

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR ANÁLOGO – DIGITAL

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL

VÍCTOR DANIEL ZAMBRANO PÉREZ

vic_zambra@yahoo.es

DIRECTOR: MSc. PATRICIO BURBANO R.

pburbanor@hotmail.com

Quito, Septiembre 2009

DECLARACIÓN

Yo Víctor Daniel Zambrano Pérez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Víctor Daniel Zambrano Pérez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Víctor Daniel Zambrano Pérez, bajo mi supervisión.

MSc. Patricio Burbano R.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarme la oportunidad de vivir en este mundo, y tener a mí alrededor a personas bondadosas, honestas y desinteresadas.

A mi madre Rosario por brindarme su apoyo incondicional en todo momento de mi vida, educarnos a mis hermanos y mí para ser personas de bien.

A mi padre Jorge por darnos la oportunidad de estudiar lo que mis hermanos y yo deseábamos y darnos todos los recursos necesarios para desarrollarnos, además de comprenderme y apoyarme en las situaciones críticas que pasé en mi vida estudiantil.

A mis hermanos Miguel, María Fernanda, y María José porque con el apoyo mutuo que nos damos, podremos sacar adelante cualquier dificultad que se nos presente en la vida.

A mi abuelita Laura por darme motivación especial en mi vida en general, protegerme, defenderme, ser bondadosa, y aunque no esté con nosotros yo siempre la recordaré.

Al MSc. Patricio Burbano ya que me dio la oportunidad de realizar este proyecto.

A los profesores que me acompañaron en toda mi vida estudiantil ya que con su esmero y dedicación me formaron académica y moralmente hasta llegar a ser una persona responsable.

A mis alumnos con su compañerismo me dieron motivación para terminar este proyecto.

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres, a mis hermanos por creer en mí y brindarme su apoyo incondicional, y al MSc. Patricio Burbano, por creer en mis conocimientos y habilidades para desarrollar este proyecto.

CONTENIDO

| | |
|-------------------|----|
| RESUMEN..... | x |
| PRESENTACIÓN..... | xi |

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

| | |
|--|---|
| 1.1 CONTROL REALIMENTADO | 1 |
| 1.2 MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA | 3 |

CAPÍTULO 2: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA

| | |
|---|----|
| 2.1 DISEÑO DEL ACTUADOR | 4 |
| 2.1.1 DISEÑO DEL CIRCUITO DE POTENCIA..... | 5 |
| 2.1.2 DISEÑO DEL CIRCUITO DE DISPARO..... | 9 |
| 2.1.2.1 CIRCUITO DETECTOR DE CRUCE POR CERO..... | 10 |
| 2.1.2.2 CIRCUITO GENERADOR DE ONDA DIENTE DE SIERRA..... | 14 |
| 2.1.2.3 CIRCUITO COMPARADOR..... | 18 |
| 2.2 DISEÑO DEL CIRCUITO MEDIDOR DE TEMPERATURA..... | 23 |
| 2.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR DE TEMPERATURA LM35..... | 23 |
| 2.2.2 DISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR..... | 26 |
| 2.2.3 TRANSMISOR DE SEÑAL..... | 29 |
| 2.2.3.1 TRANSMISOR AD694AQ (4 – 20mA Transmitter)..... | 30 |
| 2.3 DISEÑO DEL CIRCUITO VISUALIZADOR DE VARIABLES..... | 36 |
| 2.3.1 CIRCUITO ACONDICIONADOR DE TEMPERATURA..... | 37 |
| 2.3.2 CIRCUITO ACONDICIONADOR DEL ÁNGULO DE DISPARO..... | 38 |
| 2.3.3 CIRCUITO ACONDICIONADOR DEL VOLTAJE APLICADO A LA LÁMPARA..... | 39 |
| 2.3.4 CODIFICADOR DE SEÑALES ACONDICIONADAS..... | 45 |
| 2.4 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE TEMPERATURA..... | 50 |
| 2.4.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS TARJETAS..... | 50 |
| 2.4.2 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO..... | 52 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.4.2.1 | COMPARTIMIENTO DE LOS CIRCUITOS..... | 53 |
| 2.4.2.2 | DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS..... | 54 |
| 2.4.2.3 | COMPARTIMIENTO DE LA CÁMARA DE TEMPERATURA..... | 58 |
| 2.5 | ANÁLISIS ECONÓMICO DEL MÓDULO DE TEMPERATURA | 60 |
| 2.5.1 | COSTOS DE LAS TARJETAS..... | 61 |
| 2.5.2 | COSTOS DEL MÓDULO..... | 64 |
| 2.6 | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA..... | 66 |
| 2.6.1 | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL ACTUADOR..... | 66 |
| 2.6.1.1 | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL CIRCUITO DE DISPARO.. | 67 |
| 2.6.1.2 | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL CIRCUITO DE POTENCIA | 69 |
| 2.6.2 | FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA..... | 72 |

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.1 | DISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR PARA EL TRANSMISOR DE CORRIENTE..... | 79 |
| 3.2 | DISEÑO DE LOS CONTROLADORES ANÁLOGOS..... | 82 |
| 3.2.1 | CONTROL EN LAZO CERRADO..... | 84 |
| 3.2.2 | CONTROL PID ANÁLOGO..... | 84 |
| 3.2.2.1 | DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES..... | 86 |
| 3.2.2.2 | DISEÑO DEL CIRCUITO..... | 90 |
| 3.2.2.3 | CIRCUITO LIMITADOR DE VOLTAJE DEL CONTROL PID..... | 96 |
| 3.3 | DISEÑO DE LOS CONTROLADORES DIGITALES..... | 98 |
| 3.3.1 | CONTROL PID EN BASE A MICROCONTROLADOR..... | 99 |
| 3.3.1.1 | DISCRETIZACIÓN DEL CONTROL PID..... | 99 |
| 3.3.1.2 | IMPLEMENTACIÓN DE LA LEY DE CONTROL..... | 102 |
| 3.3.2 | CONTROL PID EN BASE A COMPUTADOR..... | 109 |
| 3.3.2.1 | DISCRETIZACIÓN DEL CONTROL PID..... | 109 |
| 3.3.2.2 | IMPLEMENTACIÓN DE LA LEY DE CONTROL..... | 110 |
| 3.3.3 | REDES DE ADELANTO – ATRASO EN BASE A COMPUTADOR..... | 113 |
| 3.3.3.1 | DISCRETIZACIÓN DEL CONTROL REDES..... | 113 |
| 3.3.3.2 | IMPLEMENTACIÓN DE LA LEY DE CONTROL..... | 118 |

| | |
|--|------------|
| 3.4 DISEÑO ESTRUCTURAL..... | 121 |
| 3.4.1 ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE LOS CONTROLADORES ANÁLOGOS..... | 121 |
| 3.4.1.1 CONTROL EN LAZO CERRADO..... | 122 |
| 3.4.1.2 CONTROL PID ANÁLOGO..... | 123 |
| 3.4.2 ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE LA PLANTA..... | 126 |
| 3.4.3 INTERFAZ GRÁFICA DEL CONTROLADOR..... | 127 |
| 3.4.3.1 SISTEMA DE INGRESO DE DATOS..... | 128 |
| 3.4.3.2 SISTEMA DE VISUALIZACIÓN DE DATOS..... | 130 |
| 3.4.4 CIRCUITO SELECTOR DE LA SEÑAL DE CONTROL..... | 132 |
| 3.4.5 ACONDICIONADOR DE NIVELES DE VOLTAJE DE LA SEÑAL DE CONTROL..... | 133 |
| 3.4.6 FUENTE DE ALIMENTACIÓN..... | 135 |
| 3.4.7 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROLADOR..... | 136 |
| 3.4.7.1 INICIALIZACIÓN Y PRESENTACIÓN..... | 142 |
| 3.4.7.2 CONTROL EN LAZO CERRADO..... | 144 |
| 3.4.7.3 CONTROL PID ANÁLOGO..... | 145 |
| 3.4.7.4 CONTROL PC..... | 149 |
| 3.4.7.5 CONTROL PID DIGITAL..... | 150 |
| 3.4.7.6 INTERRUPCIÓN..... | 154 |
| 3.4.8 HMI DEL CONTROLADOR POR PC..... | 155 |
| 3.5 CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR..... | 158 |
| 3.5.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS TARJETAS..... | 158 |
| 3.5.2 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS CIRCUITOS..... | 159 |
| 3.6 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL CONTROLADOR..... | 164 |
| 3.6.1 COSTOS DE LAS TARJETAS..... | 165 |
| 3.6.2 COSTOS DEL MÓDULO..... | 169 |
| 3.6.3 COSTOS ADICIONALES..... | 170 |

