o partículas presentan movimiento relativo, es decir un medio líquido, gaseoso, o más genéricamente un medio fluido. Ejemplos de medios fluidos: aire, agua, oxígeno, aceites, etc, todos ellos, claro está que a presión y temperatura en que tengan estado gaseoso, líquido o con una viscosidad suficiente para permitir el movimiento relativo de sus partículas.

Convección natural. Es debida al gradiente térmico, y se presenta:

- A. Por la diferencia de densidad o de peso específico que aparece debido a las diferentes temperaturas. Esto produce que el fluido más frío circule hacia abajo y el más caliente hacia arriba, produciendo una corriente ascendente.

- B. Las partículas líquidas o gaseosas tienen movimientos relativos continuos, que se incrementan al aumentar sus estados térmicos. Este movimiento transporta la energía calórica en forma de energía cinética mientras se desplaza la partícula y va colisionando con las millones que encuentra en su camino, y a su vez éstas hacen lo mismo, verificándose una convección a nivel molecular de flujo muy turbulento. El movimiento de las partículas es conocido como movimiento *browniano*.

Convección forzada. Es cuando se aplican medios mecánicos para hacer circular el fluido.

1.1.3 Radiación. La transferencia de calor por radiación no requiere ningún medio material intermedio en el proceso. Por ejemplo, la energía se traslada desde la superficie del sol hasta la tierra, donde es absorbida y convertida en energía calorífica. La energía emitida por un filamento de lámpara eléctrica atraviesa el espacio entre filamento y bulbo aunque no tenga ningún gas en su interior. Energía de esta naturaleza la emiten todos los cuerpos. Un cuerpo que absorbe esta energía radiante la convierte en calor como resultado de un aumento de su velocidad molecular.

Todos los cuerpos calientes emiten energía radiante. Hay grandes diferencias en la transparencia de las diversas sustancias a la radiación calorífica. Algunos materiales tales como el caucho duro, óxido de níquel, vidrios especiales o una disolución de sulfuro de carbono y yodo, opaca a la luz, son casi transparentes a las radiaciones caloríficas. Los vidrios de ventana ordinarios, casi completamente transparentes a la luz, absorben radiaciones caloríficas.

1.2 SECADO.

El secado es uno de los métodos más antiguos para la conservación de alimentos. Lo practicaban los pueblos primitivos, con anterioridad a la historia escrita. Se entiende por secado de alimentos a la extracción deliberada de agua que contienen, operación que se lleva a cabo en la mayoría de los casos evaporando el agua por adición de su calor latente de vaporización. Por tanto en la operación básica de secado intervienen dos factores importantes.

- (a) Transmisión de calor, para suministrar el calor latente de vaporización necesario.
- (b) Movimiento del agua o del vapor de agua a través del producto alimenticio y su separación del mismo.

La humedad que queda en los sólidos que salen de un secador sólo en raros casos puede medirse en línea. Además, para los sólidos, por lo general no se cuenta con las mediciones de flujo sobre las que se apoyan el control con corrección anticipante de la

destilación y de los evaporadores. Como resultado, sólo se ha podido lograr el control al regular la variable ambiental que tiene mayor influencia sobre el secado: la temperatura del aire de escape.

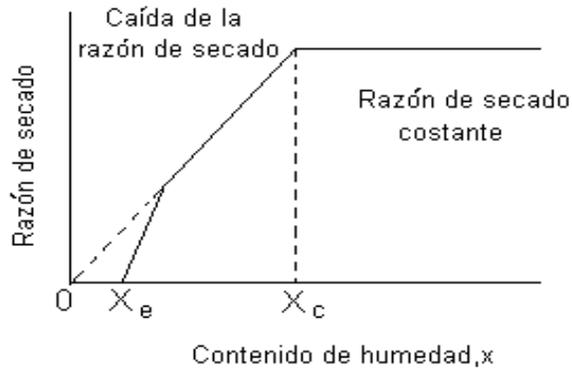
La razón de secado de un sólido húmedo es función de la fuerza impulsora, el área superficial, el coeficiente de transferencia de masa y el contenido de humedad del material. Si las partículas están uniformemente húmedas, la humedad se evaporará en forma directa de la superficie como de cualquier superficie húmeda. Esta condición se conoce como *secado a razón constante* porque la cantidad real de humedad presente no influye sobre la razón. Sin embargo, a medida que aparecen áreas secas, la razón de evaporación empieza a disminuir; se ha entrado en la *zona de caída de la razón*, mostrada en la figura 1.1. El punto de transición entre las dos zonas se conoce como *contenido crítico de humedad*, X_c . Llega un momento en que la razón cae hasta cero, cuando el contenido de humedad del sólido llega a X_e , en equilibrio con el aire secador.

Para facilitar los cálculos, se supone que la razón de secado en la zona de su caída es proporcional a la relación de la humedad de los sólidos a la humedad crítica. Entonces la razón de evaporación dW desde una partícula de sólido que tiene una superficie dA se puede representar como

$$dW = dA\gamma(T - T_w)\frac{X}{X_c} \quad (1.3)$$

en donde γ es un coeficiente de transferencia de masa. T y T_w son las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, cuya diferencia actúa como fuerza impulsora para la transferencia de calor y de masa. En esencia el temperatura de bulbo húmedo es la temperatura del sólido, en tanto que la temperatura de bulbo seco es la del aire.

Figura 1.1 Relación entre la razón de secado y la humedad del producto.



1.2.1 Transferencia de masa en el secado. En la transferencia de calor, el calor se transmite por la existencia de un gradiente de temperaturas; su velocidad es proporcional a la diferencia de temperaturas y a las propiedades del sistema de transferencia caracterizado por su coeficiente de transmisión de calor. De la misma forma, la transferencia de masa tiene lugar cuando existe un gradiente de concentración o de presión y su velocidad es proporcional a este gradiente (de concentración o de presión) y a las propiedades del sistema de transmisión caracterizado por su coeficiente de transmisión de masa.

La transferencia de masa se puede describir matemáticamente, de forma análoga a $q = kA\Delta T$ mediante la ecuación

$$\frac{dw}{d\theta} = \gamma A \Delta Y \quad (1.4)$$

donde w es la masa transferida en $\text{Kg}\cdot\text{s}^{-1}$, A es el área a través de la cual se realiza la transmisión, γ es el coeficiente de transferencia de masa expresado en $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, e ΔY es la diferencia de humedad. Desgraciadamente la aplicación de la ecuación de transferencia de masa no es tan sencilla como la del calor, debido a los cambios de humedad en el proceso de secado. Inicialmente, la masa (humedad) se transfiere desde la superficie del material y después, al avanzar el proceso, desde las zonas más profundas del sólido hasta la superficie y de aquí al aire. Así, el primer paso es

determinar la relación entre la superficie húmeda y el aire ambiente y después ver la difusión a través del sólido.

1.2.2 Secado con aire. En el secado con aire la velocidad de extracción de agua depende de las características del aire y de las propiedades del grano, así como del diseño del secador.

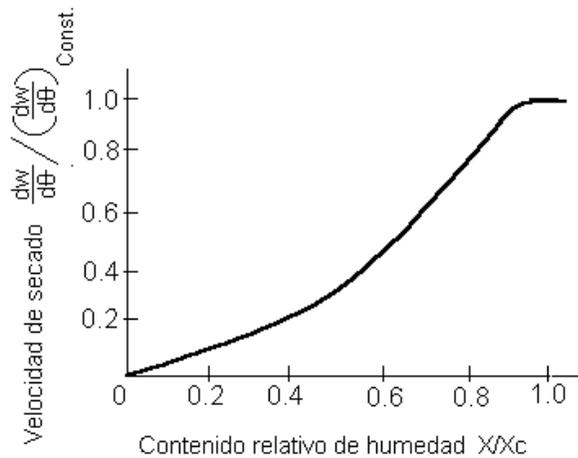
La humedad puede estar ligada al producto en diversos grados. En principio se creyó que el agua contenida en un producto alimenticio era de dos tipos: agua libre y ligada; en la actualidad parece que tal división es una simplificación excesiva y que esta clasificación no es realmente útil. El agua está retenida por fuerzas cuya intensidad varía desde las fuerzas muy débiles que retienen el agua superficial, hasta los enlaces químicos muy fuertes. Es evidente que durante el secado se separa más fácilmente el agua que está retenida más débilmente. Cabe esperar por ello que las velocidades de secado disminuyan a medida que decrece el contenido en humedad y que el agua que queda esté cada vez unida más fuertemente al producto a medida que la cantidad disminuye.

En muchos casos la mayor parte del agua está retenida débilmente, pudiéndose considerar para fines de secado como agua libre en la superficie. La conducta, en la que el agua se comporta como si estuviera sobre una superficie libre, se denomina secado a velocidad constante. Si w es la masa del material a secar, para una velocidad de secado constante:

$$\frac{dw}{d\theta} = \text{const.} \quad (1.5)$$

En la figura 1.2 se muestra una curva general, en la que está representada la velocidad de secado como un porcentaje de la velocidad de secado constante frente al contenido de humedad. El paso de la velocidad de secado constante a una velocidad más lenta tiene lugar a diferentes contenidos de humedad para los distintos productos alimenticios; en la mayoría de los alimentos este cambio se produce cuando el contenido de humedad en el aire en equilibrio es del 58 - 65 %.

Figura 1.2 Curva de secado generalizada.



El final del período de velocidad constante, cuando $X = X_c$, en el punto de ruptura de las curvas de velocidad de desecación, significa que el agua ha dejado de comportarse como si estuviera sobre una superficie libre y que otros factores distintos de las diferencias de presión controlan la velocidad de secado. A partir de este momento la velocidad de secado disminuye, y a esta etapa se le denomina período de velocidad decreciente. Los factores que regulan la velocidad en el período de velocidad decreciente son complejos y dependen del proceso de difusión a través del producto alimenticio y de los diversos patrones de energía de unión de las moléculas de agua.

1.2.3 Secado de granos. El secado de granos se puede definir de distintas maneras, según el enfoque que se desee adoptar. En los estudios más teóricos se pone el énfasis en los mecanismos de transferencia de energía y de materia. Así, el secado se puede definir como un proceso en que hay intercambio simultáneo de calor y masa, entre el aire del ambiente de secado y los granos. En cambio, en los casos generales, se define el secado como la operación unitaria responsable de la reducción del contenido de humedad de cierto producto, hasta un nivel que se considera seguro para el almacenamiento de éste.

Se entiende que es seguro un nivel de humedad por debajo del cual se reduce la actividad respiratoria de los granos y se dificulta el ataque de insectos y hongos. Dicho nivel varía con los distintos tipos de granos, pero, para los granos más comunes, abarca una gama entre 10 y 14% de humedad expresada sobre base húmeda.

Se han secado productos agrícolas desde los albores de la civilización. Al comienzo no había preocupación por el almacenamiento, y la disminución de la humedad se producía en el campo mismo. Era un "secado" que se realizaba en las condiciones naturales del ambiente, dictadas principalmente por la energía solar incidente y el movimiento del aire, es decir por el viento. Más adelante se intentó controlar parcialmente las condiciones del secado, y éste pasó a realizarse en hornos especiales o en recintos calentados. Recién entre la Primera y Segunda Guerras Mundiales se construyeron diversas unidades experimentales de secado. En aquella época sólo funcionaban algunas unidades comerciales, las que se destinaban, fundamentalmente, a la deshidratación de frutas, verduras, heno y al secado de semillas de maíz.

Después de la Segunda Guerra Mundial se hicieron comunes las grandes unidades de secado de granos comerciales, y en las haciendas se empezó a secar grandes cantidades de ellos.

Este aumento en la demanda de secado fue consecuencia del desarrollo de los métodos mecánicos de cosecha. En América Latina, una parte importante de la producción de granos se seca todavía en forma primitiva, es decir, se seca en el campo durante largos períodos. El uso de esta técnica acarrea elevadas pérdidas de producción, puesto que los granos quedan expuestos, durante lapsos prolongados a condiciones adversas y a la acción de depredadores.

1.2.4 Eficiencia térmica del secado. El consumo de energía en un secador no se debe medir solamente en unidades de combustible usadas en el proceso. Es importante que se relacione este consumo con la cantidad correspondiente de agua evaporada, de ahí la necesidad de definir un elemento que sirva de término de comparación entre diferentes secadores. Ese término, bien aceptado ya entre la comunidad científica, es el que aquí

denominamos eficiencia térmica de secado y se define así: "relación entre la cantidad de energía destinada al secado y la cantidad de agua evaporada durante el proceso".

Para los efectos de calcular este término no se incluye la energía para mover los granos.

El consumo de energía por unidad de agua evaporada varía con diversos parámetros. De ellos, los más importantes son: la variación de la humedad del producto durante el secado (tasa de secado), las condiciones ambientales y el tipo de secador empleado.

La tasa de secado de cierto tipo de granos, a su vez, es función del flujo de aire de secado, del contenido de humedad inicial y del equilibrio de los granos, de la temperatura y, cuando corresponda, de la velocidad de los granos dentro del secador.

El tipo de secador que se utilice ejerce gran influencia sobre el rendimiento térmico del secado. Cada producto se seca a una tasa diferente y cada uno presenta exigencias más o menos precisas respecto a la calidad. Existe así la necesidad de perfeccionar diferentes secadores por tipo de grano, pues las condiciones de secado (temperatura, flujo de aire, velocidad del paso del producto por el secador, contenido inicial de humedad, etc.) influyen en forma distinta de acuerdo al tipo del grano.

1.3 SECADORAS.

Las máquinas secadoras están integradas por 3 componentes.

- Torre.
- Ventilador.
- Horno.

La secadora toma aire natural y lo calienta con lo cual, lo convierte en fango de agua, insuflándolo dentro de la torre o sector del grano.

Torre: es el lugar donde se coloca el grano a secar y, consta de una serie de componentes que permiten el intercambio del aire con el grano. En las torres el grano

está en movimiento descendente, por lo que en la parte inferior existe un mecanismo de descarga, que asegura un descenso uniforme y permite regular la cantidad del grano que sale por hora, es decir el rendimiento / hora de la secadora.

Ventilador: debe impulsar el aire por entre la masa de granos, generalmente son 2 o múltiplos de 2, uno pasa aire caliente y otro pasa aire frío. Debiendo considerarse 2 aspectos en la elección de los ventiladores.

- Que el caudal de aire que arrojan, debe estar en relación con el grano que se seca por hora.
- Que la presión del aire esté en relación con el espesor de la masa de granos que se quiere secar.

Horno: es un quemador que calienta el aire, para disminuir su humedad relativa, existiendo 2 formas en que el aire se calienta, pudiendo hacerlo directamente o indirectamente:

- Directo:* Aquí el aire a utilizar para el secado, se mezcla con los productos de la combustión, originado en la llama. La principal ventaja de este tipo de secadoras es que todo el calor generado es transmitido a la masa de granos, pero la principal desventaja radica, en que en el caso de existir combustión incompleta, los productos de la misma se mezclan con el aire y pueden conferir olor a la masa de granos.
- Indirecto:* Los gases circulan por tubos previamente calentados, bajando así la posibilidad de contaminación por productos de la combustión y perdiendo poder calórico, en el calentamiento de los tubos de conducción del aire.

1.3.1 Tipos de secadoras.

Secadora discontinua estática. Consta de un cilindro central en el que se le inyecta aire. Este está rodeado por la masa de granos y el aire la atraviesa, en distintas direcciones

siempre del centro hacia fuera. Se carga con grano húmedo, se trabaja primero con aire caliente y luego frío. Una vez secado el grano se procede a la descarga.

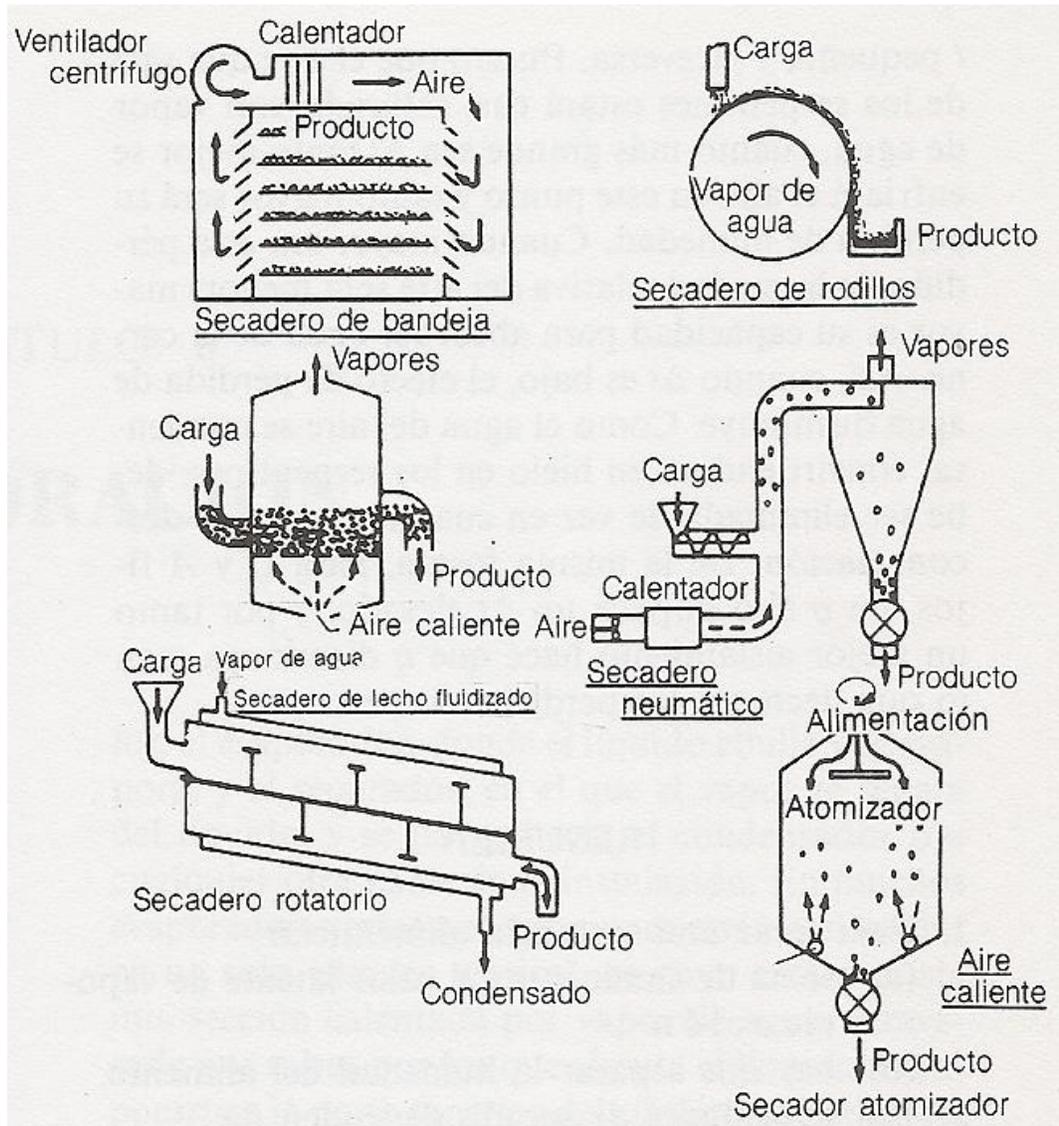
Secadora discontinua con recirculado. El trabajo es similar al anterior, pero el grano en su interior se encuentra en movimiento, con este sistema se logra mayor uniformidad que con el anterior. Son máquinas lentas y de baja velocidad de secado.

Secadora continua de columna. En ella existen 2 cámaras en el núcleo central de la máquina, una para aire caliente y la otra para aire frío. El producto desciende por los costados de la cámara, recibiendo el aire por las paredes perforadas. El aire caliente establece un contacto mucho mejor con el grano que en una secadora discontinua. Se trata del tipo de secadora más difundido.

Secadora continua de caballete. El aire circula por el interior de los caballetes, entrando por los extremos de una fila y saliendo por los de otra. Saliendo el grano por el exterior de los mismos. Tanto el aire como los granos hacen un recorrido sinuoso y de esta manera el grano, va recibiendo calor desde direcciones distintas. El secado es de muy buena calidad pero su rendimiento es bajo.

En la figura 1.3 se ilustran secadoras que se encuentran dentro de las anteriormente mencionadas.

Figura 1.3 Tipos de secadoras.



Tomada de Earle, R. Ingeniería de los alimentos. Ed. Acribia S.A. Zaragoza, 1998.

2. PRINCIPIOS DE CONTROL Y CONTROLADORES

2.1 CONTROL DE PROCESOS.

Todo proceso de operación de las plantas industriales, cualquiera que sea su producción, depende de la medición y control de las variables que intervienen con el propósito de lograr la calidad, productividad y competitividad deseada. En consecuencia, la automatización se ha convertido en una parte importante e indispensable para resolver éstos problemas en las operaciones industriales y de ésta manera lograr su propósito.

La automatización se puede catalogar como una operación unitaria muy importante que requiere de un trabajo especializado y multidisciplinario, ya que sin una adecuada captura de datos, acondicionamiento de las señales y control de las mismas, las industrias no podrían producir adecuada y eficazmente.