CAPÍTULO 4: PRUEBAS DEL PROTOTIPO DE CONTROL DE TEMPERATURA.

| | |
|--|------------|
| 4.1 CONTROL EN LAZO CERRADO..... | 175 |
| 4.2 CONTROL PID ANÁLOGO..... | 177 |
| 4.2.1 CONTROL SIN COMPENSACIÓN..... | 177 |
| 4.2.2 CONTROL CON COMPENSACIÓN..... | 181 |
| 4.3 CONTROL PID DIGITAL CON MICROCONTROLADOR..... | 184 |
| 4.3.1 CONTROL SIN COMPENSACIÓN..... | 184 |
| 4.3.2 CONTROL CON COMPENSACIÓN..... | 186 |
| 4.4 CONTROL PID DIGITAL CON COMPUTADOR..... | 188 |
| 4.5 COMPENSADOR POR REDES..... | 190 |

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | |
|---------------------------------|------------|
| 5.1 CONCLUSIONES..... | 193 |
| 5.2 RECOMENDACIONES..... | 195 |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

- A. FOTOGRAFÍAS DE LOS MÓDULOS.**
- B. GUÍA DE USUARIO.**
- C. CIRCUITOS ESQUEMÁTICOS Y TARJETAS DE LOS MÓDULOS.**
- D. ESPECIFICACIONES DE LOS DIPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.**

RESUMEN

El proyecto de titulación presentado en estas páginas, está estructurado en líneas generales de la siguiente manera:

El capítulo 1 describe en forma general a los sistemas de control realimentado y presenta una breve introducción acerca del prototipo de planta a utilizar.

En el capítulo 2 se presenta en forma detallada el diseño de los circuitos del prototipo de control de temperatura, también la construcción del prototipo con su respectivo análisis económico, y la obtención de la función de transferencia.

En el capítulo 3 se realiza el análisis de la función de transferencia, para el diseño de los controladores análogos y digitales, el diseño de los circuitos, el diseño de una interfaz para el controlador, la construcción del controlador con su respectivo análisis económico, y el diseño del control computacional.

El capítulo 4 describe la realización de las pruebas de los controladores aplicados al prototipo de control de temperatura, la obtención de la respuesta ante perturbaciones dentro del sistema en lazo abierto, lazo cerrado, y con los tipos de control diseñados, además la visualización de la acción de control del controlador ante perturbaciones externas.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones a las que se llegó tras la finalización de este proyecto de titulación, además de algunas recomendaciones para trabajos posteriores afines a éste.

En la sección de anexos se presentan los manuales de los dispositivos electrónicos más importantes, los diagramas circuitales, y las tarjetas de la planta y del controlador.

PRESENTACIÓN

Los sistemas de control buscan decidir sobre el desarrollo de un proceso o un sistema. También se puede entender como la forma de manipular ciertas variables para conseguir que ellas u otras variables actúen en la forma deseada.

La Ingeniería de control es un enfoque interdisciplinario para el control de sistemas y dispositivos. Combina áreas como eléctrica, electrónica, mecánica, química, ingeniería de procesos, teoría matemática entre otras.

Los fundamentos de control son: control en lazo cerrado, regulación y seguimiento de trayectorias. También existen otros campos dentro de la teoría de control como: control lineal, control no lineal, control óptimo, control robusto, etc. y cada uno de estos tienen un comportamiento en particular.

La historia del control se remonta desde los principios de la civilización, con el reloj de agua desarrollado por los griegos que fue considerado como el primer sistema de control automático de la historia.

En la época moderna, en Europa se realizaron avances con los sistemas de control con retroalimentación, pero el primer trabajo significativo fue el regulador centrífugo desarrollado por James Watt en 1769. [1]

A mediados del siglo XIX, J.C. Maxwell, consideró una teoría matemática relacionada con la teoría de control usando el modelo de una ecuación diferencial. Además hizo algunas aportaciones como la importancia de la acción integral, linealización, y criterios de estabilidad en sistemas de primero y segundo orden.

Paralelamente I.A. Vyshnegradskii formuló, una teoría matemática de los reguladores de manera independiente a Maxwell, con posible influencia europea.

A principios del siglo XX se desarrollaron otros métodos para el análisis de estabilidad, más simples, como el diagrama de NYQUIST, y el diagrama de BODE

siendo la base del control clásico. También la aparición de los sistemas de control en base a circuitos electrónicos.

Con el desarrollo de la computación después de la segunda guerra mundial, se hizo posible el análisis de sistemas más complejos fomentando la teoría del control moderno.

Actualmente la tendencia de los sistemas de control es hacia la optimización y la digitalización total de los controladores.

[¹] FRIDMAN, Leonid. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL, Departamento de Control, División de Ingeniería Eléctrica Facultad de Ingeniería UNAM, agosto 2006.

CAPÍTULO 1.

1 INTRODUCCIÓN.

1.1 CONTROL REALIMENTADO.

El control realimentado es uno de los sistemas más confiables y robustos dentro de los sistemas de control.

El control realimentado tiene una gran ventaja sobre el control en lazo abierto que es la inmunidad ante perturbaciones moderadas de la variable controlada.

Dentro del control realimentado, el más utilizado en la actualidad, es el control PID (Proporcional, Integral y Derivativo).

El controlador PID es un controlador realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además el controlador tiene la capacidad de anticipación a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

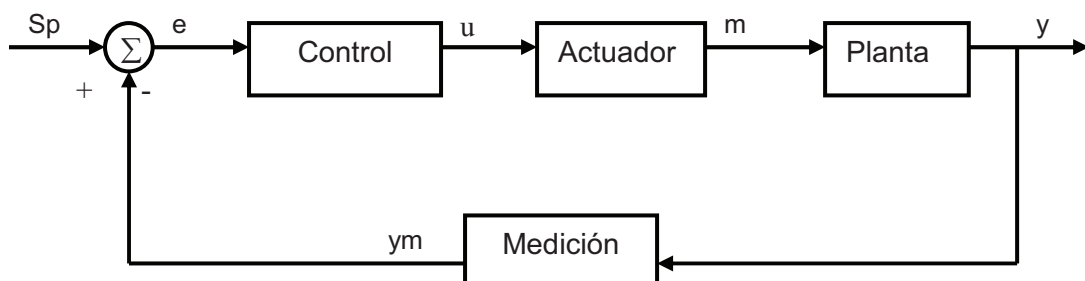


Figura 1.1 Esquema del sistema de control realimentado.

- r: Referencia o Set Point.
- e: Error.
- u: Control.
- m: Variable manipulada.
- y: Salida.
- ym: Variable medida.

El control realimentado tiene como principio monitorear la variable de salida (y), y comparar con la señal de referencia o set point (r) para la obtención de la señal de error, la cual permanece sin modificación cuando no se presenta una perturbación externa que cambie el valor de la variable controlada como la variación de la variable de referencia. Cuando se presenta una alteración del sistema de control, se presenta un cambio de la señal del error, el controlador toma esta variación y trata de corregir para llevar al sistema al nuevo valor de referencia o mantener al mismo valor en el caso de tener una perturbación que no sea cambio en la referencia.

El control, en la actualidad, se utiliza en todo tipo de procesos, por lo que el objetivo de este proyecto es diseñar y construir un controlador analógico – digital, con una técnica de control en particular, utilizada en muchas aplicaciones como es el control PID, aplicado al control de temperatura como caso particular.

Adicionalmente el controlador se desarrolla como un módulo independiente fácilmente manipulable. Además, en el prototipo de la planta se visualizan los parámetros de funcionamiento a través de una interfaz con el computador personal.

El módulo de control utiliza las técnicas de control PID analógico a base de amplificadores operacionales, y el control PID digital a base de microprocesador, por medio de una tarjeta de adquisición de datos para un computador personal.

1.2 MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA.

Dentro de la planta a utilizarse para el control de temperatura se realiza la construcción de una pequeña cámara térmica que contiene una lámpara incandescente que genera luz y calor dentro de la cámara provocando un cambio de temperatura.