Los sistemas de control actuales son, por lo general, no lineales. Sin embargo, si es posible aproximarlos mediante modelos matemáticos lineales, usando uno o más métodos de diseño bien desarrollados. En un sentido práctico, las especificaciones de desempeño determinadas para un sistema particular sugieren cuál método usar. Si se presentan las especificaciones de desempeño en términos de las características de respuesta transitoria y/o las medidas de desempeño en el dominio de la frecuencia, no hay otra opción que usar un enfoque convencional basado en los métodos del lugar geométrico de las raíces y/o la respuesta en frecuencia. Si las especificaciones de desempeño se presentan como índices de desempeño en términos de las variables de estado, deben usarse los enfoques de control moderno.

En tanto que el diseño de un sistema de control mediante los enfoques del lugar geométrico de las raíces y de la respuesta en frecuencia es una tarea de la ingeniería, el diseño del sistema en el contexto de la teoría de control moderna (métodos en el espacio de

estados) emplea formulaciones matemáticas del problema y aplica la teoría matemática para diseñar los problemas en los que el sistema puede tener entradas y salidas múltiples y ser variantes con el tiempo. Aplicando la teoría de control moderna, se puede iniciar a partir de un índice de desempeño, junto con las restricciones impuestas en el sistema, y avanzar para diseñar un sistema estable mediante un procedimiento completamente analítico. La ventaja del diseño basado en la teoría de control moderna es que permite al diseñador producir un sistema de control óptimo en relación con el índice de desempeño considerado.

Los sistemas que pueden diseñarse mediante un enfoque convencional están por lo general limitados a una entrada y una salida, y son lineales e invariantes con el tiempo. Se busca satisfacer todas las especificaciones de desempeño mediante la repetición estudiada de prueba y error. Después de diseñar un sistema, se verifica si satisface todas las especificaciones de desempeño. Si no las cumple, repite el proceso de diseño ajustando los parámetros o modificando la configuración del sistema hasta que se cumplan las especificaciones determinadas. Aunque el diseño se basa en un procedimiento de prueba y error, el ingenio y los conocimientos del diseñador cumplen una función importante en un diseño exitoso.

2.2 EL PRINCIPIO DE REALIMENTACIÓN.

La idea de la realimentación es bastante simple y muy poderosa. A lo largo de su historia, ha tenido una fuerte influencia en la evolución de la tecnología. Las aplicaciones del principio de realimentación han tenido éxito en los campos del control, comunicaciones e instrumentación. Para entender el concepto, es de asumir que el proceso es tal que cuando el valor de la variable manipulada se incrementa, entonces se incrementan los valores de las variables del proceso. Bajo este concepto simple, el principio de realimentación puede ser expresado así: *Incrementar la variable manipulada cuando la variable del proceso sea más pequeña que la referencia y disminuirla cuando ésta sea más grande.* Este tipo de realimentación se llama *realimentación negativa* debido a que la variable manipulada se mueve en la dirección opuesta a la variable del proceso.

2.3 ACCIONES BASICAS DE CONTROL.

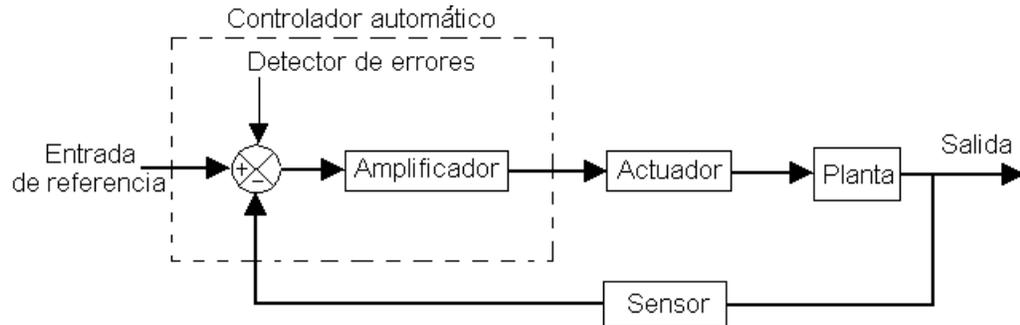
Los controladores industriales se clasifican, de acuerdo con sus acciones de control, como:

1. De dos posiciones o de encendido y apagado (*on/off*)
2. Proporcionales
3. Integrales
4. Proporcionales-integrales
5. Proporcionales-derivativos
6. Proporcionales-integrales-derivativos

Casi todos los controladores industriales emplean como fuente de energía la electricidad o un fluido presurizado, tal como el aceite o el aire. 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.

La figura 2.1, es un diagrama de bloques de un sistema de control industrial que consiste en un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor (elemento de medición). El controlador detecta la señal de error, que por lo general, está en un nivel de potencia muy bajo, y la amplifica a un nivel lo suficientemente alto. La salida de un controlador automático alimenta un actuador, tal como un motor o una válvula neumática, un motor hidráulico, o un motor eléctrico.

Figura 2.1 Diagrama de bloques de un sistema de control industrial.

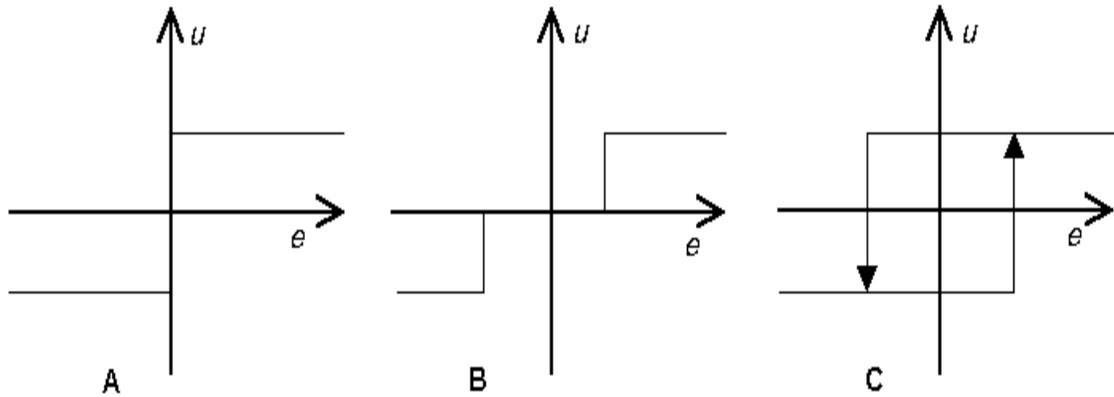


2.3.1 Acción de control on/off. En un sistema de control de dos posiciones, el elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas que, en muchos casos, son simplemente encendido y apagado. El control de dos posiciones o de encendido y apagado es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos. Este mecanismo de realimentación simple se puede describir matemáticamente como:

$$u = \begin{cases} u_{\max} & e > 0 \\ u_{\min} & e < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

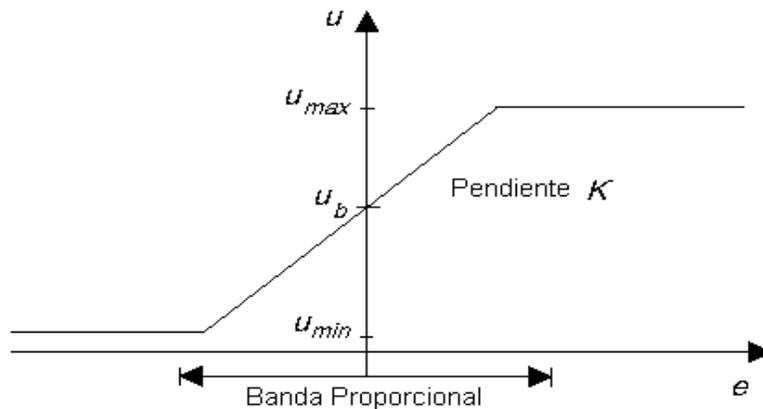
donde e (diferencia entre la referencia especificada por el operador y la salida medida del proceso) es el denominado *error de control*. Esta ley de control implica que siempre se usa la acción correctiva máxima. De esta manera, la variable manipulada tiene su valor más grande cuando el error es positivo y su valor más pequeño cuando el error es negativo. La realimentación de este tipo se llama *control on-off*. Es simple y no tiene parámetros que configurar, aparte de las acciones mínima y máxima que se ejecutan en el cálculo de la señal de control. El control *on-off* muchas veces es apropiado para mantener la variable controlada del proceso cerca del valor de la referencia que fue especificada, pero típicamente resulta en un sistema donde las variables oscilan. Se ve en la ecuación (2.1) que la variable de control no está definida cuando el error es cero. Es común tener algunas modificaciones ya sea introduciendo histéresis donde la variable toma un valor entre u_{\max} y u_{\min} o una zona muerta con un valor definido para la variable, como se muestra en la Figura 2.2.

Figura 2.2 (A) Características de un controlador *on-off* ideal y modificaciones con (B) zona muerta y (C) histéresis.



2.3.2 Acción de control proporcional. La razón por la que el control *on-off* resulta en oscilaciones es que el sistema sobreactúa cuando ocurre un pequeño cambio en el error que hace que la variable manipulada cambie sobre su rango completo. Este efecto se evita en el *control proporcional*, donde la característica del controlador es proporcional al error de control cuando éstos son pequeños. La Figura 2.3 muestra la característica de un controlador proporcional. De esta manera, el controlador está caracterizado por la función no lineal $u = f(e)$, dependiente del error de control.

Figura 2.3 Característica de un controlador proporcional. La entrada es el error de control e y la salida es la señal de control u .



Para describir la característica del controlador proporcional se debe dar los límites u_{max} y u_{min} de la variable de control. El rango lineal puede ser especificado, ya sea, por la pendiente dada en la curva característica (ganancia K del controlador) o, bien, por el rango donde la curva característica es lineal (conocida como *banda proporcional* b_p). Este rango está normalmente centrado alrededor de la referencia. La banda proporcional y la ganancia del controlador están relacionadas a través de:

$$u_{max} - u_{min} = Kb_p \quad (2.2)$$

Normalmente se asume que $u_{max} - u_{min} = 100\%$, lo cual implica que,

$$K = \frac{100}{b_p} \quad (2.3)$$

Se puede ver que un controlador proporcional actúa como un controlador *on-off* cuando los errores de control son grandes.

2.3.3 Acción de control integral. En un controlador con acción de control integral, la variación de la salida del controlador $u(t)$ se cambia a una razón proporcional a la señal de error $e(t)$. Es decir,

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (2.4)$$

o bien,

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.5)$$

donde K_i es una constante ajustable. Si se duplica el valor de $e(t)$, el valor de $u(t)$ varía dos veces más rápido. Para un error de cero, el valor $u(t)$ permanece unitario. En ocasiones, la acción de control integral se denomina control de ajuste.

2.4 CONTROL PID.

El control proporcional tiene la desventaja de que, en la mayoría de los casos, resulta en un error estático o de estado estacionario diferente de cero. Los algoritmos de control usados en la práctica son, por tanto, normalmente más complejos que el del controlador proporcional. Se puede mostrar empíricamente que el llamado “controlador PID” es una estructura útil. Dentro de la banda proporcional el comportamiento del algoritmo PID se puede describir como:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.5)$$

O bien por su equivalente en el plano s :

$$u(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] E(s) \quad (2.6)$$

Donde u es la variable de control y e es el error de control. De esta manera, la variable de control es una suma de tres términos: el término P , que es proporcional al error; el término I , que es proporcional a la integral del error; y el término D , que es proporcional a la derivada del error. Los parámetros del controlador son: la ganancia proporcional K_i , el tiempo integral T_i y el tiempo derivativo T_d .

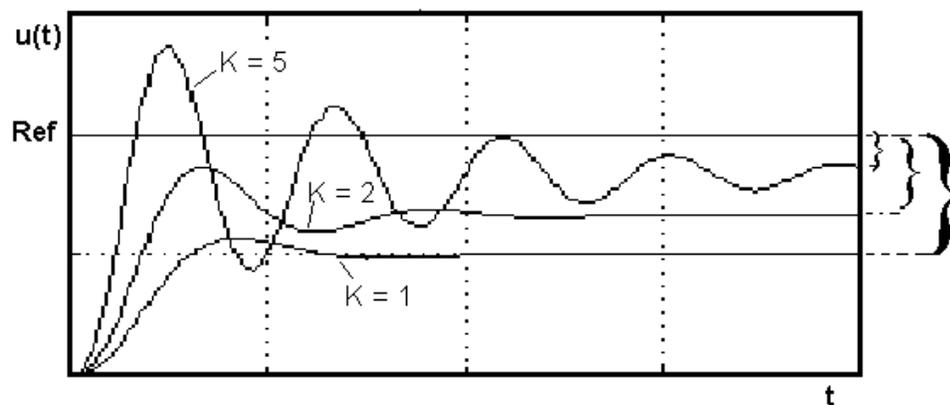
2.4.1 Acción proporcional. En el caso de un control proporcional puro, la ley de control de la ecuación (2.5) se reduce a:

$$u(t) = Ke(t) + u_b \quad (2.7)$$

La acción de control es simplemente proporcional al error de control. La variable u_b es una señal de polarización o un *reset*. Cuando el error de control e es cero, la variable de control toma el valor $u(t) = u_b$. La polarización u_b a menudo se la fija en $(u_{max} + u_{min}) / 2$, pero, algunas veces, puede ser ajustada manualmente de forma que el error de control en estado estacionario sea cero en una referencia dada.

Un ejemplo típico del control proporcional se ilustra en la figura 2.4. La figura muestra el comportamiento de la salida de un proceso y la señal de control, después de un cambio al escalón en la señal de referencia. La figura muestra que el error en estado estacionario decrece a medida que se incrementa la ganancia del controlador. Se nota también que la respuesta se vuelve más oscilatoria al incrementar la ganancia del controlador. Esto se debe a la dinámica del proceso.

Figura 2.4 Simulación de un sistema de control proporcional. El diagrama muestra la salida del proceso para diferentes valores de la ganancia.



2.4.2 Acción integral. La función principal de la acción integral es asegurar que la salida del proceso concuerde con la referencia en estado estacionario. Con el controlador proporcional, normalmente existiría un error en estado estacionario. Con la acción integral, un pequeño error positivo siempre producirá un incremento en la señal de control y, un error negativo siempre dará una señal decreciente sin importar cuán pequeño sea el error.

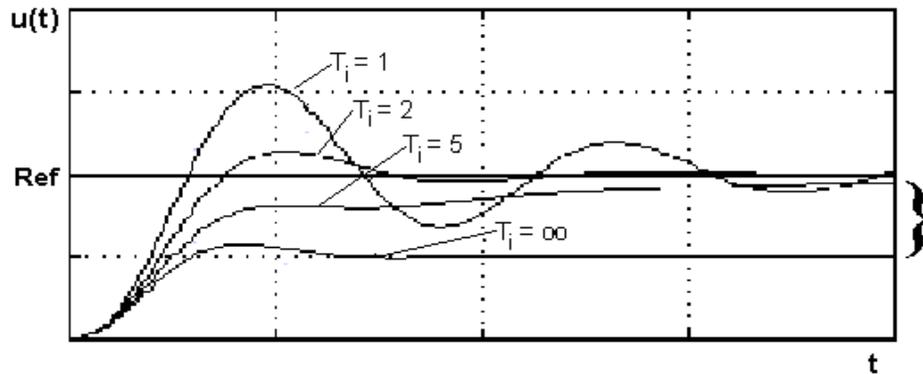
El siguiente argumento simple muestra que el error en estado estacionario siempre será cero con la acción integral. Asumiendo que un sistema está en estado estacionario con una señal de control constante, u_o , y un error constante, e_o . De la ecuación (2.5) se tiene que la señal de control estaría dada por:

$$u_o = K \left(e_0 + \frac{e_0}{T_i} t \right) \quad (2.8)$$

Como se tiene que $e_0 \neq 0$, claramente se contradice el supuesto de que la señal de control u_o se mantiene constante. Por tanto, como resultado de esto, un controlador con acción integral siempre dará un error en estado estacionario cero.

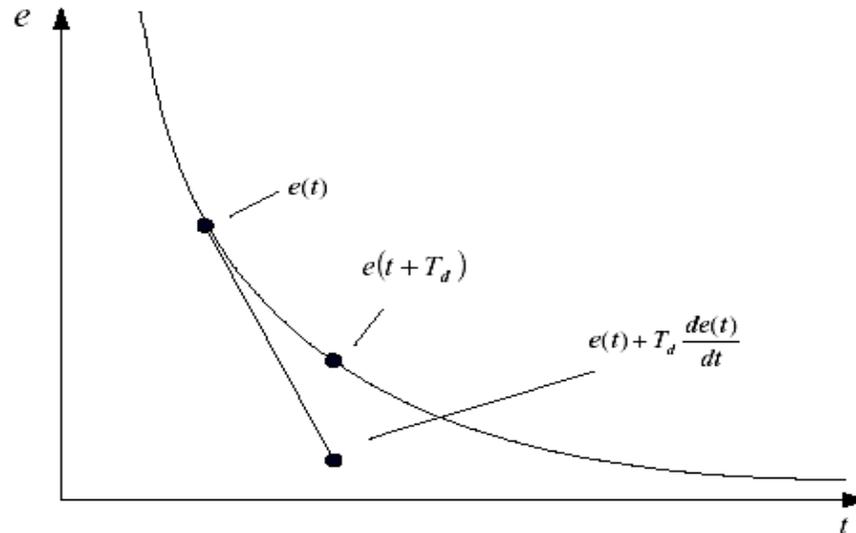
La acción integral también puede ser vista como un dispositivo que automáticamente reestablece el término de polarización u_b de un controlador proporcional. Las propiedades de la acción integral se ilustran en la figura 2.5, que muestra la simulación de un sistema de control PI. La ganancia proporcional es $K = 1$ en todas las curvas. El caso $T_i \rightarrow \infty$ corresponde a un control proporcional puro, que es idéntico al de $K = 1$ de la figura 2.4, donde el error final es del 50%.

Figura 2.5 Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional e integral.



2.4.3 Acción derivativa. El propósito de la acción derivativa es mejorar la estabilidad de lazo cerrado. El mecanismo de inestabilidad puede ser descrito intuitivamente como sigue. Debido a la dinámica del proceso, pasa algún tiempo antes de que la variable de control se note en la salida del proceso. De esta manera, el sistema de control tarda en corregir el error. La acción de un controlador con acción proporcional y derivativa puede ser interpretada como si el control proporcional fuese hecho para predecir la salida del proceso. La predicción se hace por la extrapolación del error de control en la dirección de la tangente a su curva respectiva, como se muestra en la figura 2.6.

Figura 2.6 Interpretación geométrica de la acción derivativa como un control predictivo, donde la predicción se obtiene mediante extrapolación lineal.



La estructura básica de un controlador PD está dada por:

$$u(t) = K \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.9)$$

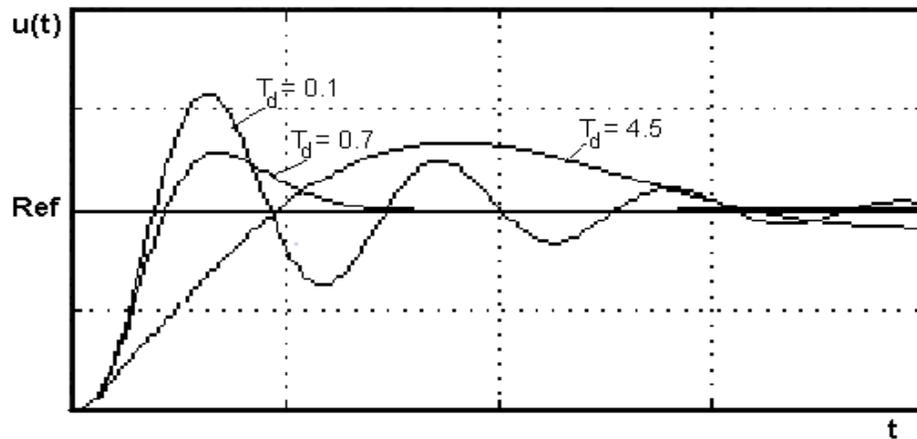
La expansión en series de Taylor de $e(t + T_d)$ da:

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

De esta manera, la señal de control es proporcional a un estimado del error de control en el un tiempo T_d hacia adelante, donde el estimado se obtiene mediante extrapolación lineal, como se muestra en la figura 2.6.

Las propiedades de la acción derivativa se ilustran en la figura 2.7, que muestra la simulación de un sistema con control PID. La ganancia del controlador y el tiempo de estimación se mantienen constantes con $K = 3$ y $T_i = 2$, y se varía el tiempo derivativo T_d . Para $T_d = 0$ se tiene un control PI puro. El sistema de lazo cerrado es oscilatorio con los parámetros elegidos. Se observa que el amortiguamiento se incrementa con el aumento del tiempo derivativo, pero disminuye cuando el tiempo derivativo se vuelve más grande.