Para tener un rango de variación de temperatura se manipula el voltaje RMS que se aplica sobre la lámpara mediante el uso de convertidores de voltaje de estado sólido.

La técnica utilizada es por medio de un convertidor AC – AC, control de fase directo; ya que esta técnica de control es la más común para variar el voltaje de una lámpara.

El circuito de disparo del elemento de potencia incluye un circuito sincronizado con la red eléctrica que consta de amplificadores operacionales que generan una rampa lineal al detectar el cruce por cero de la señal de la red eléctrica produciendo una señal PWM (Pulse Wave Modulation) a la frecuencia de la red, determinando el ángulo de disparo del elemento de potencia, por medio de una señal que se compara con la de la rampa generada, conformando el actuador.

Para la obtención de medidas de temperatura dentro de la cámara se emplea un sensor de estado sólido (circuito integrado), con un rango de variación de hasta 150°C dentro de la cámara. Este sensor es fácil de acondicionar a valores que se puedan utilizar para un control posterior. Para la transmisión de las medidas obtenidas, se utiliza un transmisor de corriente disminuyendo el riesgo de señales no deseadas como EMI (Electromagnetic Interference), el transmisor de corriente envía las señales en rangos normalizados.

CAPÍTULO 2.

2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA.

Este capítulo trata de diseñar, simular, construir, y obtener la función de transferencia del actuador, la planta, y el acondicionador de la variable controlada.

Al conjunto del actuador, la planta y el circuito acondicionador de temperatura, simplemente se lo llama prototipo de planta.

El prototipo de planta comprende los siguientes componentes:

- Actuador: comprende el circuito de potencia y control.
- Planta: se compone de lámpara incandescente.
- Medición: comprende el acondicionamiento de la señal de temperatura y el circuito transmisor de corriente.
- Visualizador de variables: comprende el diseño de programa que permita visualizar las variables del actuador, y de la temperatura controlada por medio de un microcontrolador.

2.1 DISEÑO DEL ACTUADOR.

Dentro del lazo de control se encuentra el actuador, para el proyecto de control de temperatura representa el circuito de disparo y el circuito de potencia que entregará la potencia necesaria a la planta para variar y controlar la temperatura.

Para tener amplios rangos de variación de voltaje RMS para la alimentación de la lámpara se optó por el uso de elementos de estado sólido como elemento de potencia y el uso de circuitos operacionales para el circuito de disparo.

2.1.1 DISEÑO DEL CIRCUITO DE POTENCIA.

Para el diseño del circuito de potencia se utiliza la técnica de conversión AC – AC control de fase directo, este tipo de control de voltaje es muy utilizado especialmente en dispositivos de iluminación.

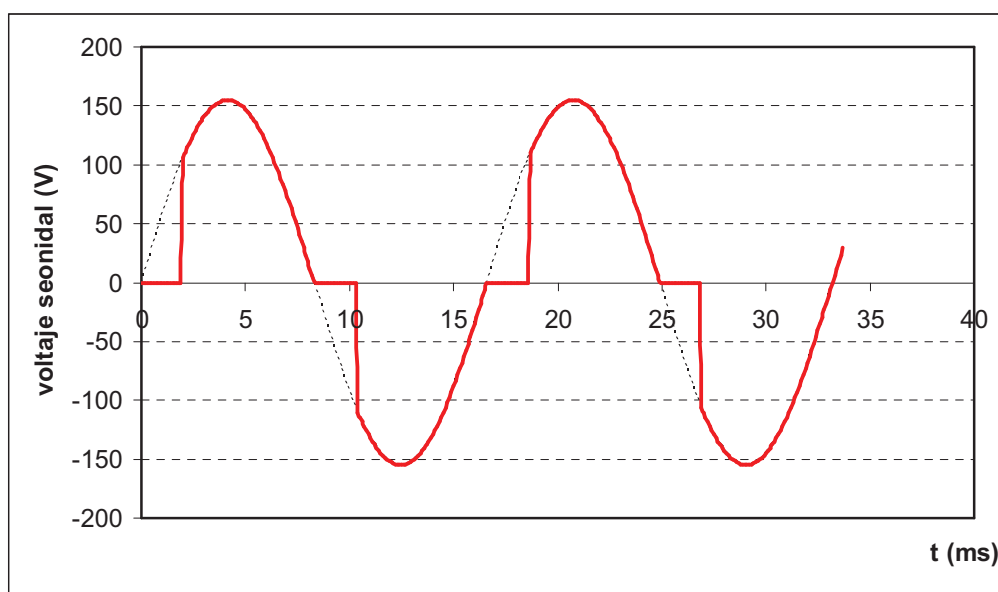


Figura 2.1 Control de fase directo.

La figura 2.1 presenta las formas de onda del control de fase directo monofásico para una carga puramente resistiva.

El elemento de potencia a utilizar es un TRIAC, que permite el control con carga puramente resistiva; además el TRIAC al ser un dispositivo robusto y de simple manejo permite realizar un control en amplio rango de voltaje con el ángulo de disparo, como se muestra en la figura 2.2.

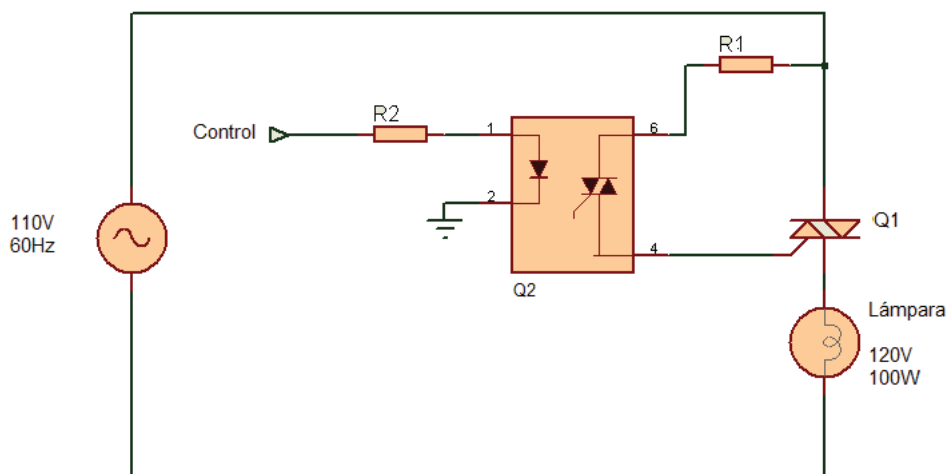


Figura 2.2 Circuito de potencia.

Los convertidores AC – AC tienen como característica el cruce por cero. El circuito de potencia no requiere circuitos de conmutación forzada para apagar al TRIAC.

Para dimensionar el TRIAC se toma en cuenta las características de la carga en este caso de la lámpara incandescente, que son las siguientes:

- Voltaje nominal: 120V AC.
- Potencia nominal: 100W.

Con estos valores de voltaje y potencia se puede obtener el valor de la corriente nominal RMS a partir de la expresión:

$$I_{NL} = \frac{P_{NL}}{V_{NL}}$$

$$I_{NL} = \frac{100W}{120V}$$

$I_{NL} = 0.833A$: Corriente nominal que circula en la lámpara.

El voltaje pico inverso del TRIAC es: 155v.

La corriente del TRIAC es: 0.833A (para el caso de que $\alpha = 0^\circ$).

Como una lámpara incandescente es una resistencia variable con la temperatura la corriente no es constante para el rango de variación del ángulo de disparo.

Se escoge el TRIAC: BT136, que presenta las siguientes características:

- Corriente máxima: $I_{TRMS} = 8A$
- Voltaje pico inverso: $V_{RRM} = 600V$
- Corriente de compuerta: $I_{GT} = 10mA$
- Voltaje de compuerta: $V_{GT} = 2.5V$

Para seleccionar el optotriac se toma en cuenta la corriente de compuerta del TRIAC que es de $I_{GT} = 10mA$ con esto se selecciona el optotriac MOC3010, que presenta las siguientes características:

- Voltaje de aislamiento: $V_{ISO} = 7500V$
- Corriente máxima de led: $I_F = 50mA$
- Voltaje reverso de led: $V_F = 3V$
- Potencia del optotriac: $P_T = 330mW$

La resistencia limitadora $R1$ permite limitar la corriente de compuerta del TRIAC, la corriente de compuerta $I_{GT} = 10mA$; entonces para dimensionar la resistencia se toma el valor del voltaje la red:

$$R1 = \frac{V_{RMS}}{I_{GT}}$$

$$R1 = \frac{110V}{10mA}$$

$R1 = 11K\Omega$; Para asegurar el disparo de TRIAC $R1 = 4.7K\Omega$

$$I_{GT} = \frac{110V}{4.7K\Omega}$$

$$I_{GT} = 23.4mA$$

Como el valor del voltaje es alto se calcula la potencia mínima que debe disipar la resistencia limitadora de la siguiente manera:

$$P_{R1} = \frac{V_{RMS}^2}{R1}$$

$$P_{R1} = \frac{110V^2}{4.7K\Omega}$$

$$P_{R1} = 2.57W$$

Entonces se escoge la resistencia de potencia superior de valor normalizado.

$$R1 = 4.7K\Omega$$

$$P_{R1} = 5W$$

La resistencia $R2$, se dimensiona a partir de la corriente necesaria del led del optotriac, esta corriente es de 50mA el valor máximo a partir de sus características; se toma como 25mA como valor de la corriente; y como voltaje de disparo se toma el valor de 12V a partir del voltaje de polarización de la fuente, el valor de la resistencia se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$R2 = \frac{V(+)-V_{led} - V_{diodo}}{I_F}$$

$$R2 = \frac{12V - 1.5V - 0.7V}{25mA}$$

$R2 = 392\Omega$; entonces el valor de la resistencia $R2$ es:

$$R2 = 390\Omega$$

2.1.2 DISEÑO DEL CIRCUITO DE DISPARO.

El circuito de disparo representa el control para el circuito de potencia dentro del actuador, permite tener el control del voltaje aplicado a la carga por medio de señales que controlan al elemento de potencia.

Existen algunos tipos de circuitos de disparo como rampa lineal, rampa cosenoidal, o con el uso de UJT para obtener el control de fase directo o para otro tipo de convertidores como el AC – DC monofásicos o trifásicos. En este caso se opta por el uso de la rampa lineal debido a su simplicidad de diseño y variación del ángulo de disparo directamente con el voltaje al comparador de la rampa.

La rampa lineal básicamente es un circuito que genera ondas en forma de diente de sierra, que tiene la característica de estar en sincronización con la señal de la red eléctrica, detectando el cruce por cero, permitiendo realizar el control al convertidor AC – AC (control de fase directo).

El diseño del circuito de disparo, comprende varias etapas que se muestran en la figura 2.3.

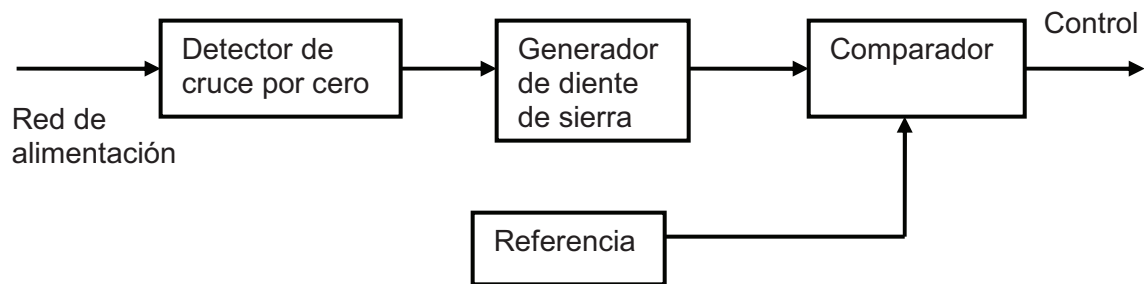


Figura 2.3 Diagrama de bloques del circuito de disparo.

2.1.2.1 Circuito detector de cruce por cero.

El circuito detector de cruce por cero tiene como función, la sincronización de la señal de la red eléctrica.

Para obtener la señal que detecte el momento cuando la señal de la red eléctrica es de 0v para los dos semiciclos, tanto el positivo como el negativo; primero se rectifica la onda para generar otra onda, y compararla con un voltaje constante de bajo valor en el orden de los milivoltios, para minimizar el tiempo de la señal pulso que se genera.

La figura 2.4 presenta el diagrama del circuito detector de cruce por cero para obtener la señal de sincronización con la red eléctrica.

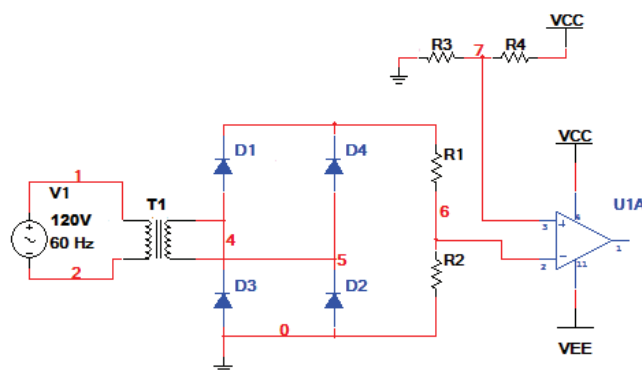


Figura 2.4 Circuito detector de cruce por cero.

Para el diseño, se utiliza un transformador de voltaje para reducir su valor y aislar a la señal de la red. El voltaje de salida de transformador es de 12V RMS.

Para rectificar el voltaje se utiliza un puente de diodos, el KBP210 que tiene las siguientes características:

- Corriente media: $I = 2A$
- Voltaje pico inverso: $V = 1000V$
- Corriente directa pico avalancha: $I_{FSM} = 60A$
- Voltaje máximo del puente en conducción: $V_F = 1.1V$

El voltaje rectificado tiene como valor pico:

$$V_{1p} = 12\sqrt{2}V$$

$$V_{1p} = 16.97V$$

Entonces, para mantener los voltajes menores a los de polarización se utiliza un divisor de voltaje a la salida del rectificador.

El voltaje pico sobre R2: $V_{R2p} = 12V$.

La corriente que circula por R2 es en el orden de las decenas de los miliamperios, se escoge un valor referencial de $I_{R2p} = 12mA$; entonces el valor de la resistencia R2 se calcula con la ley de Ohm.

$$R2 = \frac{V_{R2p}}{I_{R2p}}$$

$$R2 = \frac{12V}{12mA}$$

$$R2 = 1K\Omega$$

El valor de R1 se calcula por medio de un divisor de voltaje en la rama de R1 y R2.

$$V_{R2p} = V1_p \frac{R2}{R1 + R2}$$

Despejando R1 se tiene:

$$R1 = R2 \left(\frac{V1_p}{V_{R2p}} - 1 \right)$$

$$R1 = 1000\Omega \left(\frac{12\sqrt{2}}{12} - 1 \right)$$

$$R1 = 414.2\Omega$$

Entonces, el valor de la resistencia R1 es:

$$R1 = 420\Omega$$

Para detectar los cruces por cero se utiliza un voltaje de comparación de 0V y la onda generada, pero debido al puente, la onda no llega a cruzar por cero, por lo que se requiere de un voltaje bajo de comparación superior a cero para generar las señales impulso requeridas. Para esto se utiliza un divisor de voltaje con R3 y R4.

Los valores de resistencia se obtuvieron a partir de pruebas experimentales (Capítulo 4):

$$R3 = 10\Omega$$

$$R4 = 3K\Omega$$

La comparación de los voltajes se realiza con un amplificador operacional (TL084), que presenta las siguientes características:

- Voltaje máximo de polarización: $V_{CC} = \pm 18V$
- Voltaje máximo de entrada: $V_i = \pm 15V$
- Voltaje máximo diferencial de entrada: $V_{id} = \pm 30V$
- Potencia de disipación: $P_{tot} = 680mW$
- Temperatura de operación: $T_{oper} (-55^{\circ}C \text{ _ } 125^{\circ}C)$
- Relación de rechazo de modo común: $CMR = 86dB$

El comportamiento del circuito anteriormente diseñado se muestra en la figura 2.5, mediante las formas de onda obtenidas a partir de la simulación por el programa Multisim 10.0. Se muestra la forma de onda del voltaje sobre la resistencia R2, así como también la onda obtenida del detector de los cruces por cero.