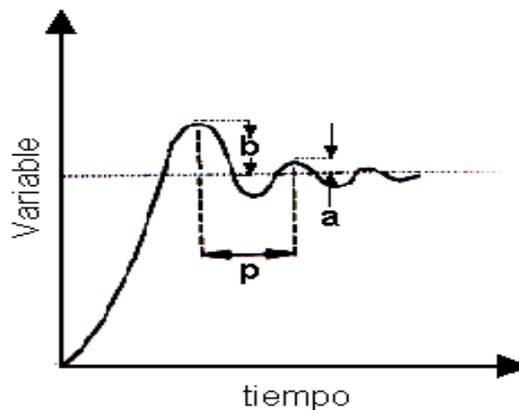
Figura 2.7 Simulación de un sistema en lazo cerrado con control proporcional, integral y derivativo. El diagrama muestra la respuesta del sistema con valores diferentes de T_d .



2.4.4 Ajuste de los parámetros de controladores PID. Un concepto claro es que para lograr un *buen control* sobre un proceso es necesario ajustar en forma apropiada los parámetros del controlador. La respuesta a malla cerrada del sistema depende del ajuste de estos parámetros. Por lo tanto, los parámetros se ajustan para obtener una respuesta que se considere un *buen control* sobre el proceso. La respuesta deseada para un proceso depende mucho del propósito de dicho proceso.

No existe en realidad una respuesta única que pueda considerarse un buen control para todos los procesos. Lo que se puede decir es que, *para la mayoría de los procesos industriales*, ante un cambio brusco (un escalón) en el *set-point*, es posible aceptar unas pocas oscilaciones de la variable controlada al acercarse a su nuevo estado estacionario, a cambio de tener un tiempo de establecimiento corto. Teniendo esto en cuenta, se considera que una respuesta con una *razón de asentamiento de 1/4* (también denominada *razón de amplitud de 1/4*) es una respuesta buena para la mayoría de los procesos industriales. En la figura 2.8 se muestra este tipo de respuesta. Se observa que la respuesta es sub-amortiguada y que la amplitud de un sobrepaso sobre el anterior vale: $a/b = 1/4$. La escogencia de una razón de 1/4 es normalmente adecuada ya que es un buen compromiso entre un sobrepaso aceptable y un rápido amortiguamiento de la oscilación (una rápida llegada al valor estacionario).

Figura 2.8 Respuesta a una señal escalón con una razón de asentamiento de 1/4



Si en un proceso se conoce las funciones de transferencia de cada uno de sus componentes, utilizando métodos analíticos es posible calcular los valores de los parámetros del controlador que permitan obtener una respuesta determinada del sistema. Pero, en el ambiente industrial, es a menudo difícil conocer las características matemáticas del proceso, por lo que se impone la utilización de métodos empíricos para ajustar los parámetros del controlador. Los métodos generalmente utilizados son:

1. Método de tanteo.
2. Técnicas a malla cerrada:
 - Método del último
 - Método de Harriot
3. Técnicas a malla abierta
 - Método de la curva de reacción

2.4.4.1 Método de tanteo. Como su nombre lo indica, en este caso se procede a ajustar por ensayo y error los parámetros del controlador observando luego la respuesta del sistema ante un cambio brusco en la referencia. El ajuste termina cuando se logra obtener la respuesta deseada, por ejemplo, una razón de asentamiento de 1/4. Es recomendable graficar la respuesta utilizando un registrador, especialmente cuando el

tiempo de respuesta es muy largo (en algunos casos puede ser de horas). Obviamente, el proceso debe estar en funcionamiento.

Generalmente se comienza el ajuste colocando una banda ancha para los parámetros y luego estrechar las bandas poco a poco, observando la respuesta. Esto significa: una banda proporcional grande (o ganancia pequeña), un tiempo de integración tendiendo a infinito (un número de repeticiones por minuto pequeño) y un tiempo de derivación tendiendo a cero. Se recomienda estrechar primero la banda proporcional y ajustar luego los tiempos de integración y de derivación, teniendo en cuenta que un aumento en la acción integral acerca el error a cero pero tiende a hacer inestable el sistema y que un aumento de la acción derivativa tiende a disminuir las oscilaciones. En algunos casos no es posible obtener la respuesta deseada, por mucho que se tantee en los parámetros, en cuyo caso se pueden intentar otros métodos de ajuste.

2.4.4.2 Técnicas a malla cerrada.

Método del último. Este método fue desarrollado por Ziegler y Nichols. Consiste en determinar *la última ganancia (K_p)* y *el último período (P_u)* para, con esos datos, calcular el punto de ajuste del controlador. El procedimiento es el siguiente:

1. Colocar el controlador solo en modo proporcional ($T_i \rightarrow \infty$ y $T_d \rightarrow 0$).
2. Colocar el controlador en automático (malla cerrada).
3. Introducir un disturbio brusco, variando el *set-point* y regresándolo al punto inicial.
4. Observar la respuesta del proceso (graficar). Si la amplitud de la variable controlada aumenta permanentemente, disminuir la ganancia y volver al punto 3.
5. Si la amplitud de la variable controlada disminuye permanentemente, aumentar la ganancia y volver al punto 3.
6. Si la respuesta es oscilante y de amplitud constante, la ganancia obtenida es la *última (K_p)* y el período de la oscilación es el *último período (P_u)*. Ver figura 2.9
7. Para una respuesta con una razón de amortiguamiento de $\frac{1}{4}$, se ajusta el controlador de acuerdo a la tabla 2.1.

Figura 2.9 Respuesta deseada en el controlador.

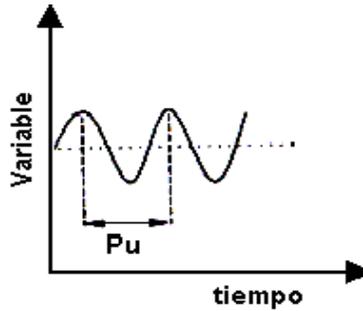


Tabla 2.1 Parámetros para el controlador PID.

| Acción | Actuación | Kp | Ti | Td |
|--------|----------------|---------|--------|------|
| P | Decaimiento ¼ | Pu/2 | | |
| PI | Decaimiento ¼ | 0,45 Pu | Pu/1,2 | |
| PID | Decaimiento ¼ | 0,60 Pu | Pu/2 | Pu/4 |
| PID | Con Sobrepasso | Pu/3 | Pu/2 | Pu/3 |
| PID | Sin Sobrepasso | Pu/5 | Pu/3 | Pu/2 |

Método de Harriot. Es una modificación del método del último. Cuando es difícil lograr una oscilación permanente en la variable controlada, el procedimiento es el siguiente:

1. Colocar el controlador solo en modo proporcional y en automático.
2. Ajustar la ganancia (o la banda proporcional) hasta que la respuesta a un escalón en la referencia, sea con una razón de asentamiento de ¼
3. Medir el período P de la oscilación amortiguada.
4. Ajustar los parámetros T_i y T_d así:

$$T_i = P/6, \quad T_d = P/1.5$$

5. Ajustar entonces la ganancia hasta que nuevamente la respuesta a un escalón en el *set-point* sea con una razón de asentamiento de ¼.

2.4.4.3 Técnicas a malla abierta.

Método de la curva de reacción. Este método fue desarrollado por Ziegler y Nichols. El procedimiento es como sigue:

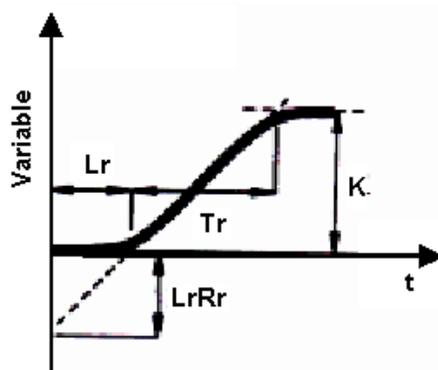
1. Dejar que se estabilice el sistema.
2. Colocar el controlador en manual (abrir la malla de control).
3. Variar la salida del controlador imponiendo un disturbio en escalón al proceso.
4. Graficar la respuesta de la variable controlada, la cual en general se puede tener la forma mostrada en la figura 2.10.
5. Volver el sistema a sus condiciones iniciales.
6. Obtener de la gráfica los datos Lr y $LrRr$, siendo:

Lr el atraso del proceso y Rr es rata de reacción del proceso. La rata de reacción corresponde a la pendiente de la parte lineal de la gráfica.

7. Para obtener una respuesta con una razón de amortiguamiento de $\frac{1}{4}$, ajustar los parámetros del controlador de la siguiente manera:

| | | |
|-----------------------|---|---|
| Modo P: $Kc = 1/LrRr$ | Modo PI: $Kc = 0.9/LrRr$ $Ti = 3.33Lr$ | Modo PID: $Kc = 1.2/LrRr$ $Ti = 2Lr$ $Td = 0.5Lr$ |
|-----------------------|---|---|

Figura 2.10 Curva de reacción.



2.5 IMPLEMENTACION DIGITAL.

Los controladores PID fueron originalmente implementados usando técnicas analógicas. Los antiguos sistemas usaban *relés* neumáticos y otros dispositivos. Los motores eléctricos con *relés*, circuitos realimentados y amplificadores operacionales fueron usados con posterioridad. En la actualidad, es una práctica común implementar controladores PID usando microprocesadores.

Muchos aspectos deben ser considerados con respecto a las implementaciones digitales. Los más importantes tienen que ver con el muestreo, la discretización y la cuantización.

2.5.1 Muestreo. Cuando se usa un computador digital para implementar una ley de control, todo el procesamiento de señales se hace en instantes de tiempo discretos. La secuencia de operaciones es como sigue:

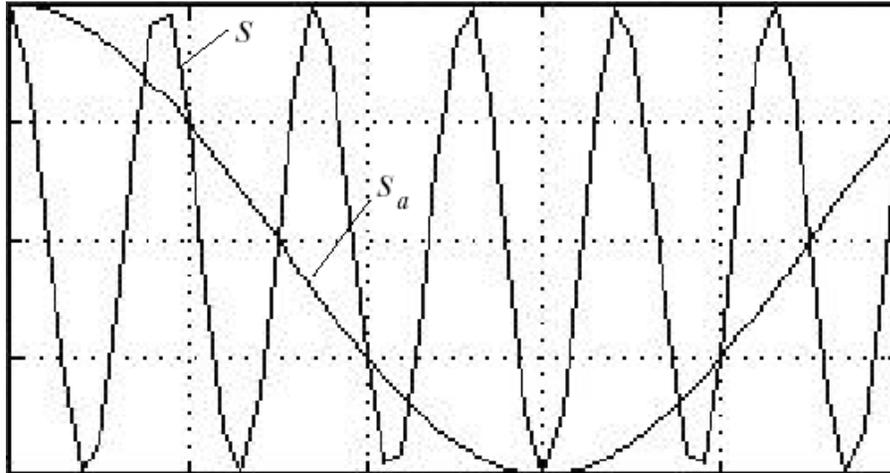
1. Esperar una interrupción proveniente de un reloj de tiempo real.
2. Leer la entrada analógica a través del puerto de entrada/salida.
3. Calcular la señal de control utilizando el algoritmo de control preestablecido.
4. Enviar la salida analógica al puerto de entrada/salida.
5. Actualizar las variables del controlador que serán utilizadas en el siguiente instante de muestreo.
6. Ir al paso 1

Las acciones de control están basadas en los valores de la salida del proceso, obtenidos solamente en instantes discretos en el tiempo. Este procedimiento se llama *muestreo*. El caso normal es que las señales son muestreadas periódicamente con periodo h . El mecanismo de muestreo introduce algunos fenómenos no esperados que deben ser tomados en cuenta en una buena implementación digital de un controlador PID. Para entender esto se deben considerar las señales $S(t)$ y $S_a(t)$ mostradas en la figura 2.11.

$$S(t) = \cos(\omega_s t) \quad \text{señal de muestreo}$$

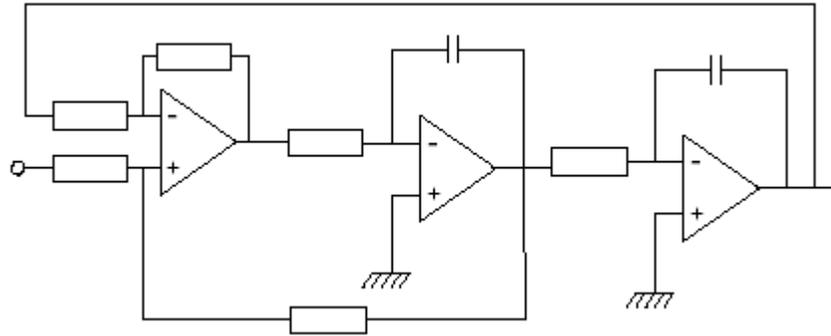
$$S_a(t) = \cos(\omega_a t) \quad \text{señal a muestrear}$$

Figura 2.11 Muestreo de una señal con el efecto *aliasing*.



Cuando las señales S y S_a tienen los mismos valores en los instantes de muestreo, significa que no existe forma de separar las señales si sólo se conocen sus valores en los instantes de muestreo. La señal S_a es, por tanto, llamada un “alias” de la señal S . Como se ve en la figura 2.11. Una consecuencia del efecto *aliasing* es que una perturbación de alta frecuencia después del muestreo aparece como una señal de baja frecuencia.

2.5.2 Prefiltrado. El efecto *aliasing* puede crear dificultades significativas si no se toman precauciones apropiadas. Las altas frecuencias, que en los controladores analógicos normalmente son eficazmente eliminadas por filtros pasabajos, pueden, debido al *aliasing*, parecer como señales de baja frecuencia en el ancho de banda del sistema de control. Para evitar estas dificultades, se debe introducir un filtro analógico (que eficazmente elimine todas las componentes de la señal con frecuencias por arriba de la frecuencia de muestro). Este filtro es llamado *filtro antialiasing*. Un filtro *antialiasing* común es un *filtro Butterworth* de segundo orden o mayor. Se usa un filtro de alto orden cuando se trata de aplicaciones críticas. Una implementación de este filtro, usando amplificadores operacionales, se muestra en la figura 2.12.

Figura 2.12 Diagrama del circuito de un filtro *Butterworth* de segundo orden.

2.5.3 Discretización. Para implementar una ley de control de tiempo continuo, mediante un controlador PID, en un computador digital, es necesario aproximar las derivadas y las integrales que aparecen en la ley de control.

Parte Proporcional. El término proporcional está dado por:

$$P = K(b y_{sp} - y) \quad (2.11)$$

que se implementa, en forma digital, reemplazando las variables continuas con sus versiones muestreadas. Entonces:

$$P(t_k) = K(b y_{sp}(t_k) - y(t_k)) \quad (2.12)$$

donde la secuencia t_k denota los instantes de muestreo; es decir, los instantes de tiempo en los que el computador lee la entrada analógica.

Parte Integral. El término integral está dado por:

$$I(t) = \frac{K}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.13)$$

Se sigue que:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{K}{T_i} e(t) \quad (2.14)$$

Existen varias formas de aproximar esta ecuación.

Diferencias hacia adelante: la aproximación de la derivada mediante diferencias hacia adelante da:

$$\frac{I(t_{k+1}) - I(t_k)}{h} = \frac{K}{T_i} e(t_k) \quad (2.15)$$

Esto produce la siguiente ecuación recursiva para el término integral:

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + \frac{Kh}{T_i} e(t_k) \quad (2.16)$$

Diferencias hacia atrás: si la derivada en la ecuación (2.14) se aproxima por una diferencia hacia atrás, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{I(t_k) - I(t_{k-1})}{h} = \frac{K}{T_i} e(t_k) \quad (2.17)$$

Esto conduce a la siguiente ecuación recursiva para el término integral:

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + \frac{Kh}{T_i} e(t_{k+1}) \quad (2.18)$$

Aproximación de Tustin y equivalencia rampa: un método de aproximación simple, debido a Tustin, está dado por:

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + \frac{Kh}{T_i} \frac{e(t_{k+1}) + e(t_k)}{2} \quad (2.19)$$

Otro método, que da salidas exactas en los instantes de muestreo, es llamado *equivalencia rampa*. Esto se produce si la señal de entrada es continua y lineal a pedazos entre los instantes de muestreo. El método de equivalencia rampa da la misma aproximación del término integral como la aproximación de Tustin, es decir la ecuación (2.19).

Se ve que todas las aproximaciones tienen la misma forma, es decir:

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + b_{i1}e(t_{k+1}) + b_{i2}e(t_k) \quad (2.20)$$

pero con valores diferentes de los parámetros b_{i1} y b_{i2}

Parte Derivativa. El término derivativo está dado por:

$$\frac{T_d}{N} \frac{dD}{dt} + D = -KT_d \frac{dy}{dt} \quad (2.21)$$

Donde el termino derivativo modificado puede ser implementado como sigue:

$$D = -\frac{sKT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} y \quad (2.22)$$

La modificación puede ser interpretada como la derivada filtrada por un sistema de primer orden con constante de tiempo T_d/N . La aproximación actúa como una derivada para componentes de baja frecuencia de la señal. La ganancia, sin embargo, está limitada a KN . Esto significa que el ruido de medición de alta frecuencia es amplificado a lo más por este factor. Los valores típicos de N son de 8 a 20. Además, que el término D puede ser implementado sin derivadores.

La ecuación (2.21) puede ser aproximada de la misma manera que el término integral.

Diferencias hacia adelante: aproximando las derivadas por diferencias hacia adelante se obtiene:

$$\frac{T_d}{N} \frac{D(t_{k+1}) - D(t_k)}{h} + D(t_k) = -KT_d \frac{y(t_{k+1}) - y(t_k)}{h} \quad (2.23)$$

Esto se puede volver a escribir como:

$$D(t_{k+1}) = \left(1 - \frac{Nh}{T_d}\right) D(t_k) - KN(y(t_{k+1}) - y(t_k)) \quad (2.24)$$

Diferencias hacia atrás: si la derivada de la ecuación (2.21) se aproxima por diferencias hacia atrás, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{T_d}{N} \frac{D(t_k) - D(t_{k-1})}{h} + D(t_k) = -KT_d \frac{y(t_k) - y(t_{k-1})}{h} \quad (2.25)$$

Esto se puede volver a escribir como:

$$D(t_k) = \left(\frac{T_d}{T_d + Nh} \right) D(t_{k-1}) - \frac{KT_d N}{T_d + Nh} (y(t_k) - y(t_{k-1})) \quad (2.26)$$

Aproximación de Tustin: usando la aproximación de Tustin para aproximar el término de la derivada, se tiene:

$$D(t_k) = \frac{2T_d - Nh}{2T_d + Nh} D(t_{k-1}) - \frac{2KT_d N}{2T_d + Nh} (y(t_k) - y(t_{k-1})) \quad (2.27)$$

Equivalencia rampa: finalmente, la aproximación equivalencia rampa está dada por:

$$D(t_k) = e^{-Nh/T_d} D(t_{k-1}) - \frac{KT_d \left(1 - e^{-Nh/T_d} \right)}{h} (y(t_k) - y(t_{k-1})) \quad (2.28)$$

Todas las aproximaciones tienen la forma:

$$D(t_k) = a_d D(t_{k-1}) - b_d (y(t_k) - y(t_{k-1})) \quad (2.29)$$

pero con diferentes valores de los parámetros a_d y b_d .

Las aproximaciones del término derivativo son estables sólo cuando $|a_d| < 1$. La aproximación por diferencias hacia adelante requiere que $T_d > Nh/2$. La aproximación se vuelve inestable para valores pequeños de T_d . Sin embargo, la aproximación de Tustin y la aproximación por diferencias hacia adelante dan valores negativos de a_d si T_d es pequeño. Esto no es deseable debido a que la aproximación exhibirá un cierto comportamiento resonante. La aproximación por diferencias hacia atrás da buenos resultados para todos los valores de T_d . También es más fácil de calcular que la aproximación de equivalencia rampa y, por tanto, es el método más común.

La aproximación por diferencias hacia adelante es la menos usada debido a sus problemas de inestabilidad para valores pequeños del tiempo derivativo T_d . El algoritmo de Tustin es usado muy frecuentemente debido a su acercamiento con la función de transferencia de tiempo continuo. La aproximación por diferencias hacia atrás es usada cuando es necesario un algoritmo que se comporte bien con pequeños valores de T_d .

2.5.4 Cuantización. Un computador digital permite sólo precisión finita en los cálculos. Algunas veces es difícil implementar el término integral en computadoras con longitud de palabra corta. Esta dificultad se entiende a partir de la ecuación (2.20), donde los términos de corrección:

$$b_{i1}e(t_{k-1}) + b_{i2}e(t_k) \quad (2.30)$$

son normalmente pequeños en comparación con $I(t_k)$, y pueden ser redondeados a cero, a menos que la longitud de palabra sea suficientemente grande.

Este efecto de redondeo a cero da lo que se conoce como *offset de integración*. Para llegar a apreciar los órdenes de magnitud involucrados, se asume que se usa la aproximación de diferencias hacia atrás y que todas las señales están normalizadas de tal forma que la magnitud más grande sea 1. Entonces, el término de corrección Kh/T_i en la ecuación (2.18) tiene la magnitud más grande.

Para evitar el redondeo a cero del término de corrección, es necesario tener una precisión de al menos 20 *bits*. Aún así, se requieren más bits para obtener valores numéricos significativos. La situación es particularmente importante cuando se usa un motor a pasos que produce incrementos. Entonces, es necesario recurrir a herramientas especiales para evitar el redondeo a cero de la integral. Una forma simple es usar un periodo de muestreo largo en el término integral.