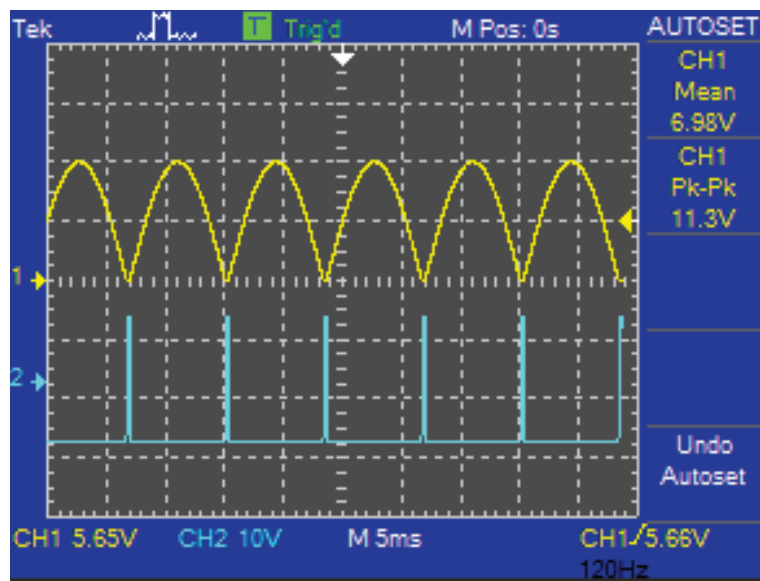


Figura 2.5 Formas de onda simulada del circuito detector de cruce por cero.

2.1.2.2 Circuito generador de la onda diente de sierra.

En esta etapa del circuito de disparo, para generar la onda PWM sincronizada, se requiere de una onda diente de sierra sincronizada con la red eléctrica, esta onda se basa en la generación de una rampa lineal, la misma que llega a su condición inicial cuando se produce el cruce por cero de la onda senoidal.

Una forma para generar una rampa lineal, es utilizando la integración de una señal de valor constante, para esto se utiliza un amplificador operacional en configuración de integrador, como muestra la figura 2.6.

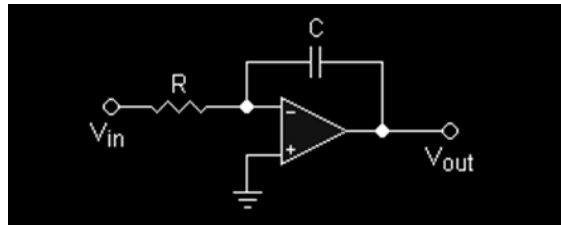


Figura 2.6 Circuito integrador.

El voltaje de salida del amplificador operacional se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{out} = \int_0^t -\frac{V_{in}}{RC} dt + V_0$$

La condición inicial diferente de cero se presenta cuando el condensador se encuentra cargado.

Para que el voltaje de salida sea cero en cualquier instante, se debe descargar al condensador para generar la condición de 0V para el voltaje de salida.

La señal generada por la detección de cruce por cero realiza la función de descargar al condensador del integrador, esto puede realizarse por medio de un

transistor. En ese instante el voltaje a la salida del integrador es cero llegando a la condición inicial.

El circuito integrador, realiza la integración en forma negativa a la onda de voltaje de entrada. Entonces para generar la rampa con pendiente positiva, el voltaje de entrada tiene que ser negativo y constante. La figura 2.7 muestra el esquema circuital del generador de diente de sierra sincronizado con la red.

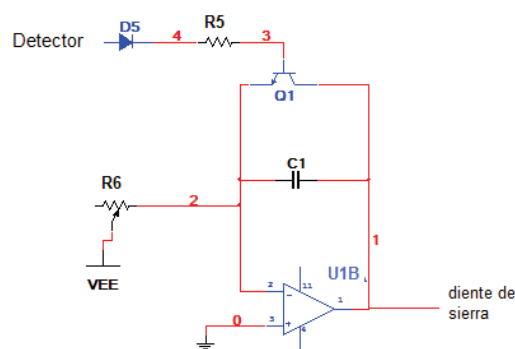


Figura 2.7 Circuito generador de la onda diente de sierra.

El amplificador operacional seleccionado es el TL084.

Para el diseño se toma como voltaje de entrada el voltaje $V(-) = -12V$.

La frecuencia de la señal rectificada es de 120Hz; por lo tanto el periodo es:

$$T = \frac{1}{f}$$

$$T = 8.333ms$$

Para tomar el valor máximo al que se quiere llegar con la rampa se toma en cuenta la polarización, y el voltaje máximo de control del circuito de disparo.

Se utiliza como voltaje final de la rampa $V_{t=8.33ms} = 10V$.

Utilizado la ecuación del circuito integrador:

$$v_{out} = \int_0^t -\frac{12V}{RC} dt + V_o$$

Donde: $V_o = 0$; se obtiene la ecuación:

$$v_{out} = \frac{12t}{RC}$$

Para $t = 8.33ms$, el voltaje de salida es: $V_{out} = 10V$

$$10V = \frac{12V \times 0.00833}{RC}$$

$$RC = 0.02\Omega F$$

Para determinar el valor del condensador se toma en cuenta el rango de voltaje de funcionamiento y el valor de capacitancia, al realizar el switcheo del transistor, la descarga debe ser inmediata para no alterar la onda diente de sierra.

Entonces: sea $C1 = 100nF$

El valor de la resistencia R6 se obtiene con la expresión anterior obtenida.

$$R6 = \frac{0.02\Omega F}{100nF}$$

$$R6 = 200k\Omega$$

Como los cálculos obtenidos son teóricos los valores de capacitancia y resistencia para el integrador deben de ser exactos. Se debe mantener la expresión $RC = 0.02\Omega F$; los condensadores comerciales no tienen estos valores exactos,

para la resistencia R6 se utiliza un potenciómetro de $500K\Omega$ para tener un control fino, y obtener la señal requerida por medio de realización de pruebas.

La resistencia R5 se calcula a partir de la corriente de base del transistor.

El transistor utilizado es $2N3904$, que presenta las siguientes características:

- Corriente de colector: $I_C = 0.6A$
- Voltaje máximo de base: $V_{BT} = 6V$
- Beta: $\beta = 100$ valor típico
- Voltaje máximo de colector: $V_C = 60V$

Considerando: $I_C = \beta I_B$

$$I_B = 6mA$$

Los pulsos de corriente a la base del transistor son de 6mA

$$R5 = \frac{V_{pulsos}}{6mA}$$

Donde V_{pulsos} es el voltaje pico de los pulsos del detector de cruce por cero cuyo valor es: $V_{pulsos} = 12V$.

$$R5 = 2K\Omega$$

El diodo D5 tiene como función recortar la parte negativa de la señal del detector de cruce por cero, debido a la utilización del operacional TL084.

Las formas de onda simuladas de la onda diente de sierra se presentan en la figura 2.8.

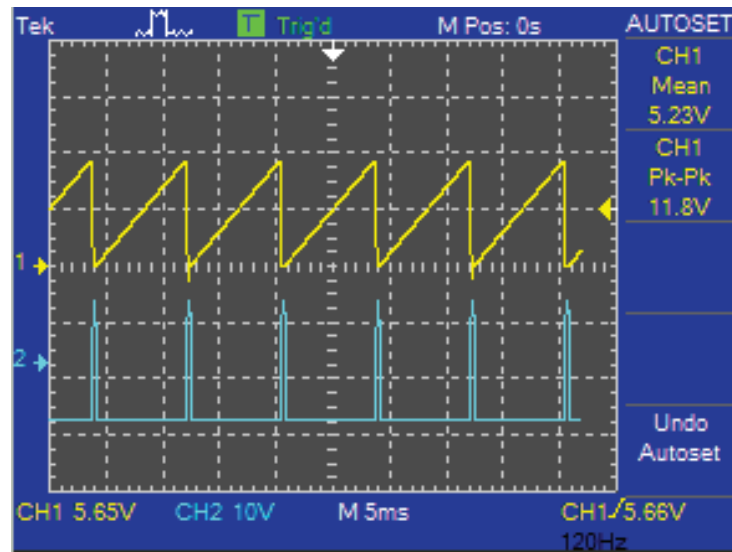


Figura 2.8 Formas de onda simulada del circuito generador de diente de sierra.

El cruce por cero de la onda sinusoidal se encarga de descargar al condensador, generando la onda diente de sierra. El voltaje máximo que llega es de 10V como se muestra en la figura 2.8.

2.1.2.3 Circuito Comparador.

En la generación del circuito de disparo, el circuito comparador realiza la función de comparar la señal diente de sierra con el voltaje de referencia.

El voltaje de referencia, es el voltaje que determina el ángulo de disparo por medio de una señal PWM para el circuito de potencia, este voltaje puede provenir desde el controlador, o directamente desde un potenciómetro.

Para el diseño del circuito comparador se toma en cuenta la señal diente de sierra. Al momento del cruce por cero de la onda, la PWM tiene que estar en nivel bajo para tener apagado el optotriac.

Cuando el voltaje de la rampa sea mayor al de la referencia, la señal PWM se coloca en alto, en ese instante se genera el ángulo de disparo.

Con las condiciones anteriores, al aumentar el voltaje de referencia, el ángulo de disparo aumenta, entonces, la conducción del TRIAC es menor y por ende el voltaje aplicado a la lámpara disminuye cuando el voltaje de referencia aumenta.

Para resolver este problema, se utiliza un circuito restador de un valor constante de voltaje con el voltaje de referencia, obteniendo el voltaje hacia el comparador.

El voltaje de referencia utilizado es estandarizado de 0 a 10V para variar el ángulo de disparo de 180° a 0° respectivamente.

El voltaje constante debe tener el valor máximo del voltaje de referencia, para el diseño del actuador, el voltaje es de 10V.

La figura 2.9 muestra el esquema circuitual del comparador para generar la señal PWM y aumentar el voltaje del convertidor AC – AC conforme aumente el voltaje de referencia.

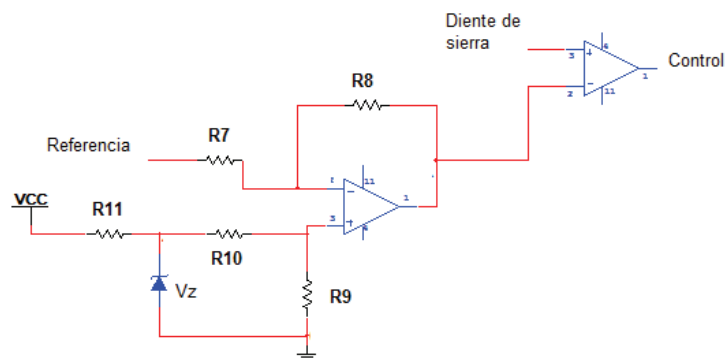


Figura 2.9 Circuito comparador.

Para realizar la comparación se utiliza el amplificador operacional TL084.

En el circuito restador los valores de las resistencias son los mismos.

$$R7 = R8 = R9 = R10 = R$$

Asumiendo que: $R = 10K\Omega$

El voltaje para la resta es de 10V; para esto se utiliza el diodo zener 1N4740, que tiene las siguientes características:

- Voltaje zener: $V_z = 10V$
- Corriente zener: $I_z = 25mA$

La resistencia limitadora de corriente se calcula con la siguiente expresión:

$$R_{11} = \frac{V_{cc} - V_z}{I_z}$$

$$R_{11} = \frac{12V - 10V}{25mA}$$

$$R_{11} = 80\Omega$$

El valor de R11 es 82Ω

La figura 2.10 muestra las formas de onda simuladas, de la onda diente de sierra, del voltaje de referencia y de la señal de control para el circuito de potencia.

El circuito de control genera las señales de tipo PWM para activar el TRIAC. Esta señal permite garantizar el encendido del TRIAC debido a que este elemento sólo requiere de un pulso para activarse.

La figura 2.11 presenta la simulación de la forma de onda aplicada a la carga con un ángulo de disparo de 30° . La simulación se realiza con el circuito de control que se indica en la figura 2.12 y el circuito de potencia simulados.

El voltaje aplicado a la carga, es el voltaje de la red eléctrica tanto en amplitud como en frecuencia.

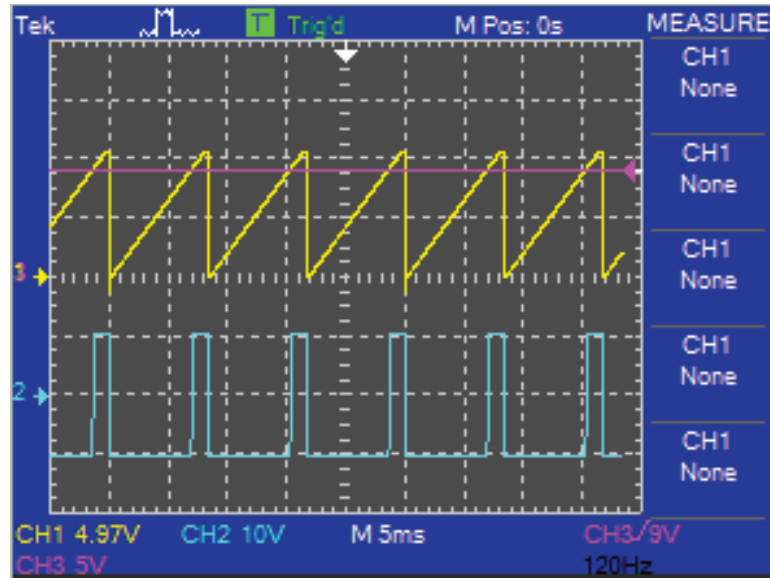


Figura 2.10 Formas de onda simulada del circuito comparador.

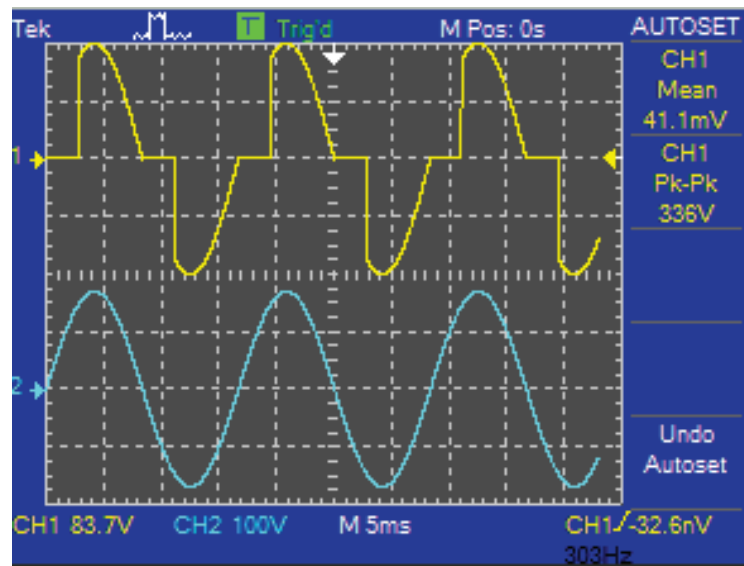


Figura 2.11 Simulación de la forma de onda de la fuente y de la carga del convertidor AC – AC.

La figura 2.12 muestra el diseño terminado del circuito de control con los valores correspondientes de los elementos.

2.2 DISEÑO DEL CIRCUITO MEDIDOR DE TEMPERATURA.

El circuito medidor de temperatura se encarga de medir la temperatura de la cámara de la planta, y obtener de la temperatura medida una señal de voltaje, que sea proporcional a la temperatura.

La variable temperatura monitoreada puede ser visualizada mediante el uso de un microprocesador o de un conversor análogo – digital. También con el circuito medidor de temperatura se puede realizar control en lazo cerrado sobre la variable monitoreada con el uso de controladores.

El circuito medidor de temperatura comprende cuatro etapas que se muestran en la figura 2.13.

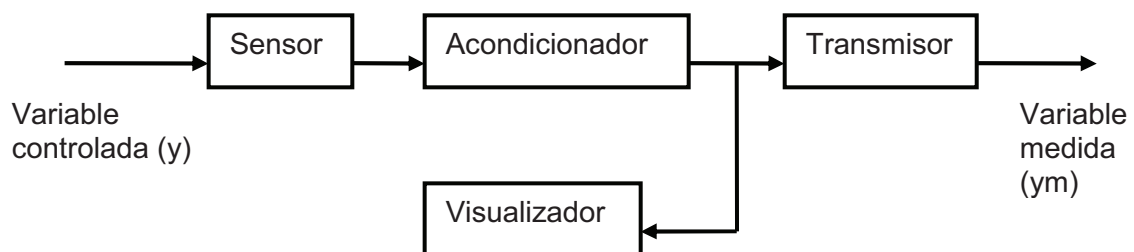


Figura 2.13 Diagrama de bloques del circuito medidor de temperatura.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR DE TEMPERATURA LM 35.