3. LOS MICROCONTROLADORES

3.1 FAMILIA DE LOS PIC.

Un *PIC* o microcontrolador es un computador completo, aunque de imitadas prestaciones, que está contenido en el *chip* de un circuito integrado programable y se destina a gobernar una sola tarea con el programa que reside en su memoria. Sin embargo existen otras familias de microcontroladores más eficaces en aplicaciones concretas, especialmente si predomina una característica esencial.

Pero en la actualidad los *PIC* tienen "algo" que fascina a los diseñadores. Puede ser la velocidad, el precio, la facilidad de uso, la información, las herramientas de apoyo. Quizás un poco de todo es lo que produce esa imagen de sencillez y utilidad. Ya que a la hora de escoger el microcontrolador a emplear en un diseño concreto hay que tener en cuenta multitud de factores, como la documentación y herramientas de desarrollo disponibles y su precio, la cantidad de fabricantes que lo producen y por supuesto las características del microcontrolador (tipo de memoria de programa, número de temporizadores, interrupciones, etc.).

3.2 RECURSOS DE LOS MICROCONTROLADORES.

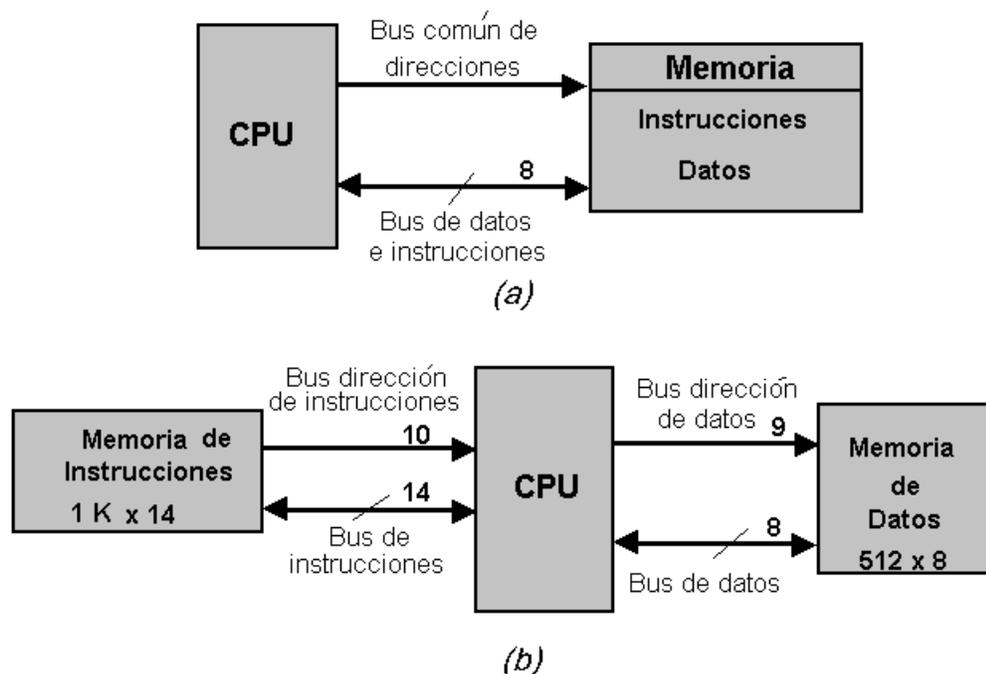
Al estar los microcontroladores integrados en un *chip*, su estructura fundamental y sus características básicas son muy parecidas. Todos deben disponer de los bloques esenciales: procesador, memoria de datos y de instrucciones, líneas de E/S, oscilador de reloj y módulos controladores de periféricos. Sin embargo, cada fabricante intenta enfatizar los recursos más idóneos para las aplicaciones a las que se destinan preferentemente.

3.2.1 La Arquitectura.

Aunque inicialmente todos los microcontroladores adoptaron la arquitectura clásica de Von Neumann, en el momento presente se impone la arquitectura Harvard. La arquitectura de Von Neumann se caracteriza por disponer de una sola memoria principal donde se almacenan datos e instrucciones de forma indistinta. A dicha memoria se accede a través de un sistema de buses único (direcciones, datos y control).

La arquitectura Harvard dispone de dos memorias independientes una, que contiene sólo instrucciones y otra, sólo datos. Ambas disponen de sus respectivos sistemas de buses de acceso y es posible realizar operaciones de acceso (lectura o escritura) simultáneamente en ambas memorias. Figura 3.1.

Figura 3.1 (a) Arquitectura Von Neumann. La CPU se comunica a través de un sistema de buses con la memoria, donde se guardan instrucciones y datos. (b) Arquitectura Harvard la memoria de datos y de instrucciones son independientes.



La arquitectura Harvard y la técnica de la segmentación son los principales recursos en los que se apoya el elevado rendimiento que caracteriza estos dispositivos programables, mejorando dos características esenciales:

1. Velocidad de ejecución.
2. Eficiencia en la compactación del código.

3.2.2 El Procesador. Es el elemento más importante del microcontrolador y determina sus principales características, tanto a nivel hardware como software. Se encarga de direccionar la memoria de instrucciones, recibir el código OP de la instrucción en curso, su decodificación y la ejecución de la operación que implica la instrucción, así como la búsqueda de los operandos y el almacenamiento del resultado.

Existen tres orientaciones en cuanto a la arquitectura y funcionalidad de los procesadores actuales.

CISC: Un gran número de procesadores usados en los microcontroladores están basados en la filosofía *CISC* (Computadores de Juego de Instrucciones Complejo, por sus siglas en inglés). Disponen de más de 80 instrucciones máquina en su repertorio, algunas de las cuales son muy sofisticadas y potentes, requiriendo muchos ciclos para su ejecución. Una ventaja de los procesadores *CISC* es que ofrecen al programador instrucciones complejas que actúan como macros.

RISC: Tanto la industria de los computadores comerciales como la de los microcontroladores están decantándose hacia la filosofía *RISC* (Computadores de Juego de Instrucciones Reducido, por sus siglas en inglés). En estos procesadores el repertorio de instrucciones máquina es muy reducido y las instrucciones son simples y, generalmente, se ejecutan en un ciclo. La sencillez y rapidez de las instrucciones permiten optimizar el hardware y el software del procesador.

SISC: En los microcontroladores destinados a aplicaciones muy concretas, el juego de instrucciones, además de ser reducido, es específico, o sea, las instrucciones se adaptan

a las necesidades de la aplicación prevista. Esta filosofía se ha bautizado con el nombre de *SISC* (Computadores de Juego de Instrucciones Específico, por sus siglas en inglés).

3.2.3 La Memoria. En los microcontroladores la memoria de instrucciones y datos está integrada en el propio *chip*. Una parte debe ser no volátil, tipo ROM, y se destina a contener el programa de instrucciones que gobierna la aplicación. Otra parte de memoria será tipo RAM, volátil, y se destina a guardar las variables y los datos.

Memoria no volátil para contener el programa. No hay posibilidad de utilizar memorias externas de ampliación. Son 5 los tipos de memoria adecuados para soportar esta función, estos son:

1. **ROM.** Se graba el chip durante su fabricación, implica costos altos y sólo se recomienda cuando se produce en serie.
2. **EPROM.** Se graba con un dispositivo que es gobernado mediante un computador personal, que recibe el nombre de grabador, se borra con rayos UV para reprogramarse.
3. **OTP.** Se graba por el usuario igual que la memoria EPROM, a diferencia de la EPROM la OTP se puede grabar solamente una vez.
4. **EEPROM.** La grabación es similar a la de las memorias EPROM y OTP, la diferencia es que el borrado se efectúa de la misma forma que el grabado, o sea eléctricamente.
5. **FLASH.** Posee las mismas características que la EEPROM, pero ésta tiene menor consumo de energía y mayor capacidad de almacenamiento, por ello está sustituyendo a la memoria EEPROM.

Memoria de lectura y escritura para guardar los datos. Algunos microcontroladores manejan la memoria RAM estática (SRAM), otros como el PIC16F877 disponen de una memoria de datos del tipo EEPROM, de esta forma, un corte en el suministro de la alimentación no ocasiona la pérdida de la información y por ende, está disponible al reiniciarse el programa.

3.2.4 Puertas de Entrada y Salida. La principal utilidad de las patitas que posee la cápsula que contiene un microcontrolador es soportar las líneas de E/S que comunican al computador interno con los periféricos exteriores. Según los controladores de periféricos que posea cada modelo de microcontrolador, las líneas de E/S se destinan a proporcionar el soporte a las señales de entrada, salida y control.

3.2.5 Reloj principal. Todos los microcontroladores disponen de un circuito oscilador que genera una onda cuadrada de alta frecuencia, que configura los impulsos de reloj usados en la sincronización de todas las operaciones del sistema.

Generalmente, el circuito de reloj está incorporado en el microcontrolador y sólo se necesitan unos pocos componentes exteriores para seleccionar y estabilizar la frecuencia de trabajo. Dichos componentes suelen consistir en un cristal de cuarzo junto a elementos pasivos o bien un resonador cerámico o una red R-C.

Aumentar la frecuencia de reloj supone disminuir el tiempo en que se ejecutan las instrucciones pero lleva aparejado un incremento del consumo de energía.

3.2.6 Recursos auxiliares.

- A) Temporizadores.** Orientados a controlar tiempos.
- B) Perro guardián.** Destinado a provocar una reinicialización cuando el programa queda bloqueado.
- C) Conversores AD y DA.** Para poder recibir y enviar señales analógicas.
- D) Comparadores analógicos.** Para verificar el valor de una señal analógica.
- E) Estado de reposo o de bajo consumo.** En el que el sistema queda <<congelado>> y el consumo de energía se reduce al mínimo.

F) Modulador de anchura de pulsos o PWM. Son circuitos que proporcionan en su salida impulsos de anchura variable, que se ofrecen al exterior a través de las patitas del encapsulado.

G) Puertos de entrada y salida Con objeto de dotar al microcontrolador de la posibilidad de comunicarse con otros dispositivos externos, otros buses de comunicación, buses de sistemas, buses de redes y poder adaptarlos con otros elementos bajo otras normas y protocolos. Algunos modelos disponen de recursos que permiten directamente esta tarea, entre los que destacan:

- UART, adaptador de comunicación serie asíncrona.
- USART, adaptador de comunicación serie síncrona y asíncrona.
- Puerta paralela esclava para poder conectarse con los buses de otros microprocesadores.
- USB (*Universal Serial Bus*), que es un moderno bus serie para los PC.
- Bus I²C, que es un interfaz serie de dos hilos desarrollado por Philips.
- CAN (*Controller Area Network*), permite la comunicación con redes de conexión multiplexadas desarrollado conjuntamente por *Bosch* e *Intel* para el cableado de dispositivos en automóviles.

3.3 EL PIC16F877.

3.3.1 Características generales. La siguiente es una lista de las características que comparte el PIC16F877 con los dispositivos más cercanos de su familia como el PIC16F873, PIC16F874 y PIC16F876:

- CPU RISC, Sólo 35 instrucciones para manejar.

- Todas las instrucciones se ejecutan en un ciclo de reloj, excepto los saltos que requieren dos.
- Frecuencia de operación de 0 a 20 MHz (DC a 200 nseg de ciclo de instrucción).
- Hasta 8k x 14 bits de memoria Flash de programa.
- Hasta 368 bytes de memoria de datos (RAM).
- Hasta 256 bytes de memoria de datos EEPROM.
- Hasta 4 fuentes de interrupción.
- Stack de hardware de 8 niveles.
- Reset de encendido (POR).
- Timer de encendido (PWRT).
- Timer de arranque del oscilador (OST).
- Sistema de vigilancia Watchdog timer (perro guardián).
- Protección programable de código.
- Modo SLEEP de bajo consumo de energía.
- Opciones de selección del oscilador.
- Programación y depuración serie "In-Circuit" (ICSP) a través de dos pines.
- Lectura/escritura de la CPU a la memoria flash de programa.
- Rango de voltaje de operación de 2.0 a 5.5 volts.
- Alta disipación de corriente de la fuente: 25mA.
- Rangos de temperatura: Comercial, Industrial y Extendido.
- Bajo consumo de potencia:
 - Menos de 0.6mA a 3V, 4 MHz
 - 20 μ A a 3V, 32 KHz
 - Menos de 1 μ A corriente en *standby*.

3.3.2 Periféricos.

- Timer0: Contador/Temporizador de 8 bits con pre-escalador de 8 bits.
- Timer1: Contador/Temporizador de 16 bits con pre-escalador.
- Timer2: Contador/Temporizador de 8 bits con pre-escalador y post-escalador de 8 bits y registro de período.
- Dos módulos de Captura, Comparación y PWM.

- Convertidor Analógico/Digital: de 10 bits, hasta 8 canales.
- Puerto Serie Síncrono (SSP).
- Puerto Serie Universal (USART/SCI).
- Puerto Paralelo Esclavo (PSP): de 8 bits con líneas de protocolo.

3.4 HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DE APLICACIONES.

Uno de los factores que más importancia tiene a la hora de seleccionar un microcontrolador entre todos los demás es el soporte tanto software como hardware de que dispone. Un buen conjunto de herramientas de desarrollo puede ser decisivo en la elección, ya que pueden suponer una ayuda inestimable en el desarrollo del proyecto. Las principales herramientas de ayuda al desarrollo de sistemas basados en microcontroladores se describen a continuación:

3.4.1 Desarrollo del software.

Ensamblador. Todo procesador, grande o pequeño, desde el de una calculadora hasta el de un supercomputador, ya sea de propósito general o específico, posee un lenguaje único que es capaz de reconocer y ejecutar. Por razones que resultan obvias, este lenguaje ha sido denominado *Lenguaje de Máquina* y más que ser propio de un computador pertenece a su microprocesador. El lenguaje de máquina está compuesto por una serie de instrucciones, que son las únicas que pueden ser reconocidas y ejecutadas por el microprocesador.

Ahora bien, mientras que con el lenguaje de máquina, se obtiene un control total del microprocesador, la programación en este lenguaje resulta muy difícil y fácil para cometer errores. No tanto por el hecho de que las instrucciones son sólo números, sino porque se debe calcular y trabajar con las direcciones de memoria de los datos, los saltos y las direcciones de llamadas a subrutinas, además de que para poder hacer ejecutable un

programa, se deben enlazar las rutinas de *run-time* y servicios del sistema operativo. Este proceso es al que se le denomina *ensamblado de código*. Para facilitar la elaboración de programas a este nivel, se desarrollaron los *Ensambladores* y el *Lenguaje Ensamblador*.

La programación en lenguaje ensamblador puede resultar un tanto ardua para el principiante, pero permite desarrollar programas muy eficientes, ya que otorga al programador el dominio absoluto del sistema. Los fabricantes suelen proporcionar el programa ensamblador de forma gratuita y en cualquier caso siempre se puede encontrar una versión gratuita para los microcontroladores más populares.

Compilador. Aun cuando el lenguaje ensamblador fue diseñado para hacer más fácil la programación de bajo nivel, ésta resulta todavía complicada y muy laboriosa. Por tal motivo se desarrollaron los lenguajes de alto nivel, para facilitar la programación de los computadores, minimizando la cantidad de instrucciones a especificar. Sin embargo, esto no quiere decir que el microprocesador ejecute dichos lenguajes. Cada una de las instrucciones de un lenguaje de alto nivel o de un nivel intermedio, equivalen a varias de lenguaje máquina o lenguaje ensamblador.

La programación en un lenguaje de alto nivel (como el C) permite disminuir el tiempo de desarrollo de un producto. No obstante, si no se programa con cuidado, el código resultante puede ser mucho más ineficiente que el programado en ensamblador. Las versiones más potentes suelen ser muy caras, aunque para los microcontroladores más populares pueden encontrarse versiones demo limitadas e incluso compiladores gratuitos.

Los *compiladores*, como los desarrollados para Fortran, Clipper, COBOL, Pascal o C, que en vez de llamar y ejecutar una rutina en lenguaje de máquina, éstos juntan esas rutinas para formar el código objeto que, después de enlazar las rutinas de *run-time* y llamadas a otros programas y servicios del sistema operativo, se transformará en el programa ejecutable.

3.4.2 Depuración. Debido a que los microcontroladores van a controlar dispositivos físicos, los desarrolladores necesitan herramientas que les permitan comprobar el buen funcionamiento del microcontrolador cuando es conectado a otros circuitos.

Simulador. Son capaces de ejecutar en un PC programas realizados para el microcontrolador. Los simuladores permiten tener un control absoluto sobre la ejecución de un programa, siendo ideales para la depuración de los mismos. Su gran inconveniente es que es difícil simular la entrada y salida de datos del microcontrolador. Tampoco cuentan con los posibles ruidos en las entradas, pero, al menos, permiten el paso físico de la implementación de un modo más seguro y menos costoso, puesto que se ahorra en grabaciones de chips para la prueba.

Placas de evaluación. Se trata de pequeños sistemas con un microcontrolador ya montado y que suelen conectarse a un PC desde el que se cargan los programas que se ejecutan en el microcontrolador. Las placas suelen incluir visualizadores LCD, teclados, LEDs, fácil acceso a los pines de E/S, etc. El sistema operativo de la placa recibe el nombre de programa monitor. El programa monitor de algunas placas de evaluación, aparte de permitir cargar programas y datos en la memoria del microcontrolador, puede permitir en cualquier momento realizar ejecución paso a paso, monitorizar el estado del microcontrolador o modificar los valores almacenados, los registros o en la memoria.

Emuladores en circuito. Se trata de un instrumento que se coloca entre el PC anfitrión y el zócalo de la tarjeta de circuito impreso donde se alojará el microcontrolador definitivo. El programa es ejecutado desde el PC, pero para la tarjeta de aplicación es como si lo hiciese el mismo microcontrolador que luego irá en el zócalo. Presenta en pantalla toda la información tal y como luego sucederá cuando se coloque la cápsula.

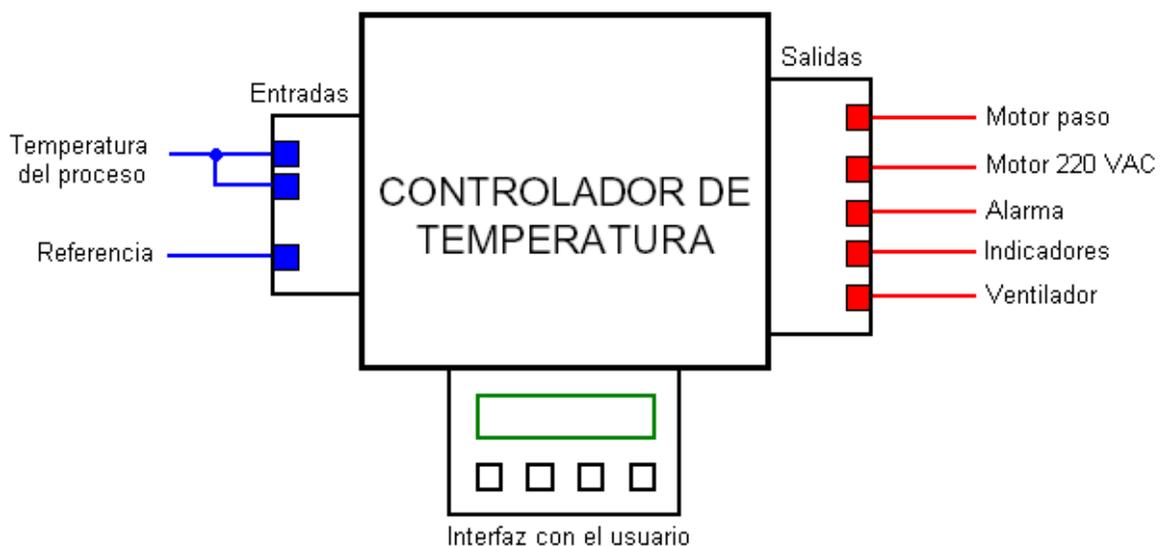
4. CONTROLADOR DE TEMPERATURA

4.1 DESCRIPCION GENERAL.

El controlador de temperatura desarrollado proporciona una señal de control que permite mantener la temperatura del proceso en un valor de referencia deseado. Para el procesamiento de la señal de control, el controlador recibe señales de dos sensores. Su interfaz con el usuario permite desplegar las variables de entrada, el reloj interno y comportamiento del proceso de acuerdo a su configuración. El controlador es un dispositivo programable que permite alcanzar una amplia variedad de requerimientos de una aplicación de control de temperatura.

El diagrama esquemático del controlador se muestra en la figura 4.1. Dicha figura muestra al controlador como una caja negra, provista de una interfaz de entrada/salida y una interfaz con el usuario.

Figura 4.1 Diagrama esquemático del controlador.



Como se ve en la figura 4.1, el controlador dispone de tres entradas, dos conectadas a sensores de temperatura, que proporcionan el valor de la salida de temperatura del proceso en puntos diferentes y otra, con el valor de referencia.

El controlador dispone, también, de cinco salidas, dos de las cuales son salidas a relé que pueden ser programadas como salidas de alarma y de enfriamiento. La temperatura más elevada dada por los sensores se puede ver por medio de LED's en una de las salidas. Otra de las salidas va a un motor de paso unipolar (actuador) y por último, se tiene una salida de potencia para el arranque de un motor de 2.5 HP(ventilador).