La variable controlada de la cámara es la temperatura. El rango de variación de la temperatura comprende desde la temperatura ambiente hasta $100^{\circ}C$.

En la medición de temperatura, el sensor es el elemento que mide una señal física, en este caso la temperatura, para obtener una señal eléctrica.

Dentro de los sensores de temperatura se encuentran los sensores de estado sólido, el sensor de temperatura escogido es el Lm35 debido al rango de en el que se requiere medir la temperatura de la cámara y a la humedad.

La serie Lm35 son sensores de temperatura integrados, el voltaje de salida es lineal y proporcional a la temperatura en grados centígrados. El Lm35 no requiere de calibración externa ya que el sensor está calibrado internamente en grados centígrados, su no linealidad es típicamente de $\pm 1/4^{\circ}C$ y de $\pm 3/4^{\circ}C$ cuando se utiliza en la máxima escala de funcionamiento $-55^{\circ}C$ hasta $+150^{\circ}C$.

La impedancia de salida del Lm35 y su salida lineal hacen que el circuito acondicionador sea pequeño y sencillo.

Características:

- Calibración directa a grados centígrados.
- Factor de escala de $10mV/^{\circ}C$ lineal.
- Rango máximo de medición $-55^{\circ}C$ hasta $+150^{\circ}C$.
- Bajo costo.
- Capacitado para aplicaciones remotas.
- Voltaje de operación de $4V$ hasta $30V$
- Corriente de drenaje menor de $60\mu A$
- Autocalentamiento del sensor $0.08^{\circ}C$ en aire estacionario.
- Nolinealidad típica de $1/4^{\circ}C$
- Baja impedancia de salida 0.1Ω para una corriente de carga de $1mA$

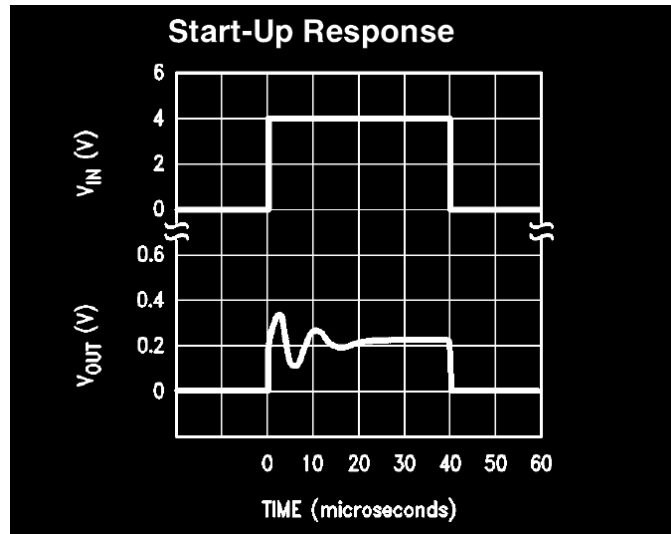


Figura 2.14 Respuesta del sensor ante la polarización de voltaje.

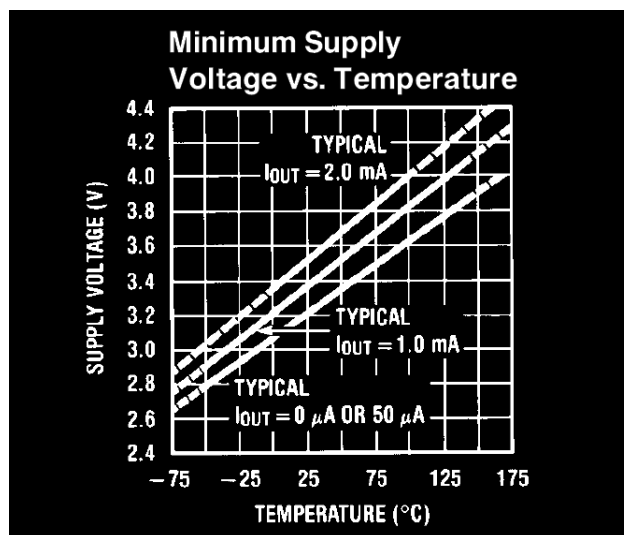


Figura 2.15 Voltaje mínimo de polarización para obtener el voltaje de salida.

La figura 2.15 muestra el voltaje de polarización mínimo, entonces el voltaje de polarización utilizado es de $V_{CC} = 5V$.

La configuración del sensor se muestra en la figura 2.16.

Para el control se utiliza un rango de voltaje de $0-10V$ y cuando la temperatura es $0^{\circ}C$ el voltaje del sensor es $0V$; el circuito medidor de temperatura tiene como ganancia total $G_{acond} = 10$, conformada en dos etapas.

Ya que el sensor tiene una baja impedancia a la salida, no se necesita de un acoplador de impedancia con un circuito seguidor.

El circuito acondicionador utilizado se basa en amplificadores operacionales conectados en cascada de dos etapas, para obtener la señal acondicionada de la realimentación, y otra señal acondicionada para la visualización de la temperatura.

La configuración de los amplificadores operacionales es amplificador inversor ya que presenta mejores características especialmente en acople de impedancias.

$$G_{acond} = G_{a1}G_{a2}$$

G_{acond} : Ganancia total del acondicionador.

G_{a1} : Ganancia de la primera etapa del acondicionador.

G_{a2} : Ganancia de la segunda etapa del acondicionador.

Las ganancias $G_{a1} = -2$, $G_{a2} = -5$.

El Diseño del acondicionador se presenta a continuación:

Primera etapa:

$$G_{a1} = -2 = -\frac{R_1}{R_2} ; \text{(amplificador inversor)}$$

Sea: $R_1 = 20K\Omega$; entonces el valor de R_2 es:

$$R_2 = 10K\Omega$$

Segunda etapa:

$$G_{a2} = -5 = -\frac{R_3}{R_4}; \text{ (amplificador inversor)}$$

Sea: $R_3 = 20K\Omega$; entonces el valor de R_4 es:

$$R_4 = 4K\Omega$$

Para realizar calibraciones dentro del circuito acondicionador, evitando o minimizando las señales erróneas se usa un potenciómetro de precisión de valor de $R_{V_1} = 5K\Omega$.

La señal del acondicionador para ser visualizada, tiene la siguiente ganancia:

$G_V = 5$, la obtención de una señal de 5V para una temperatura medida del sensor de $100^\circ C$.

Para no realizar otro circuito acondicionador, entonces la ganancia G_V es:

$$G_V = \frac{G_{acond}}{2}$$

La ganancia se obtiene por medio de un divisor de voltaje mediante potenciómetro colocado en la salida del circuito acondicionador anteriormente diseñado.

Para evitar el efecto de acople de impedancias, se coloca un circuito seguidor.

Para evitar voltajes medidos por el acondicionador, superiores a los establecidos, se coloca diodos zener evitando estos voltajes que podrían causar daños a los elementos de transmisión de las señales.

La figura 2.17 muestra el diagrama circuital de circuito acondicionador de la señal del sensor de temperatura LM35 para el circuito transmisor y para el visualizador de temperatura.

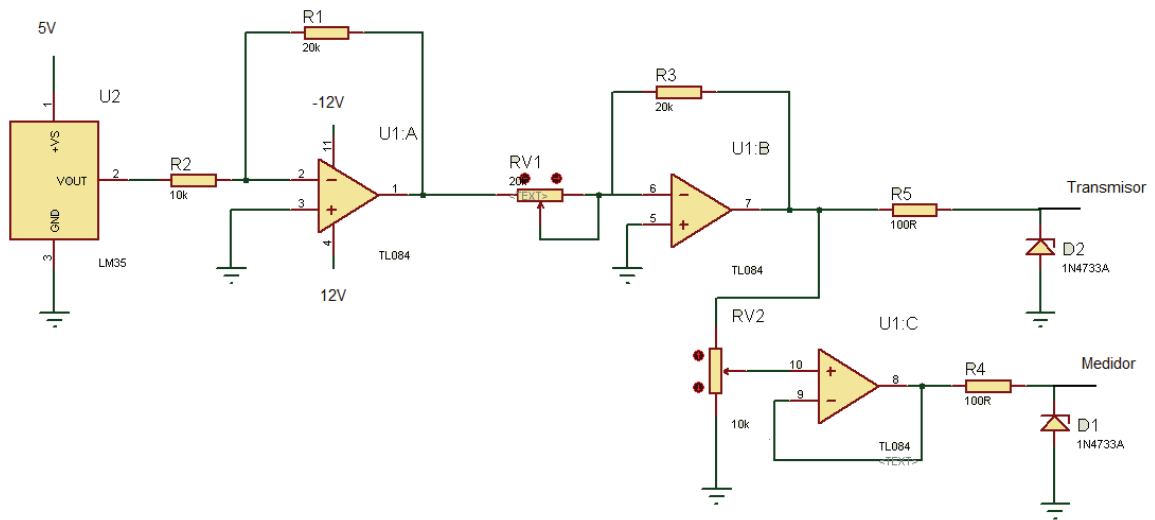


Figura 2.17 Circuito acondicionador del sensor LM35.