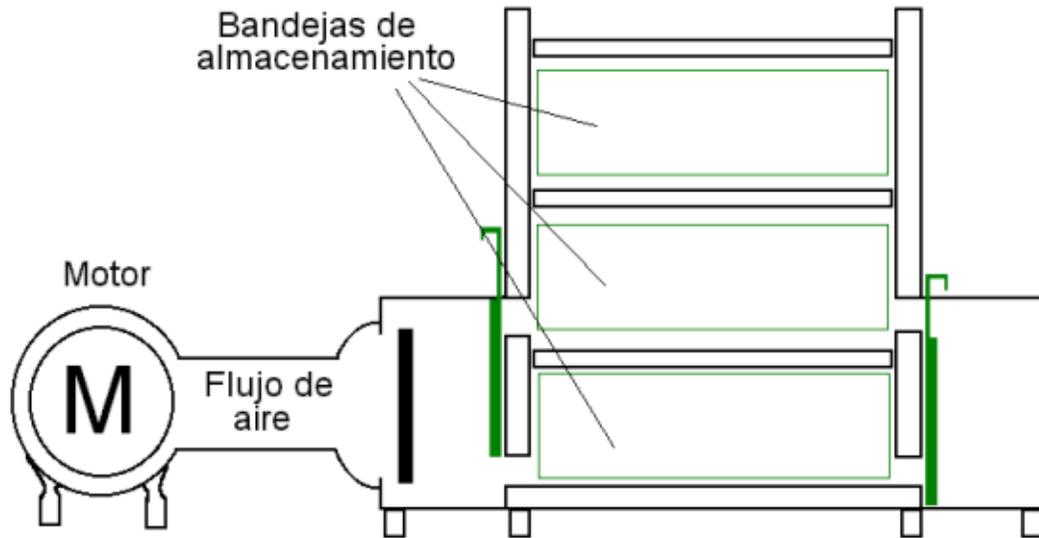
Finalmente, la interfaz con el usuario está provista de una LCD y de un teclado matricial que permiten el despliegue de las variables y la configuración del controlador.

4.2 OPCIONES DEL CONTROLADOR.

El controlador en principio realizará el control de temperatura en una secadora estática de granos, para esto el controlador ofrece un menú de opciones para la configuración del secado en la máquina. La figura 4.2 muestra un esquema básico de la secadora estática de granos a la cual se le hará control de temperatura.

El controlador puede operar en modo manual o bien en modo automático. El modo de operación puede ser elegido por el operador del sistema de control a través de la interfaz de usuario. En el modo automático se dispone de un algoritmo de control del tipo PI y un tipo de control *on-off*. La operación del controlador puede ser transferida al modo manual, permitiendo que el operador controle directamente la salida de la planta.

Figura 4.2 Esquema básico de una secadora estática de granos.



El controlador también puede ser programado para operar durante un período de tiempo definido por el usuario, haciendo un arranque y parada del proceso de forma automática. El sistema desarrollado brinda al operario información a través de una alarma de cuando el combustible es insuficiente para el incremento de la temperatura. La interfaz con el operador permite monitorear la temperatura y el de ejecución del proceso en forma simultánea.

4.3 MODOS DE CONTROL.

El controlador puede operar entre modo de control manual y modo de control automático. El modo de control automático permite la operación del controlador mediante un algoritmo de control del tipo *On/Off* o bien mediante un control del tipo PI. Ambos modos de control proporcionan la señal de control a través de la salida al motor de paso unipolar.

4.3.1 Control Manual. La operación de control manual proporciona una salida de monitoreo de la variable controlada dando al operario informes de su estado cuando sea

demasiado baja o demasiado alta. En este caso el control de la temperatura lo hace el operario directamente sobre la planta manipulando una cortina de flujo de aire frío. En este tipo de control también se el hace manejo del tiempo de operación de la máquina con encendido y apagado controlados.

4.3.2 Control On/Off. El controlador opera en control *On/Off* independientemente del algoritmo PID implementado en el mismo, la acción de control *On/Off* en este sistema se aplica con base en el error $e(t)$ entre la referencia y la variable del proceso, donde la amplitud del error configura la histéresis del controlador. Con este control, el proceso oscilará en forma sostenida alrededor del valor de la referencia. El período y amplitud de las oscilaciones están determinados por el valor de histéresis configurado y por la propia dinámica del proceso controlado.

4.3.3 Control PID. El algoritmo de control está definido por tres parámetros:

- La banda proporcional
- La constante de tiempo integral
- La constante de tiempo derivativa

que permiten la ejecución de la acción proporcional, integral y derivativa, respectivamente. En el modo de control proporcional (P) o proporcional derivativo (PD), con el propósito de eliminar el error en estado estacionario, se introduce un *offset* para la salida del controlador que constituye otro parámetro del controlador.

Banda Proporcional. La banda proporcional está definida como el rango en el que los cambios del proceso causan un cambio porcentual de 0 a 100% en la salida del controlador. La banda puede o no estar centrada alrededor del valor de la referencia, dependiendo de los requerimientos de estado estacionario del proceso. La banda puede ser corrida mediante un *offset* manual o por la acción integral (*reset* automático) para mantener el error en cero.

La banda proporcional debe ser ajustada para obtener la mejor respuesta a una perturbación reduciendo lo más posible el sobrepaso. Bajos valores de la banda proporcional (alta ganancia) producen una respuesta rápida del sistema de control a expensas de la estabilidad y de un sobrepaso considerable. Por su parte, altos valores de la banda proporcional producen una respuesta lenta con largos periodos de oscilaciones pobremente amortiguadas. Finalmente, una banda proporcional del 0.0% hace que el controlador trabaje en el modo de control *On/Off*.

Constante de tiempo Integral. La constante de tiempo integral es el tiempo, en segundos, que toma a la salida del proceso debida a sólo la acción integral en igualar a la salida del proceso debida sólo a la acción proporcional con un error de control constante. La combinación de estas dos acciones permite efectuar lo que se conoce como el “reset automático”, tal que, mientras exista un error constante, la acción integral repite la acción proporcional cada tiempo integral. De esta manera se produce un corrimiento de la banda proporcional tendiente a eliminar el error en estado estacionario. La acción integral cambia la señal de control para llevar la salida del proceso al valor de la referencia. Las constantes de tiempo integral muy rápidas permiten un acercamiento muy rápido de la salida a la referencia pero presentan problemas de fuertes transitorios y grandes sobrepasos, lo que se conoce como *sobrecompensación*. Por su parte, los tiempos integrales que son muy lentos (tiempos grandes) causan una respuesta lenta a los errores en estado estacionario. La acción integral puede ser deshabilitada poniendo el tiempo integral a cero.

Constante de tiempo Derivativa. El tiempo derivativo está definido como el tiempo, en segundos, en el cual la salida debida a sólo la acción proporcional es igual a la salida debida a la acción derivativa con un error de control rampa. De esta manera, mientras exista un error rampa, la acción derivativa es repetida por la acción proporcional cada tiempo derivativo.

La acción derivativa se usa para acortar el tiempo de respuesta del proceso y ayuda a estabilizar utilizando una acción predictiva basada en los cambios de la salida del proceso. El incremento del tiempo derivativo ayuda a estabilizar la respuesta; sin embargo

valores muy grandes en conjunción con el ruido de la señal de medición pueden causar oscilaciones de consideración pobremente amortiguadas. Por su parte, valores muy bajos del tiempo derivativo usualmente producen grandes sobrepasos y pérdida de estabilidad.

4.4 CONFIGURACION DE LOS PARÁMETROS DEL CONTROLADOR.

Para el trabajo del sistema en cualquiera de los modos de control es necesario configurar adecuadamente los parámetros del controlador. Estos básicamente son los siguientes:

- Valor de la temperatura de referencia
- Límites superior e inferior del valor de la referencia
- Histéresis de control
- Porcentaje de la banda proporcional
- Constante de tiempo integral
- Constante de tiempo derivativa

La temperatura de referencia es dada por el operario a la hora de configurar el controlador a través de la interfaz con el usuario.

Debido a que la secadora estática de granos a la cual se le aplica el control de temperatura trabaja con productos como café, trigo y maíz entre otros, con una temperatura máxima de trabajo de 85°C, se estipuló como límite superior para la referencia una temperatura de 99°C y un límite inferior de 20°C. El límite inferior para la temperatura de referencia se tomó cercano a la temperatura ambiente.

La histéresis o resolución de control se la fijo en 1.5°C con este valor se tiene una buena respuesta a temperaturas bajas y en temperaturas altas su oscilación es de baja frecuencia ya que los cambios en la variable del proceso no son muy rápidos. Además, los cambios de temperatura de este tipo no afectan considerablemente el secado del producto.

La acción de control derivativa es una acción de adelanto de la respuesta del controlador, con la ventaja de ser de previsión ante una entrada al controlador. La desventaja de esta acción es que amplifica las señales de ruido y puede provocar una saturación en el actuador. Por esto se ha fijado la constante de tiempo derivativo T_d a cero. Los parámetros K_p y T_i del control PI se configuraron en principio con base en la simulación del sistema a controlar realizada en LabVIEW.

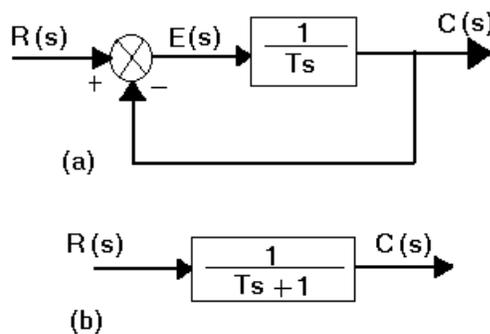
4.4.1 Análisis de la respuesta transitoria. Para la simulación se consideró el sistema como de primer orden, la figura 4.3(a) muestra el diagrama de bloques de un sistema de primer orden. Físicamente este sistema representa un sistema térmico, un circuito RC o algo similar. Otra forma de representar el sistema puede verse como en la figura 4.3(b). La relación entrada / salida se obtiene mediante:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (4.1)$$

Ahora se analizará la respuesta del sistema ante una entrada escalón unitario, rampa unitaria e impulso unitario, suponiendo condiciones iniciales cero. Para cada uno de los sistemas de primer orden su respuesta tiene interpretación física diferente.

Figura 4.3 (a) Diagrama de bloques de un sistema de primer orden.

(b) Diagrama de bloques simplificado.



Respuesta a escalón unitario. Dado que la transformada de Laplace de la función escalón es $1/s$, sustituyendo $R(s) = 1/s$ en la ecuación (4.1) se tiene:

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \frac{1}{s} \quad (4.2)$$

Al expandir la ecuación (4.2) en fracciones parciales queda:

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + (1/T)} \quad (4.3)$$

Tomando la transformada inversa de Laplace de (4.3) se obtiene:

$$c(t) = 1 - e^{-t/T} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (4.4)$$

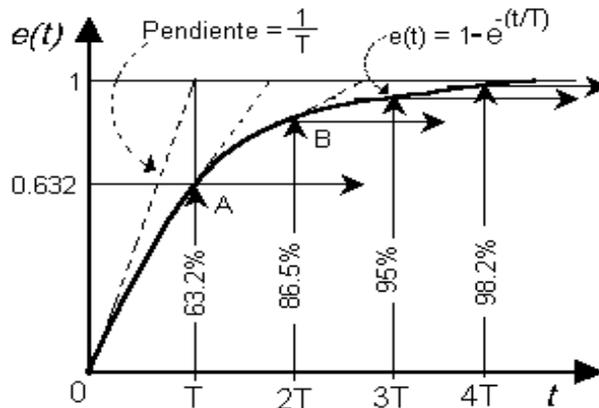
En la ecuación (4.4) se tiene que la salida en el inicio es cero y al final se vuelve unitaria, cuando $t = T$ se ve que $c = 0.632$ o, lo que es lo mismo, $c(t)$ alcanza el 63.2% de su cambio total.

Se observa que cuando más pequeña sea la constante de tiempo T , más rápida es la respuesta del sistema. Otra característica importante de la curva de respuesta exponencial es que la pendiente de la línea tangente en $t = 0$, es $1/T$ dado que:

$$\left. \frac{dc(t)}{dt} = \frac{1}{T} e^{-t/T} \right|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (4.5)$$

La respuesta alcanzaría el valor final en $t = T$ si mantuviera su velocidad de respuesta inicial. A partir de la ecuación (4.5) se ve que la pendiente de la curva de respuesta $c(t)$ disminuye en forma monotonita de $1/T$ en $t = 0$ a cero cuando $t \rightarrow \infty$. La respuesta exponencial $c(t)$ obtenida a partir de la ecuación (4.4) se muestra en la figura 4.4.

Figura 4.4 Curva de respuesta exponencial.



Respuesta a rampa unitaria. La transformada de Laplace de la función rampa unitaria es $1/s^2$, se tiene para la salida del sistema de la figura 4.3(a) la relación:

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \frac{1}{s^2} \quad (4.6)$$

Expandiendo la ecuación (4.6) en fracciones parciales queda:

$$C(s) = \frac{1}{s^2} - \frac{T}{s} + \frac{T^2}{Ts + 1} \quad (4.7)$$

Tomando la transformada inversa de Laplace de la ecuación (4.7) se obtiene:

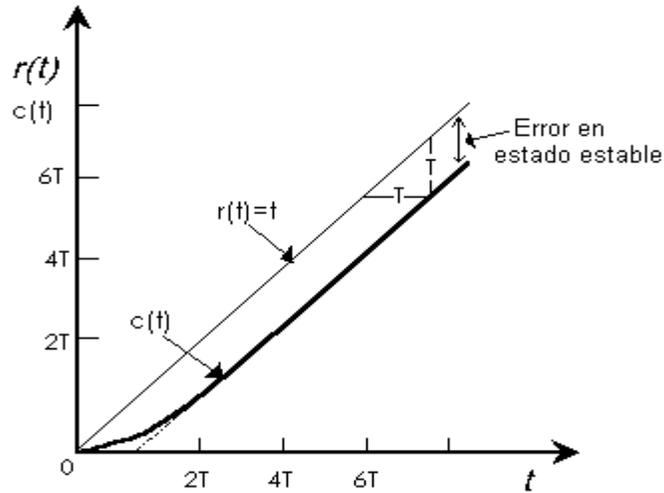
$$c(t) = t - T + Te^{-t/T} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (4.8)$$

La señal de error $e(t)$ será:

$$e(t) = r(t) - c(t) = T(1 - e^{-t/T}) \quad (4.9)$$

La entrada rampa unitaria y la salida del sistema se muestran en la figura 4.5. El error después de la entrada rampa unitaria es igual a T para una t suficientemente grande. Entre más pequeña sea la constante de tiempo T , más pequeño es el error en estado estable luego de la entrada de rampa unitaria.

Figura 4.5 Salida del sistema ante una entrada rampa unitaria.



Respuesta a impulso unitario. La entrada impulso unitario, tiene $R(s) = 1$ y la salida del sistema de la figura 4.3(a) será:

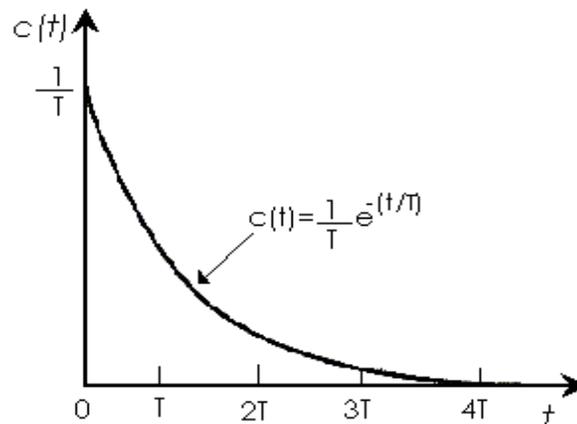
$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (4.10)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace a la ecuación (4.10) se tiene:

$$c(t) = \frac{1}{T} e^{-t/T} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (4.4.11)$$

La figura 4.6 muestra la respuesta obtenida mediante la ecuación (4.11).

Figura 4.6 Respuesta a impulso unitario.



4.4.2 Simulación de control PI. Se desarrolló un programa que puede simular el comportamiento de un sistema de primer orden, que corre en ambiente gráfico y permite guardar el modelo simulado.

La herramienta utilizada para este fin fue LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) que es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. LabVIEW permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basada en software. Se puede diseñar especificando un sistema funcional, un diagrama de bloques o una notación de diseño de ingeniería. LabVIEW es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación como Matlab. Tiene la ventaja de que permite una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos.

La filosofía de programación del lenguaje gráfico, toma como base la estructura de un instrumento tradicional, el cual cuenta con un *panel frontal* (controles, botones e interruptores) para configurar el proceso de simulación e indicadores para desplegar el valor simulado.

Un Instrumento Virtual (VI) es un programa diseñado en LabVIEW, en este caso, para que tenga las mismas características de un instrumento tradicional. En particular, un VI tiene un *panel frontal* desplegado en la pantalla del computador y opera mediante el teclado o el *mouse*; el programa o código fuente, representa el ensamble de componentes electrónicos que desarrollan la función del VI; en LabVIEW es llamado *Diagrama de Bloques*, se construye uniendo bloques (funciones) mediante líneas que llevan el flujo de datos.

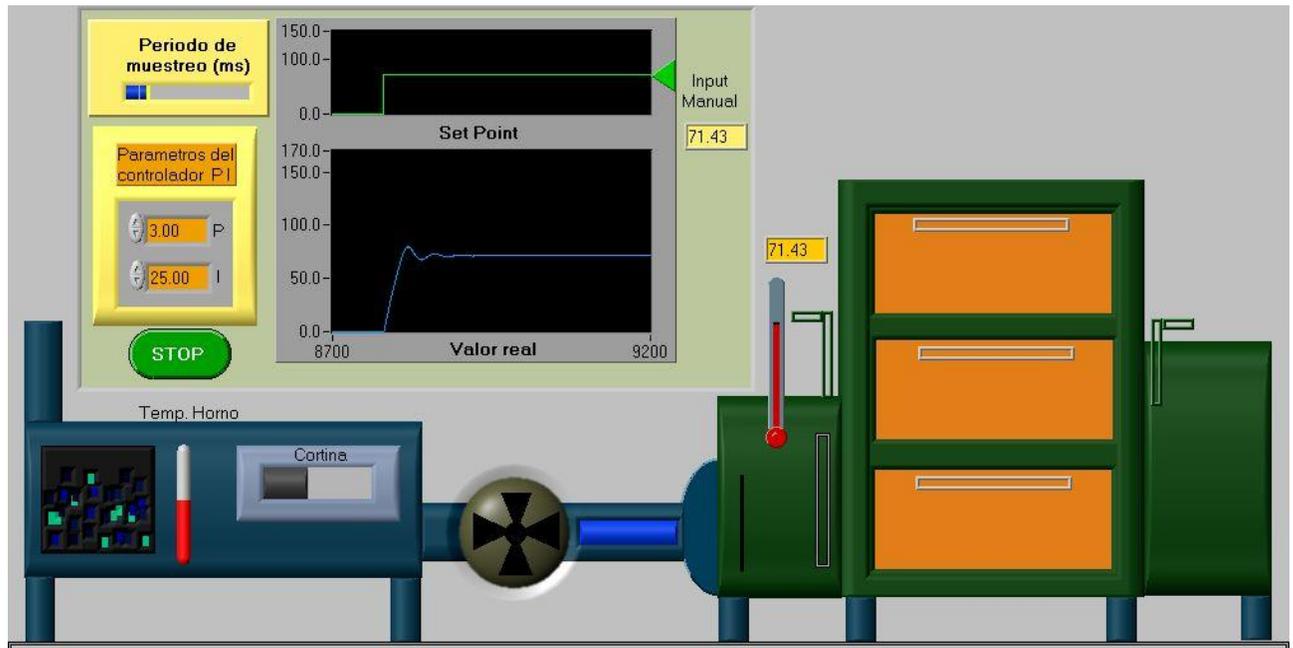
El programa diseñado para la simulación de un controlador PI para un sistema de primer orden tiene las siguiente características:

- Proporcionar una interfaz amigable al usuario para mostrar la simulación y la evolución de las variables del sistema.

- Muestra gráficamente la evolución de las variables temperatura de referencia, temperatura del proceso y comportamiento del actuador.
- Selección del período de muestreo de los datos a simular.
- Selección de los parámetros del controlador, el tiempo de integración T_i y la constante de proporcionalidad K_p .

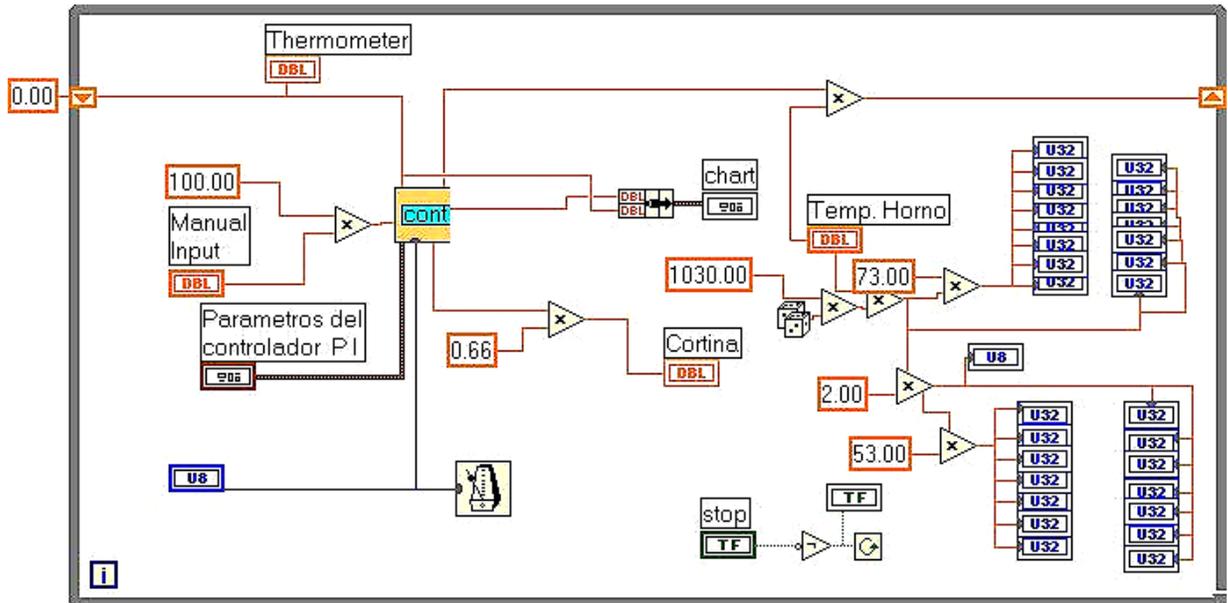
El panel frontal principal diseñado para la simulación del sistema se muestra en la figura 4.7. Este proporciona una interfaz gráfica amigable para el usuario en el cual se muestran los resultados de la simulación y su evolución en el tiempo. Adicionalmente cuenta con un control de tipo deslizable para personalizar el tiempo de muestreo.

Figura 4.7 Panel frontal de la simulación de control PI de un sistema de primer orden.



La figura 4.8 muestra el diagrama de bloques del panel principal que corresponde al código fuente del dicho panel en donde se observa que el programa emplea una estructura llamada *while loop* para realizar las tareas de simulación y visualización de las variables del proceso, cada una de ellas implementada mediante una función identificada con un SubVI (Subinstrumento Virtual). Cada SubVI contiene un diagrama de bloques correspondiente a su implementación.

Figura 4.8 Diagrama de bloques del control PI de un sistema de primer orden.

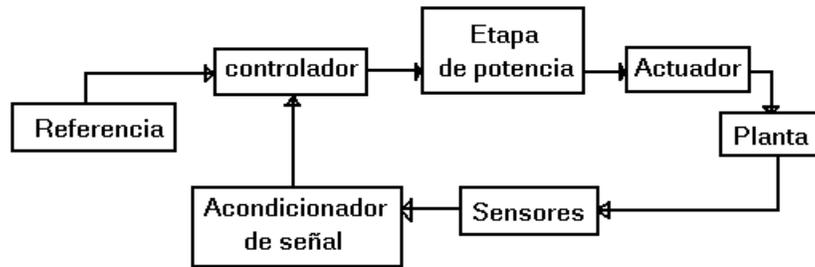


Haciendo uso del método Harriot que es una técnica a malla cerrada y estudiando la respuesta del sistema ante un escalón unitario, una rampa unitaria e impulso unitario se concluyó que los valores con los que se tiene una mejor respuesta a la dinámica del sistema según la simulación son $T_i = 25$ y $K_p = 3$, esto con un período de muestreo de 10 ms.

4.5 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL CONTROLADOR.

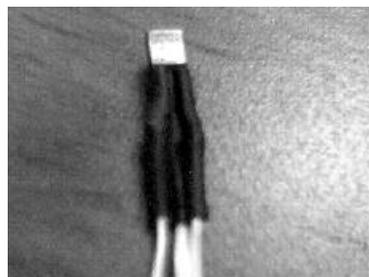
Ahora se analizarán las diferentes etapas en el diseño del controlador de temperatura programable. En la figura 4.9 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control.

Figura 4.9 Diagrama de bloques del sistema de control.

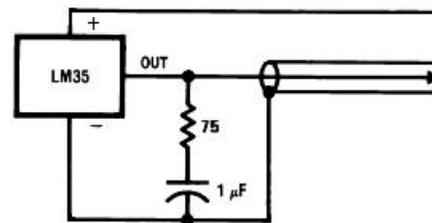


4.5.1 Sensores. Para realizar el monitoreo de la temperatura del proceso de secado, se usó el sensor de temperatura LM35, el cual se muestra en la figura 4.10(a), cuyo rango de operación es de -55°C hasta $+150^{\circ}\text{C}$, posee calibración directa para grados Celsius, una respuesta de factor lineal de $+10.0\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ y opera con una alimentación desde 4 hasta 30 voltios. En la figura 4.10(b) se ve el esquema del sensor LM35 en el monitoreo de temperatura.

Figura 4.10 (a) Sensor de temperatura LM35. (b) Esquema del sensor en la aplicación.



(a)



(b)

Tomada de *National Semiconductor, Data sheets LM35*.

4.5.2 Acondicionamiento de señal. Una de las etapas consiste en el acondicionamiento de la señal proveniente de los sensores, el objetivo de ésta es dar a la señal el formato adecuado para que la siguiente etapa pueda realizar su función. No todos los sensores tienen una etapa de acondicionamiento de la señal pues esta depende de las características eléctricas del mismo.

En el caso del LM35z el voltaje de respuesta es directamente proporcional a la temperatura que se encuentra sensando, por lo que, solo se requiere amplificar la señal en un factor de 5 ya que en el sensor la correspondencia es así:

$$\begin{aligned} 0 \text{ voltios} &\rightarrow 0^{\circ}\text{C} \\ 1 \text{ voltio} &\rightarrow 100^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

de esta manera, 5 voltios representaran 100°C , que es el limite máximo para el trabajo de la planta. Para la amplificación se hizo uso del amplificador operacional LT082 que se muestra esquemáticamente en la figura 4.11. Además se pasa la señal amplificada por un filtro pasabajas pasivo ($f_c = 79.6 \text{ Hz}$) para eliminar las frecuencias altas. Después de esto la señal esta lista para ser leída por el conversor del controlador.

La figura 4.12 muestra el sistema de los sensores, la etapa de amplificación y filtrado que entra al microcontrolador PIC16F877 para su posterior procesamiento.

Figura 4.11 Diagrama del acondicionamiento de señal.

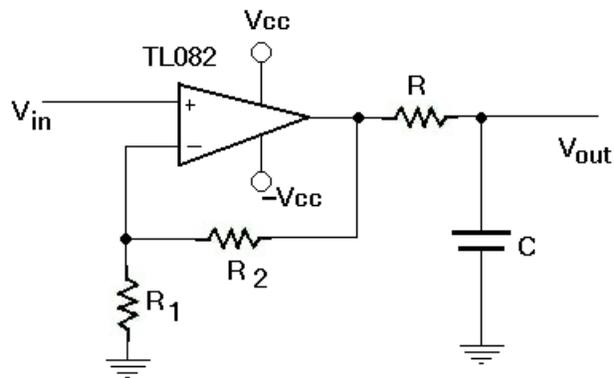
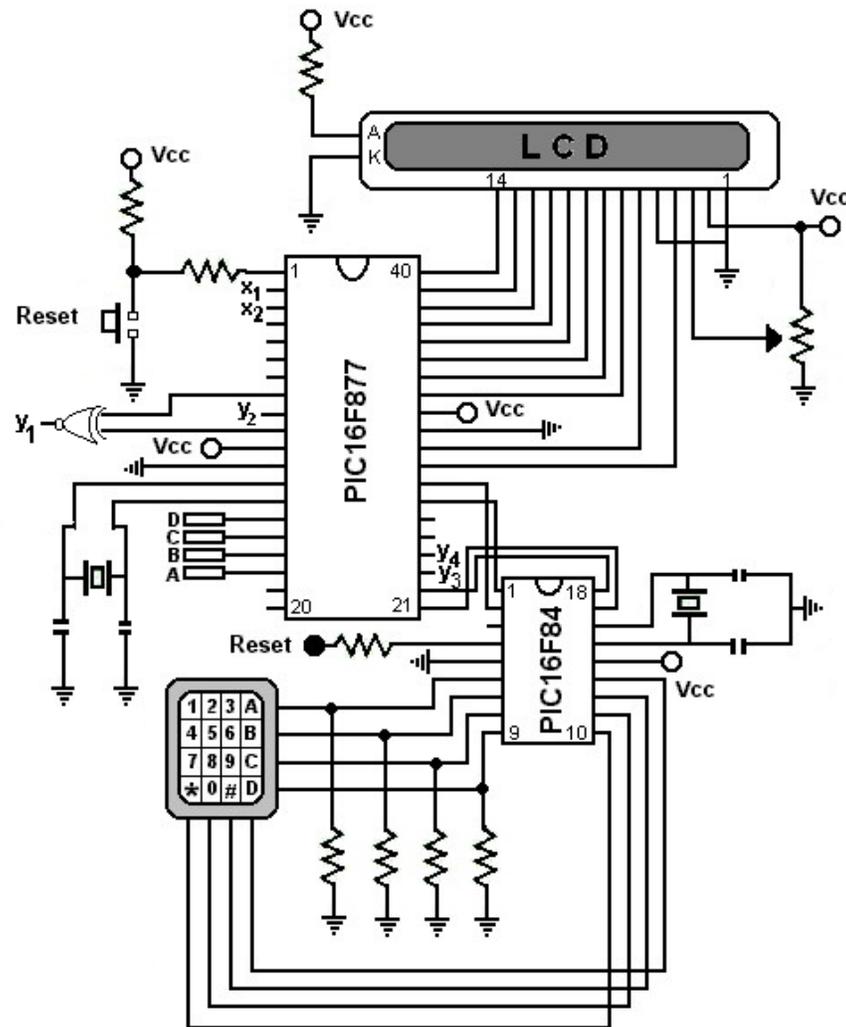


Figura 4.13 Diagrama del controlador del sistema de control.



4.5.4 Etapa de potencia y actuador. El controlador de la figura 4.13 entrega señales de baja potencia, lo que hace necesaria una etapa que permita accionar dispositivos que manejan valores de corriente y voltajes más altos. Para las salidas del microcontrolador a dispositivos como el motor de paso unipolar de 12 voltios, el motor de 220 voltios AC y la alarma de 12 voltios, se hizo necesaria la utilización de un optoacoplador, un tiristor, arreglos *Darlington*, diodos y resistencias de potencia.

software debe ser altamente confiable, muy eficiente, compacto y preciso cuando maneja entradas y salidas que dependen del tiempo.

La programación embebida agrega entradas del mundo real al espacio del *software*, además de agregar procesamiento en tiempo real. Para la realización de este *software* se utilizan lenguajes de bajo nivel (ensamblador), que son muy dependientes del tipo de procesador en el que se ejecutan. El *software* embebido determina los parámetros de entrada en la ejecución según se necesitan, es por eso que al ser tan dependientes del *hardware* pueden ser tan rápidos, ya que no tienen que implementar interfaces complicadas que retardan la ejecución como en los computadores personales.

En este caso la programación embebida del microcontrolador se trata del código que se realizó para implementar los algoritmos de control, la interfaz con el usuario, la adquisición de datos y otras rutinas utilizadas. La programación fue realizada en ensamblador utilizando el conjunto de instrucciones para los microcontroladores Microchip.

4.6.1 Programa de configuración del controlador. Una vez que el microcontrolador es encendido o reinicializado el primer paso que realiza es poner en cero de los registros que se usan. Después se definen los *pin*s de entrada análoga que son utilizados para la conversión análoga-digital, los *pin*s para la comunicación con la pantalla de cristal líquido, los *pin*s de la comunicación en paralelo con el otro microcontrolador, los *pin*s para las salidas al actuador, la alarma, los indicadores y el motor de 2.5 HP. (Véase el Anexo A).

Después de la configuración de los puertos el sistema configura la pantalla de cristal líquido y comienza a mostrar mensajes en esta y a solicitar información que el usuario ingrese por el teclado matricial, manejado por un PIC16F874 y que entrega en forma paralela el valor tecleado al PIC16F877 para almacenarlo e interpretarlo. Cuando el operario selecciona cada una de las opciones, lo que internamente el microcontrolador hace es configurar un registro de control, el cual dictaminará el comportamiento del controlador (véase el Anexo B). El registro de control *R_control* se describe en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Descripción de registro R_control.

| R_control | | | | | | | |
|-----------|--|----|----|----|----|----|----|
| R7 | R6 | R5 | R4 | R3 | R2 | R1 | R0 |
| R0 | Si es 0 el tipo de combustible es gas | | | | | | |
| | Si es 1 el tipo de combustible es carbón | | | | | | |
| R1 | Si es 0 el tipo de control es manual | | | | | | |
| | Si es 1 el tipo de control es automático | | | | | | |
| R2 | Si es 0 el tipo de control automático es <i>On – Off</i> | | | | | | |
| | Si es 1 el tipo de control automático es PI | | | | | | |
| R3 | Si es 0 el e(t) es negativo | | | | | | |
| | Si es 1 el e(t) es positivo | | | | | | |
| R4 | Si es 0 el signo de la integral es negativo | | | | | | |
| | Si es 1 el signo de la integral es positivo | | | | | | |
| R5 | Si es 0 el giro del motor es en sentido antihorario | | | | | | |
| | Si es 1 el giro del motor es en sentido horario | | | | | | |
| R6 | Si es 0 el segundero del reloj esta apagado | | | | | | |
| | Si es 1 el segundero del reloj esta encendido | | | | | | |
| R7 | Si es 0 el reloj esta contando horas | | | | | | |
| | Si es 1 el reloj esta contando minutos | | | | | | |

La interacción con el operario el controlador la hace por medio de mensajes a través de una LCD y un teclado, en el programa los mensajes son denominados mensaje1, mensaje2, mensaje3, etc. En la tabla 4.2 se muestra el contenido de cada uno de estos mensajes.

Tabla 4.2 Contenido de los mensajes para la interfaz con el usuario.

| MENSAJES | |
|----------|----------------------------|
| Mensaje1 | Controlador de temperatura |
| Mensaje2 | Configurar la secadora |

| | |
|-----------|------------------------------|
| Mensaje3 | Combustible para el horno |
| Mensaje4 | 1. Gas 2. Carbón |
| Mensaje5 | Control A.Manual B.Auto |
| Mensaje6 | Secadora |
| Mensaje7 | Después del valor presione # |
| Mensaje8 | Temperatura de secado: |
| Mensaje9 | Tiempo de secado: Hor Min |
| Mensaje10 | Hacer cambios? 1.Si 2.No |
| Mensaje11 | A. Temperatura B. Reloj |
| Mensaje12 | Inicializando |
| Mensaje13 | Finalizando |
| Mensaje14 | . °C : |
| Mensaje15 | ¡ Error ¡ |
| Mensaje16 | > Atla < |
| Mensaje17 | < Baja > |
| Mensaje18 | Apagar |
| Mensaje19 | 1. PID 2. ON – OFF |

Las figuras 4.15(a), 4.15(b) y 4.15(c) muestran el diagrama de flujo de la rutina del inicio y configuración del controlador por medio de la interfaz con el usuario.

Figura 4.15 (a) Diagrama de flujo de la rutina de inicio y configuración del controlador. (Primera parte)

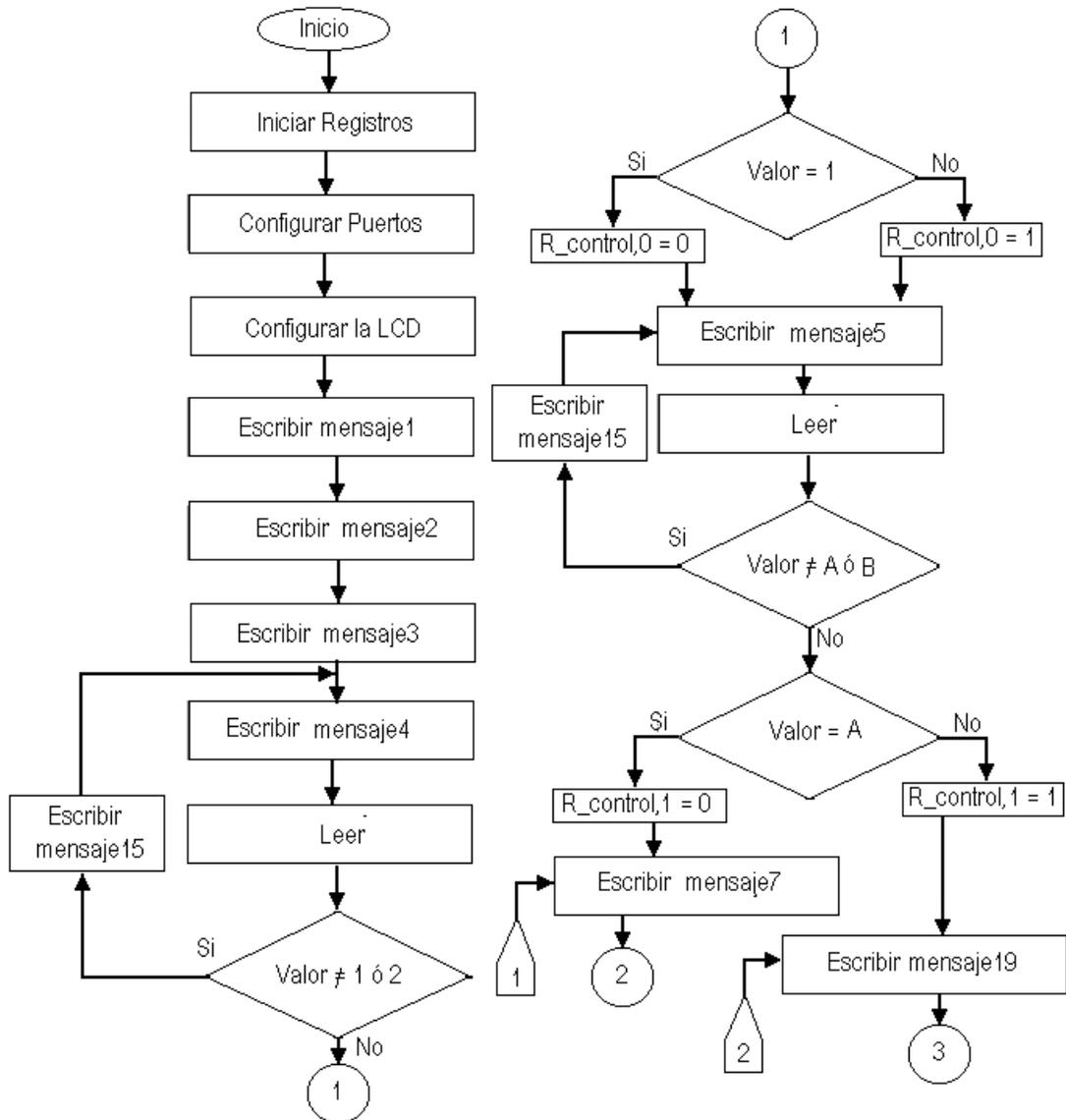


Figura 4.15 (b) Diagrama de flujo de la rutina de inicio y configuración del controlador. (Segunda parte)

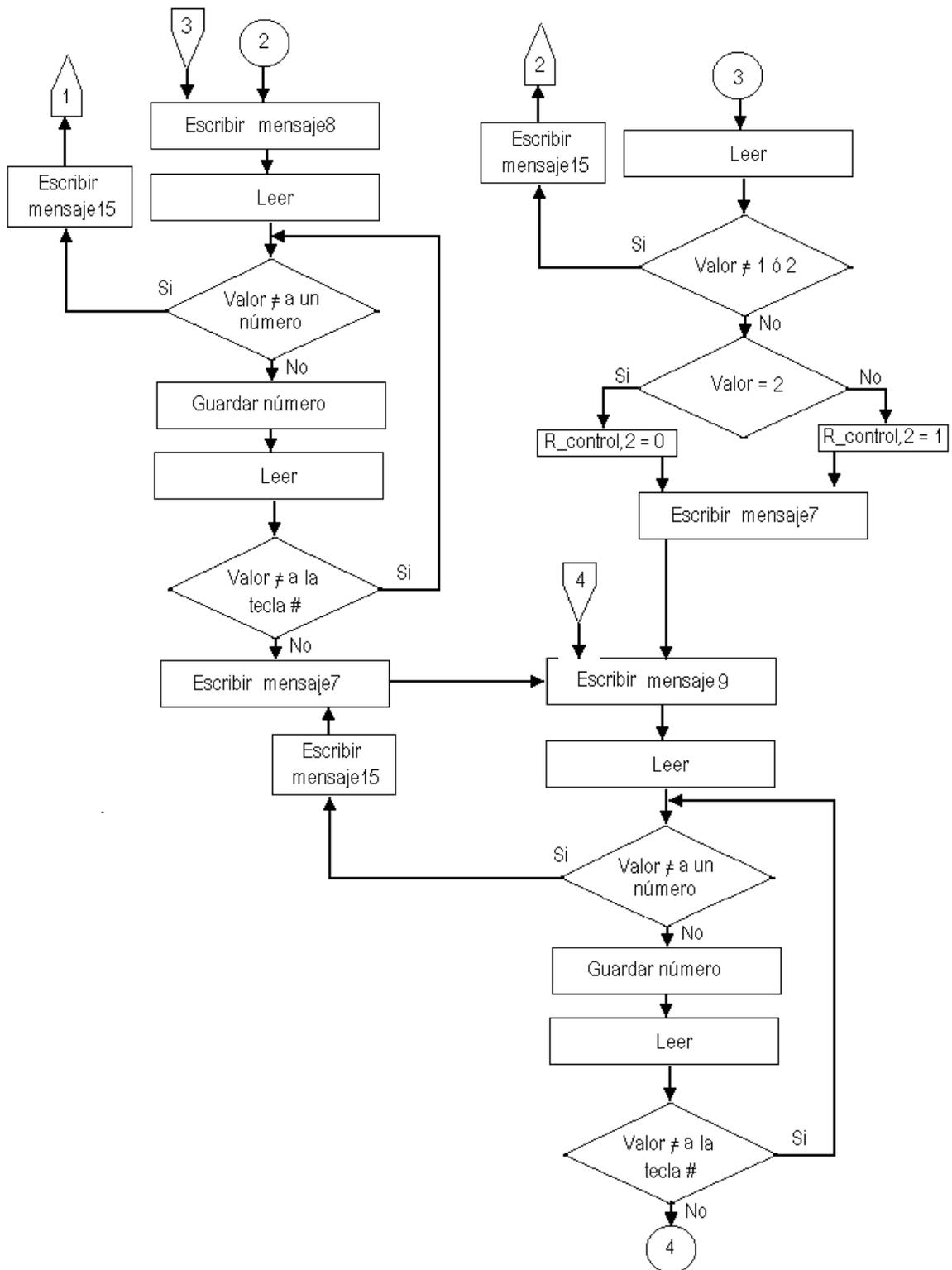
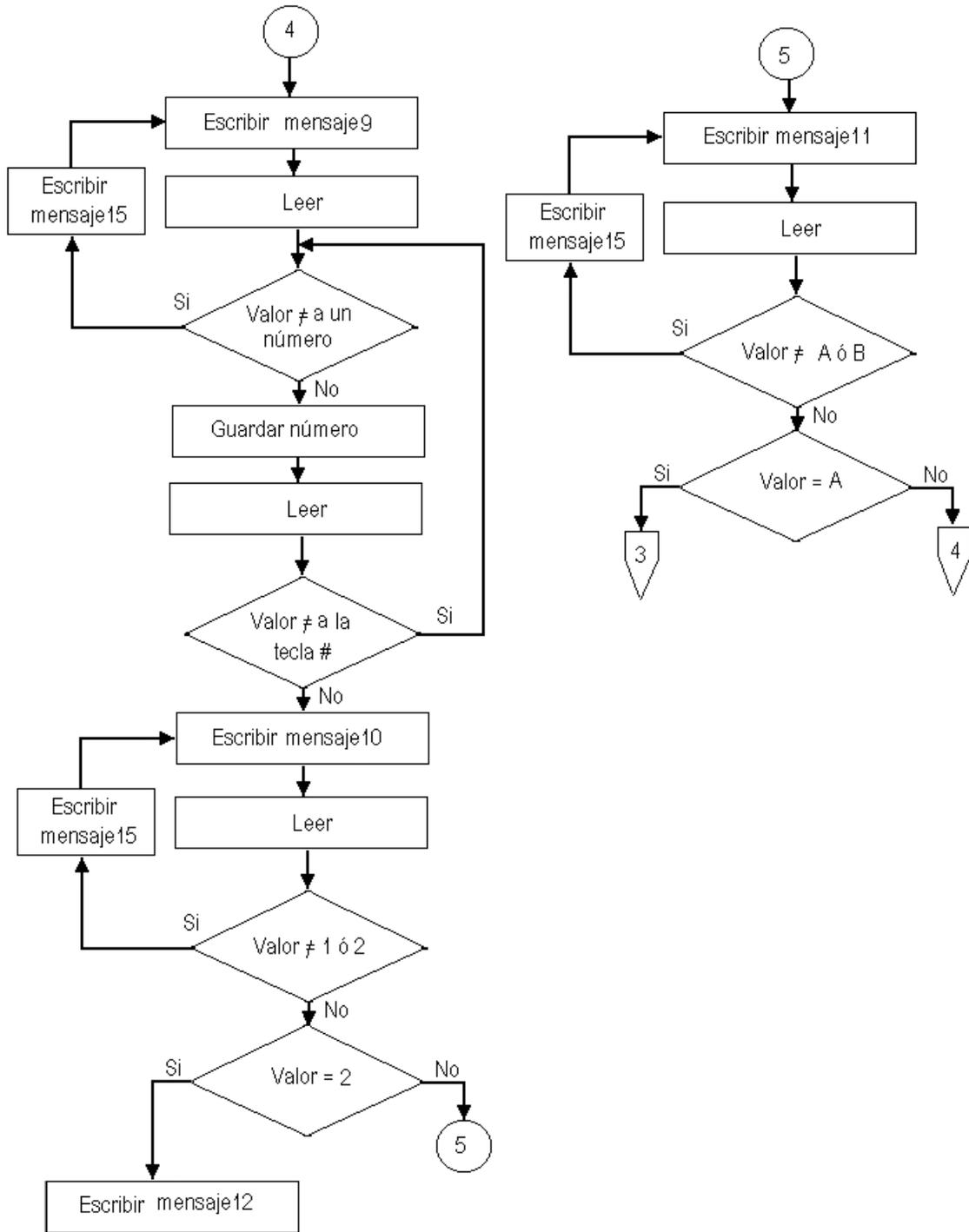


Figura 4.15 (c) Diagrama de flujo de la rutina de inicio y configuración del controlador. (Tercera parte)

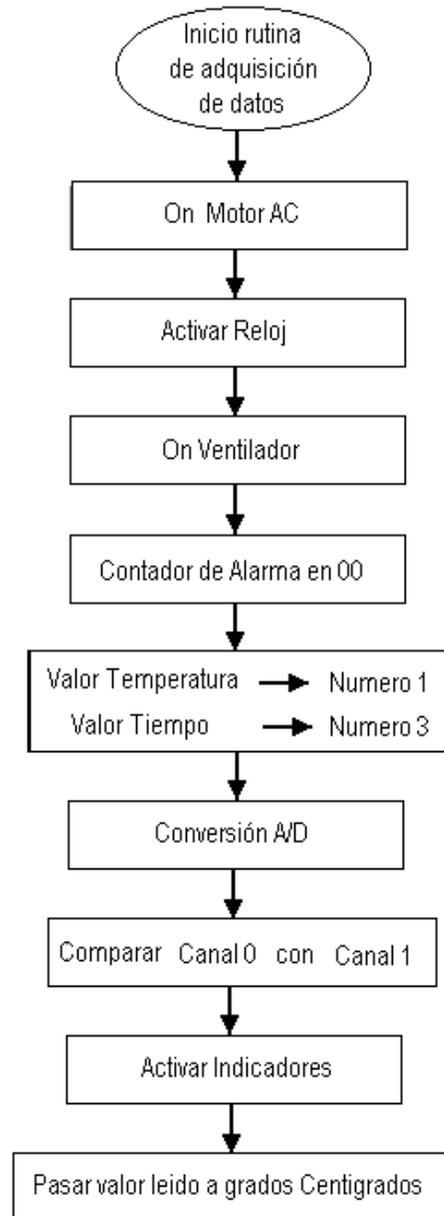


4.6.2 Programa de Adquisición de datos. La conversión análoga-digital tiene como objetivo tener una palabra digital que represente un valor de voltaje en un instante del tiempo.

La variación de la temperatura del sensor hace que el voltaje a la salida de este cambie, este voltaje se acondiciona y se ajusta a un valor entre cero y cinco voltios, el cual entra por la terminal de conversión análoga-digital del microcontrolador. El microcontrolador convierte el voltaje en una palabra de diez *bits*, es decir que hay 1024 valores posibles entre la señal de cero y la de cinco voltios. En el microcontrolador el resultado de la conversión de cada canal es comparada y el valor más alto es transformado a su equivalente en grados centígrados y se envía una señal a través de un puerto que indica qué canal tiene el valor más alto, luego el dato adquirido pasa por la acción de control y es mostrado en la LCD. (Véase el Anexo C)

La figura 4.16 presenta el diagrama de flujo de la rutina de adquisición y transformación de los datos. La rutina mostrada en la figura 4.16 tiene además un proceso de inicialización, donde el controlador comienza a operar, en la inicialización se tiene el encendido del motor de AC, el reloj del proceso se activa, el contador de la alarma se reinicia, el ventilador se enciende y los valores configurados de temperatura y tiempo de operación de la máquina son cargados al sistema.

Figura 4.16 Diagrama de flujo de la rutina de inicialización y adquisición de datos.

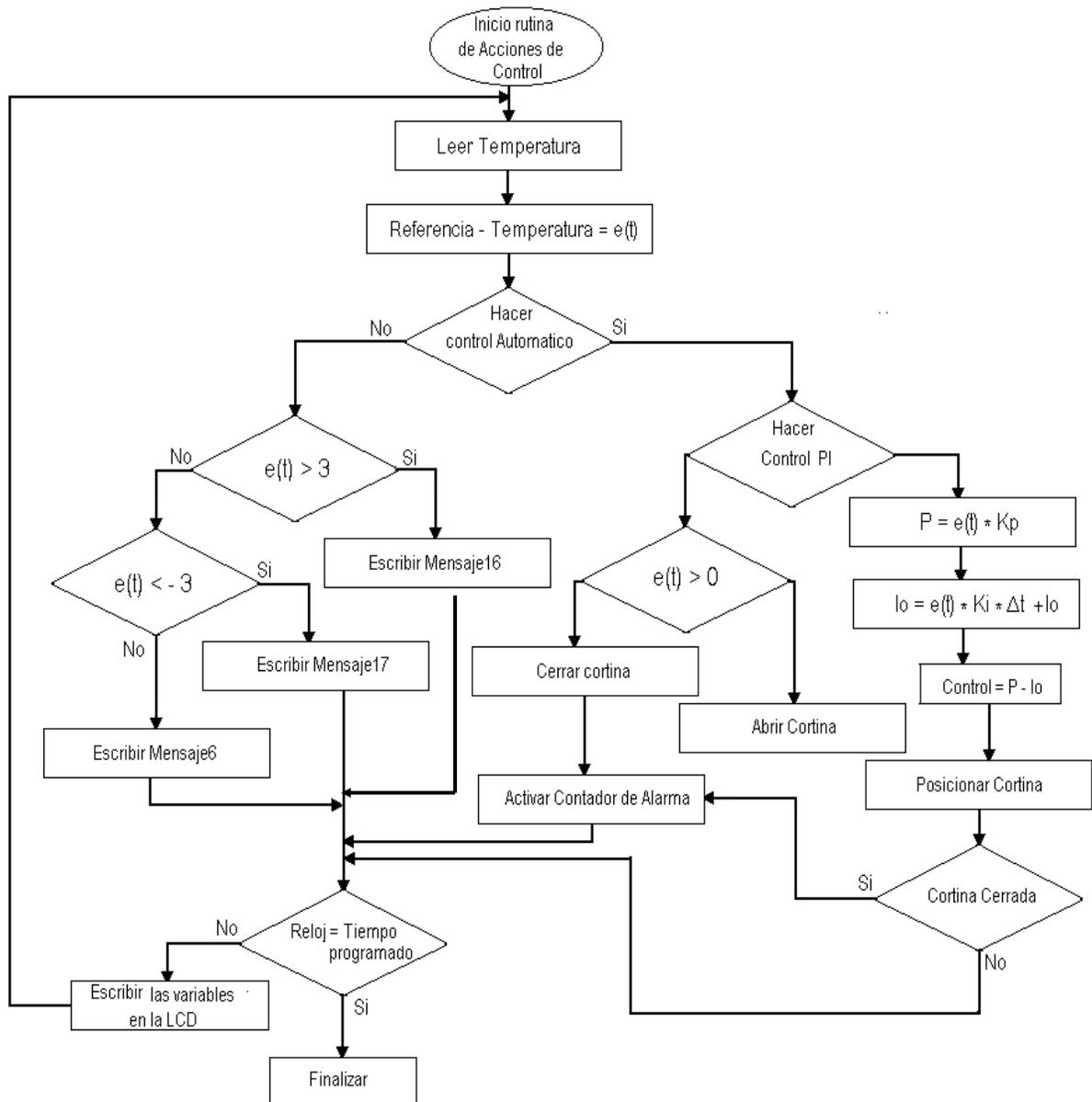


4.6.3 Programa para la implementación de las acciones de control. El controlador posee tres acciones básicas de control; manual, *On – Off* y PI. El tipo de control es seleccionado por el operario al momento de configurar el controlador. Al configurar el controlador lo que internamente se hace es escribir en el registro R_control que se encarga de direccionar el tipo de control a realizar.

La acción de control manual lo que hace es monitorear la temperatura e informar si está alta o baja con respecto a la referencia. Además ofrece la opción de apagado automático al concluir el tiempo de operación especificado por el usuario. La acción de control *On – Off* lo que hace es abrir la cortina de aire si la temperatura esta por encima de la referencia o en caso contrario cerrarla, este tipo de control se hizo con una histéresis aproximada de 2°C. En el caso de falta de combustible se acciona la alarma, este control posee las demás opciones del control manual. Para la acción de control PI se desarrolló una rutina basándose en la simulación hecha en LabVIEW del comportamiento del sistema, según la simulación los valores más adecuados para el controlador PI son $K_p = 4$ y $T_i = 25$. Con este tipo de control se eliminan las oscilaciones del control *On – Off* y se minimiza el error. (Véase el Anexo D)

El diagrama de la figura 4.17 es la rutina del programa que realiza las acciones de control en el microcontrolador, además se tiene la activación del contador de la alarma, que cuenta el tiempo durante el cual la cortina esta cerrada, y si es superior al tiempo promedio de incremento de la temperatura con la cortina cerrada, se dispara la alarma de insuficiencia de combustible para el incremento de la temperatura. También se verifica periódicamente el tiempo de operación de la máquina, cuando es igual al tiempo configurado por el usuario, el sistema finaliza sus tareas. En la finalización lo que se hace es desconectar el motor de AC, terminar la adquisición de la temperatura, abrir la cortina, poner el sistema en bajo consumo de energía y desplegar en la LCD un mensaje de apagar. (Véase Anexo E)

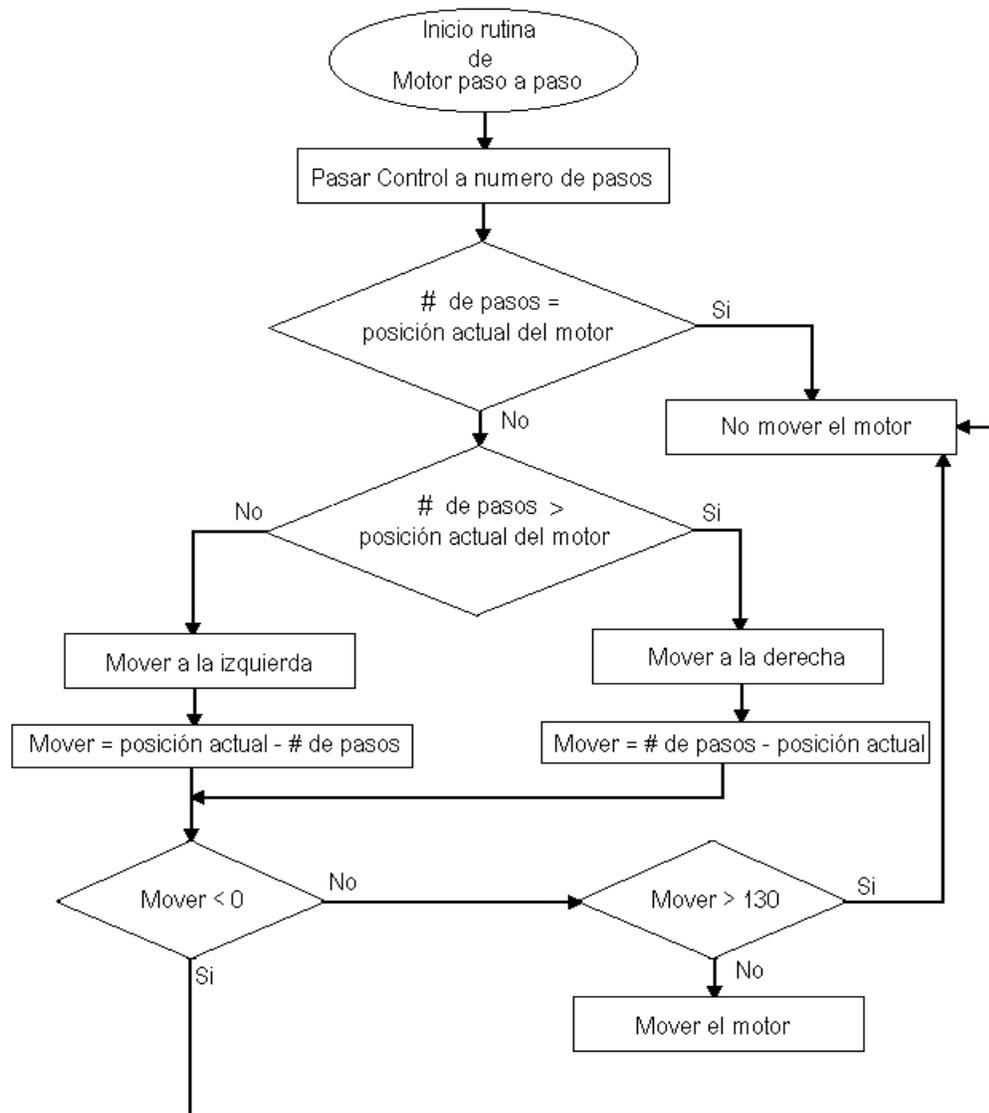
Figura 4.17 Diagrama de flujo de la rutina de las acciones de control.



4.6.4 Programa para el posicionamiento de la cortina. En esta planta la variación de la temperatura se hace mediante la entrada de aire frío a través de una cortina, para el movimiento de dicha cortina se hizo un acople mecánico entre la cortina y un motor de paso unipolar de 12 Voltios por medio de piñones en una caja reductora de velocidad.

Experimentalmente se encontró que el número de pasos entre la cortina abierta y la cortina cerrada es de 130 aproximadamente. Otra característica en el diseño es que el controlador partiría de la premisa de que la cortina estará siempre abierta al iniciar el procedimiento, y al finalizar el control de temperatura la dejara en la misma posición. Con estas condiciones la salida del controlador se convertirá en pasos del motor y dirección de los mismos, los cuales se aplican dentro del rango de pasos máximos (130). Lo anterior se muestra en el diagrama de flujo del manejo del motor de paso en la figura 4.18. (Véase Anexo F)

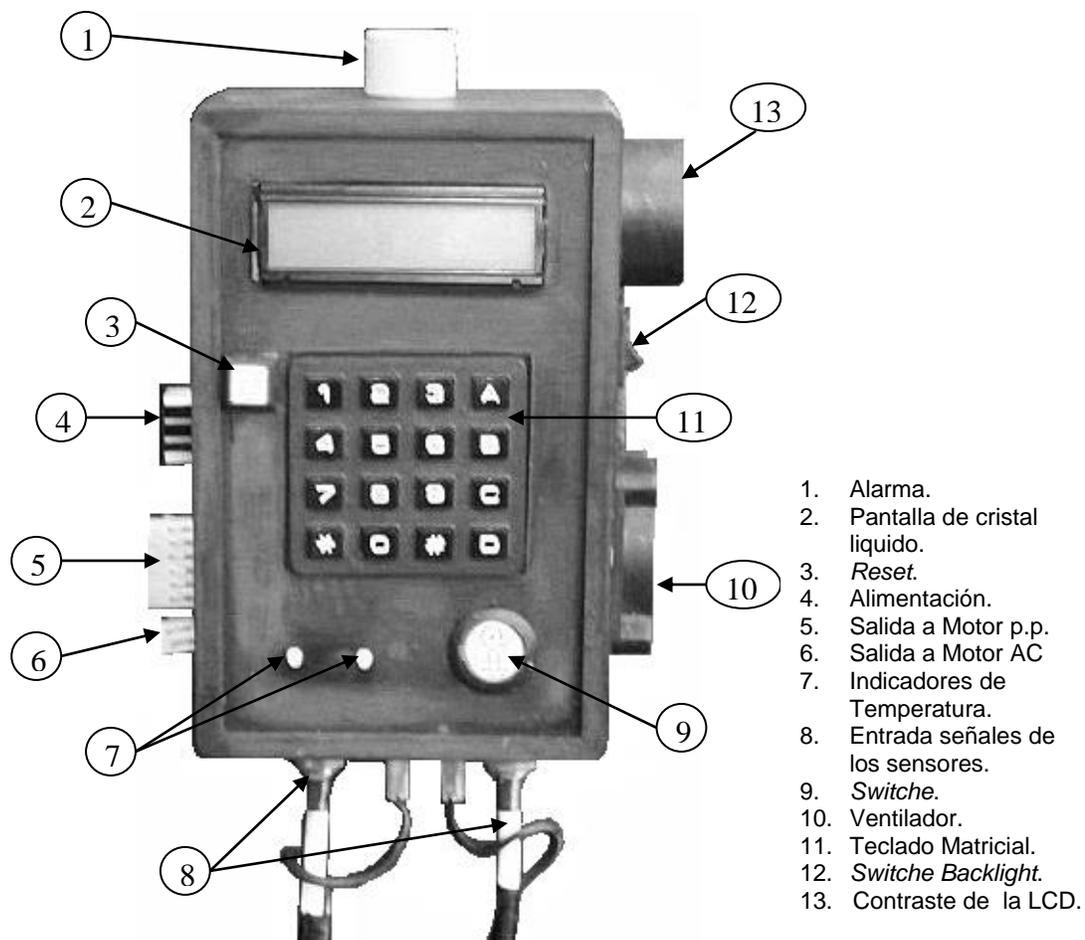
Figura 4.18 Diagrama de flujo del programa de manejo del motor de paso.



5. INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR EN LA PLANTA

El sistema de la figura 4.14 se implementó en cuatro tarjetas impresas distribuidas de acuerdo a su funcionalidad: el cerebro del controlador, la amplificación y acondicionamiento de las señales, la etapa de potencia para los dispositivos de 12 voltios y la etapa de potencia para el arranque del motor de AC. Estas cuatro tarjetas trabajan en el interior del controlador de temperatura programable que se diseñó. Este se describe en la figura 5.1.

Figura 5.1 Controlador de temperatura programable.



Como se ve, el controlador es lo suficientemente compacto y los periféricos del mismo son de fácil instalación debido a que cada uno de ellos posee un conector único y diferente para su conexión. En la figura 5.2 se muestra la secadora estática de granos con el controlador de temperatura programable instalado. En la parte posterior del horno se encuentra el actuador, que es quien se encarga de realizar la acción de control sobre la planta, el actuador esta constituido por un motor de paso unipolar de 12 voltios acoplado a un brazo mecánico por medio de una caja reductora de velocidad y esto en conjunto, controla el posicionamiento de una cortina que permite la entrada de aire frío al interior del horno, este mecanismo se muestra en la figura 5.3.

Figura 5.2 Secadora estática de granos con controlador de temperatura.



Tanto controlador, sensores y actuador fueron instalados de tal forma que permanezcan fijos en la planta, su interconexión o cableado es la parte que se puede remover en caso de ser necesario un traslado de la máquina o al momento del mantenimiento.

Figura 5.3 Mecanismo del Actuador.



Después de instalar el mecanismo en la planta se procedió a hacer pruebas de funcionamiento de la máquina, como inconveniente se presentó el hecho de hacer las pruebas con la máquina vacía ya que en la zona no es temporada de cosecha. Las acciones de control manual y *on-off* no mostraron problemas de desempeño, pero en el control PID fue necesario incrementar la velocidad de respuesta del motor puesto que a temperaturas mayores a 60°C su respuesta era un poco lenta, esto se hizo reduciendo el retardo introducido entre cada paso del motor, y se mantuvieron las constantes del controlador.

Otro problema que se tuvo fue en el arranque del motor de 220 voltios AC, pues el tiristor seleccionado no resistía el arranque del motor debido a que su corriente máxima estaba en el límite de corriente del motor de 2.5 HP en condiciones de funcionamiento normal, y ya que en el arranque de cualquier motor el consumo de energía es mayor, fue necesario reemplazarlo por un triac de mayor potencia. Luego de hacer estas mejoras el sistema de control de temperatura funcionó con una buena respuesta.

5.1 GRAFICAS DE RESPUESTA.

Después de la instalación del controlador y hacer los ajustes, se procedió a verificar su respuesta, y para ello se grafico la salida del proceso. Las figuras 5.4 y 5.5 muestran la respuesta del sistema en control *On-Off*. En la figura 5.6 se muestra la respuesta del sistema con el controlador en modo de control PI.

Figura 5.4 Respuesta en modo de control *On-Off*. Temperatura de referencia 40°C, temperatura ambiente 16.5 °C, temperatura inicial en la secadora 14.8°C, prueba con máquina vacía.

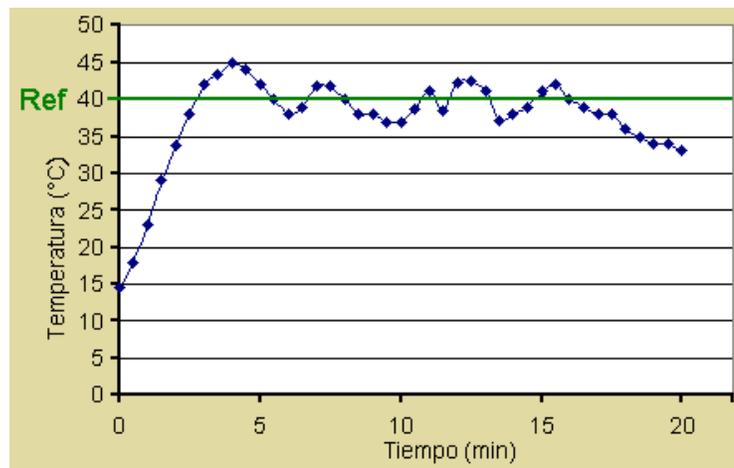


Figura 5.4 Respuesta en modo de control *On-Off*. Temperatura de referencia 45°C, temperatura ambiente 15.3 °C, temperatura inicial en la secadora 54.8°C, prueba con máquina vacía.

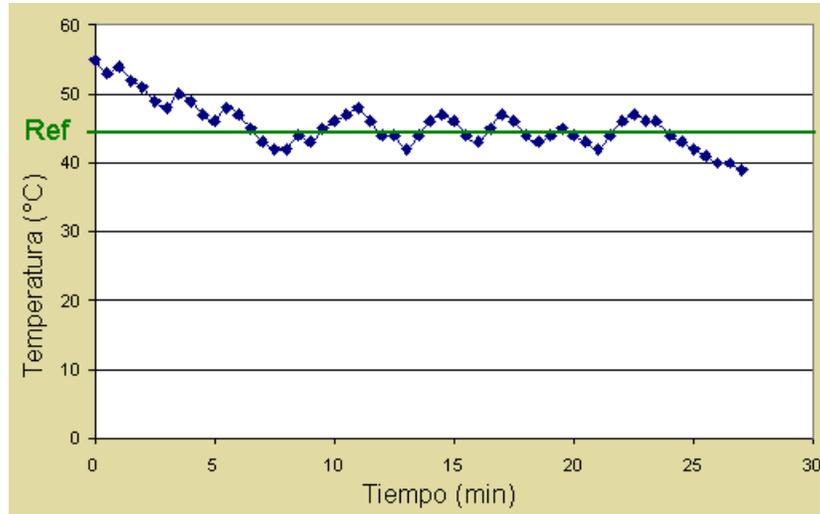
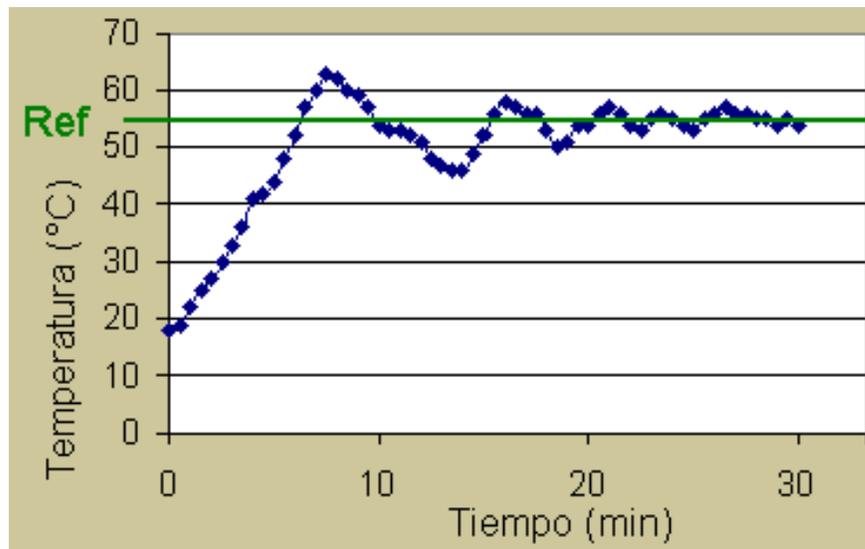


Figura 5.4 Respuesta en modo de control *PI*. Temperatura de referencia 55°C, temperatura ambiente 15.9 °C, temperatura inicial en la secadora 18.1°C, prueba con máquina vacía.



CONCLUSIONES

1. El correcto modelado e interpretación de las variables y fenómenos físicos permite identificar modelos sencillos cuyos desarrollos matemáticos son factibles, permitiendo la simulación de los sistemas analizados y así desarrollar equipos de monitoreo y control. Además los modelos encontrados deben ofrecer una buena aproximación de los sistemas reales y poder ser utilizados en el diseño de controladores automáticos.
2. Se logro dar mayor confiabilidad al proceso de secado de una máquina sacadora de granos de un beneficiadero en la zona de La Cruz (Nariño) debido a la adecuada aplicación de la tecnología.
3. El campo de aplicación de los microcontroladores y los procesadores digitales de señales es cada día más amplio debido a sus características técnicas y capacidad de cómputo. Con este trabajo se han estudiado los microcontroladores como una herramienta muy útil que ofrece una buena respuesta en tiempo real.
4. Con en el desarrollo del controlador de temperatura programable se observó que se obtiene un mayor rendimiento y eficiencia en el control de procesos si se distribuyen las tareas del controlador en módulos independientes y cada uno de estos módulos posea su propio dispositivo programable, y así especializar las diferentes tareas del controlador.

BIBLIOGRAFÍA

Creus, A. *Instrumentación Industrial*. Ed. Marcombo. Barcelona, 1997.

Díaz, J. *Curso de Instrumentación Industrial*. Ed. Unicauca. Popayán, 1995.

----- . *Curso de Software para Aplicaciones Industriales*. Ed. Unicauca. Popayán, 1995.

Earle R. *Ingeniería de los alimentos*. Ed. Acribia S.A. Zaragoza, 1998.

Fairchild Semiconductor, Data sheets MOC3020 M

ZEMANSKY, Mark. *Calor y termodinámica*. España. 3a Edición. Mc Graw Hill, 1968.

LabView, User Manual, National Instruments, 1998. SimCreator.

Lázaro, A.M. *LabVIEW, Programación gráfica para el control de instrumentación*. Paraninfo, 1996.

MALONEY, Timothy J. *Electrónica Industrial Moderna*. México. 3ª Edición. *Prentice Hall* Hispanoamericana, 1997.

Microcontroladores PIC. *Diseño práctico de aplicaciones*. J. Mª. Angulo Usategui, I. Angulo Martínez *Mc Graw Hill*, 1999 .

National Semiconductor, Data sheets LM35z

OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de Control Moderna*. México. 3ª Edición. *Prentice Hall* Hispanoamericana, 1998.

<http://www.fao.org/inpho/vlibrary/x0058s/X0058S00.htm#Contents>

http://www.gratisweb.com/industriasajltda/motores_paso_a_paso.html

<http://www.microchip.com/1010/pline/picmicro/category/embctrl/14kbytes/devices/16f877/>

<http://www.simcreator.com/>

Anexo A. Programa en ensamblador para la configuración de los puertos.

```
.*****  
,  
;*****Configurar puertos*****  
,
```

```
puertos          bsf    STATUS,5  
                 movlw  b'00111100'  
                 movwf  TRISD  
                 clrf   TRISB  
                 clrf   TRISC  
                 clrf   TRISE  
                 movlw  03fh  
                 movwf  TRISA      ;configura el puerto A como  
                 movlw  02h      ;ADC de 5 canales y el  
                 movwf  ADCON1    ;puerto E como I/O digitales  
                 movlw  07h  
                 movwf  OPTION_REG  
                 bcf    STATUS,5  
                 goto   inicio
```

Anexo B. Programa en ensamblador para la interfaz con el usuario.

```

*****Programación*****
;
*****Se adquieren los datos*****
;
inicio          call    inicio_lcd
                clrf    R_control    ;se clarea el registro de control
                call    borrar_lcd
                call    mensaje1    ;inicio
                call    esperar
                call    borrar_lcd
                call    mensaje2    ;iniciar
                call    esperar
                call    borrar_lcd
                call    mensaje3    ;tipo de combustible
                call    esperar
                call    borrar_lcd
combustible     call    mensaje4    ;gas o carbón
                call    retardo
                call    leer
                goto    ver0
ver0            movlw   01h          ;se comprueba si
                xorwf   cte5,w      ;el valor tecleado
                btfsc  STATUS,2    ;es gas o carbón
                goto   gas         ;o se mostrara un
                movlw  02h          ;mensaje de error
                xorwf   cte5,w
                btfsc  STATUS,2
                goto   carbón
                call   erro
                call   borrar_lcd
                goto   combustible
gas            bcf     R_control,0   ;el registro de control
                bcf     R_control,1  ;se configura como:
                bcf     R_control,2  ;gas, manual
                call   borrar_lcd
                goto   temperatura

```

```

carbón          bsf    R_control,0
                call   borrar_lcd
                call   momento
                goto   control
control         call   mensaje5    ;manual o automático
                call   leer
                goto   ver1
ver1           movlw  0ah          ;se comprueba si
                xorwf  cte5,w      ;el valor tecleado
                btfsc  STATUS,2    ;es manual o auto
                goto   manual      ;o se mostrara un
                movlw  0bh          ;mensaje de error
                xorwf  cte5,w
                btfsc  STATUS,2
                goto   auto
                call   erro
                call   borrar_lcd
                goto   control
manual         bcf    R_control,1
                call   borrar_lcd
                call   momento
                goto   temperatura
auto           bsf    R_control,1
                call   borrar_lcd
                call   mensaje19   ;PID o ON-OFF
auto1         call   retardo
                call   leer
                call   retardo
                goto   ver10
ver10         movlw  01h          ;se comprueba si
                xorwf  cte5,w      ;el valor tecleado
                btfsc  STATUS,2    ;es PID o ON-OFF
                goto   ver12      ;o se mostrara un
                movlw  02h          ;mensaje de error
                xorwf  cte5,w
                goto   adela0

```

Anexo C. Programa en ensamblador para la adquisición de datos.

```
*****  
,  
,*****Adquisición de datos*****  
programa      clrf    pro_hh  
              clrf    pro_h  
              clrf    pro_l  
              clrf    int_hh  
              clrf    int_h  
              clrf    int_l  
              clrf    ctl_hh  
              clrf    ctl_h  
              clrf    ADCON0          ;canal 0  
              call   conversor  
              movf   conv_h,w  
              movwf  cte1  
              bsf   ADCON0,3          ;canal 1  
              call   conversor  
              movf   conv_h,w  
              movwf  cte2  
              clrf   cte3  
              call   comparar  
              movf   temp_h,w  
              movwf  valor1  
              movlw  d'55'  
              movwf  valor2  
              call   multiplicar  
              movf   alto,w  
              movwf  divndo_h  
              movf   bajo,w  
              movwf  divndo_l  
              movlw  d'147'  
              movwf  divisor  
              call   dividir
```

```
movf  resul_l,w
movwf temp_l
movf  resul_h,w
movwf temp_h
subwf numero1,w
btfss STATUS,0
goto  dif0
movwf error_h
bsf   R_control,5    ;positivo
movlw d'100'
movwf cte1
movf  resul_l,w
subwf cte1,w
btfss STATUS,2
goto  dif1
movf  cte1,w
movwf error_l
goto  adela0
dif0  bcf   R_control,5    ;negativo
movf  numero1,w
subwf resul_h,w
movwf error_h
movf  resul_l,w
movwf error_l
goto  adela0
dif1  movwf cte1
movlw 01h
subwf error_h,w
btfsc STATUS,0
decf  error_h
movf  cte1,w
movwf error_l
goto  adela0
```

Anexo D. Programa en ensamblador del control PI.

```
.,*****  
,  
,*****modos de control*****  
adela0          btfss  R_control,1  
                goto   monitoreo  
                btfss  R_controll,2  
                goto   todo_nada  
                movlw  d'04'           ;Kp del controlador  
                movwf  valor1         ;se hace el control proporcional  
                movf   error_l,w      ;del controlador PI asi:  
                movwf  valor2         ;P = e(t)*Kp con resolución de  
                call   multiplicar    ;24 bits  
                movf   alto,w  
                movwf  divndo_h  
                movf   bajo,w  
                movwf  divndo_l  
                movlw  d'100'  
                movwf  divisor  
                call   dividir  
                movf   resul_h,w  
                movwf  pro_h  
                movf   resul_l,w  
                movwf  pro_l  
                movlw  d'04'           ;Kp del controlador  
                movwf  valor1  
                movf   error_h,w  
                movwf  valor2  
                call   multiplicar  
                movf   bajo,w  
                addwf  pro_h,1  
                btfsc  STATUS,0  
                incf   pro_hh
```

```
movf  alto,w
addwf pro_hh,1
movlw d'25'           ;Ki del controlador
movwf valor1         ;se calcula parte de la integral
movf  error_l,w      ;del controlador PI
movwf valor2         ; e(t)*Ki*dt
call  multiplicar
movf  alto,w
movwf divndo_h
movf  bajo,w
movwf divndo_l
movlw d'100'
movwf divisor
call  dividir
movf  resul_h,w
movwf int_h
movlw d'25'           ;Ki del controlador
movwf valor1
movf  error_h,w
movwf valor2
call  multiplicar
movf  bajo,w
addwf int_h,1
btfsc STATUS,0
incf  int_hh
movf  alto,w
addwf int_hh,1
movf  int_hh,w
movwf divndo_h
movf  int_h,w
movwf divndo_l
movlw d'80'           ;dt 10ms
movwf divisor
call  dividir
movf  resul_h,w
movwf int_h
```

```

                                movf  resul_l,w
                                movwf int_l
                                btfss R_control,5           ;se hace la integral del
                                goto  signo1                 ;control PI de la forma
                                btfss R_control,4           ;l(n+1) = e(t)*Ki*dt + l(n)
                                goto  less0
add0                             movf  int_l,w
                                addwf int_Lo,1
                                movlw d'100'
                                subwf int_Lo,w
                                btfsc STATUS,0
                                goto  add2
add3                             movf  int_h,w
                                addwf int_Ho,1
                                movlw d'200'                ;200 es el valor máximo que puede
                                subwf int_Ho,w              ;tomar la integral y 0 el mínimo
                                btfss STATUS,0
                                goto  add1
add1                             btfss R_control,5
                                goto  signo2
                                bsf   R_control,4
                                goto  adela1

```

Anexo E. Programa en ensamblador de la finalización de las tareas.

```
,*****Finalización*****  
finalizar          bcf    PORTD,0  
                  clrf   PORTC  
                  clrf   PORTE  
                  call   borrar_lcd  
                  call   mensaje13  
                  bcf    R_control,3      ;se abre la cortina  
                  movf   paso_B,w  
                  movwf  ctl_hh  
                  call   motor_pp  
                  call   esperar  
apa                call   borrar_lcd  
                  call   retardo  
                  call   mensaje18  
                  sleep  
                  goto   apa
```

Anexo F. Programa en ensamblador para el control del motor de paso.

```
,*****Control de motor pp*****
motor_pp      movlw  d'130'
               movwf  pas_max      ;número de pasos para cerrar
               btfss  R_control,3  ;la cortina
               goto   left
               movf   ctl_hh,w     ;se aplica la señal del
               movwf  paso_A       ;controlador al motor PP
               subwf  paso_B,w     ;que hace el efecto sobre
               btfss  STATUS,0     ;la cortina
               goto   left1
               movwf  cte3
               movlw  01h
               subwf  cte3,w
               btfss  STATUS,0
               goto   leftt
               movf   cte3,w
               movwf  pasos
               movf   paso_A,w
               movwf  paso_B
               movlw  01h
               subwf  pasos,w
               btfss  STATUS,0
               return
               goto   sentido2
left          movf   ctl_hh,w
               movwf  paso_A
               subwf  paso_B,w
               btfss  STATUS,0
               goto   left2
               movwf  paso_B
               movf   paso_A,w
               movwf  pasos
```

```

movlw 01h
subwf pasos,w
btfss STATUS,0
return
goto sentido2
left1 movf paso_B,w
subwf paso_A,w
movwf pasos
addwf paso_B,w
movwf cte3
subwf pas_max,w
btfss STATUS,0
goto left3
movf cte3,w
movwf paso_B
movlw 01h
subwf pasos,w
btfss STATUS,0
return
goto sentido1
left2 movf paso_B,w
movwf pasos
movlw 01h
subwf pasos,w
btfss STATUS,0
return
goto sentido2
left3 movf paso_B,w
subwf pas_max,w
movwf pasos
movf pas_max,w
movwf paso_B
movlw 01h
return
```