2.2.3 TRANSMISOR DE SEÑAL.

La transmisión de señales por corriente constante, es un método eficiente para la transmisión de señales analógicas.

La transmisión por voltaje presenta varios inconvenientes como la caída de voltaje en los cables de transmisión, o el ruido inducido por la EMI.

En la transmisión por corriente, la impedancia de los cables no afecta a la señal, también minimiza el efecto de ruido inducido al cable, por lo que la señal no es afectada.

Se escoge la transmisión por corriente en el circuito de medición. El rango de transmisión de corriente estándar es de: $4-20mA$ para los transmisores comerciales.

2.2.3.1 Transmisor AD694AQ (4-20mA Transmitter).

El circuito integrado AD694AQ maneja señales de alto nivel para obtener valores estándar de corriente $4-20mA$. Tiene la capacidad de programación del rango de entrada de voltaje que son precalibrados de $0-2V$, o $0-10V$. La entrada de voltaje puede ser amplificada. El voltaje de salida puede extenderse a 30V.

Características de máximos valores:

- Voltaje de polarización: 36V
- Voltaje de entrada: -0.3V hasta +36V
- Voltaje de alarma: 36V
- 4mA alarma on/off: 0V hasta +36V

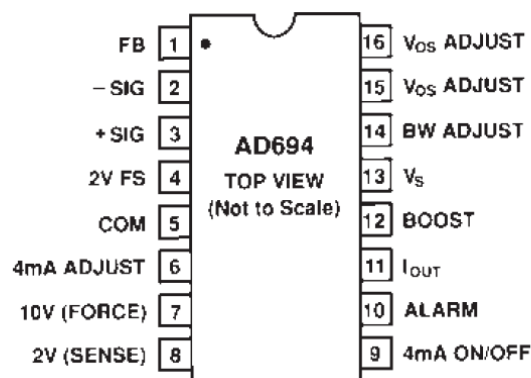


Figura 2.18 Distribución de pines del transmisor AD694AQ.

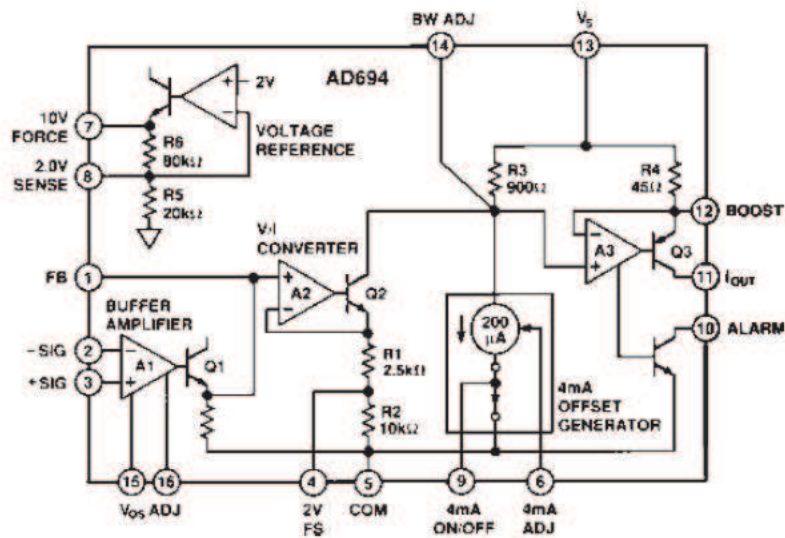


Figura 2.19 Diagrama de bloques del transmisor AD694AQ.

El Transmisor de corriente AD694AQ, permite realizar la conversión de una señal de voltaje que varía entre 0 -10V a una señal de corriente de 4 – 20mA, mediante la forma de conexión del transmisor.

La forma de conexión para obtener los valores de la señal que se requiere transmitir se muestra en la tabla 2.1.

| Input Range | Output Range | Voltage Reference | Min V_s | Pin 9 | Pin 4 | Pin 8 |
|-------------|--------------|-------------------|-----------|------------|-------|-------|
| 0-2 V | 4-20 mA | 2 V | 4.5 V | Pin 5 | Pin 5 | Pin 7 |
| 0-10 V | 4-20 mA | 2 V | 12.5 V | Pin 5 | Open | Pin 7 |
| 0-2.5 V | 0-20 mA | 2 V | 5.0 V | ≥ 3 V | Pin 5 | Pin 7 |
| 0-12.5 V | 0-20 mA | 2 V | 15.0 V | ≥ 3 V | Open | Pin 7 |
| 0-2 V | 4-20 mA | 10 V | 12.5 V | Pin 5 | Pin 5 | Open |
| 0-10 V | 4-20 mA | 10 V | 12.5 V | Pin 5 | Open | Open |
| 0-2.5 V | 0-20 mA | 10 V | 12.5 V | ≥ 3 V | Pin 5 | Open |
| 0-12.5 V | 0-20 mA | 10 V | 15.0 V | ≥ 3 V | Open | Open |

Tabla 2.1 Configuración de pines para calibración de señales de entrada – salida del AD694AQ.

La conexión tomada es:

4mA on - off (Pin9): referencia circuital.

2V fs (Pin4): abierto.

2V sense (Pin8): abierto.

La ganancia de voltaje de entrada al transmisor es de 1 por lo que los pines 1 y 2 van cortocircuitados.

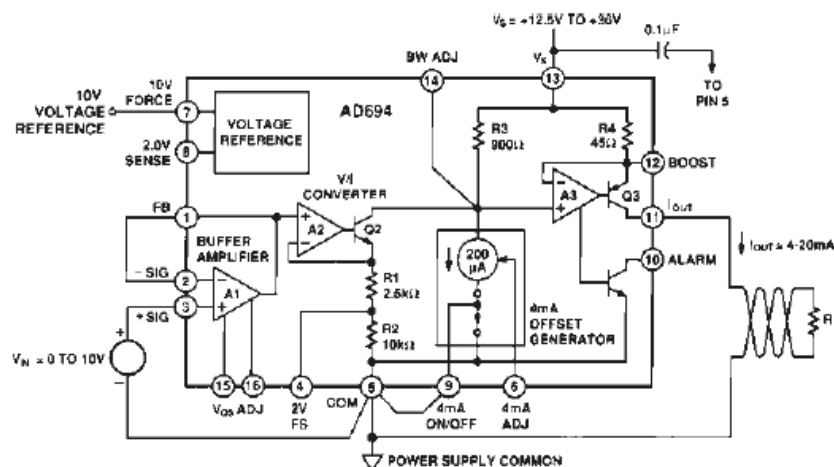


Figura 2.20. Conexión mínima del transmisor AD694AQ.

El transmisor AD694AQ, presenta también seguridad en el caso de que el circuito encargado de recibir la corriente del transmisor se desconecte o esté mal conectado, mediante una señal que avisa en este tipo de casos.

La salida de alarma es de forma digital en el pin 10 (alarm); este pin es de salida a colector abierto, por lo que requiere de una resistencia de pull-up.

La señal de alarma es conectada a una compuerta inversora digital (TTL 7404). Esta señal puede ser utilizada para dos tipos de indicadores:

- Indicador visual.
- Indicador auditivo.

En el caso del circuito visualizador de alarma se utiliza un microcontrolador que indique la señal de falla en la transmisión de corriente. Este circuito será analizado y desarrollado en el diseño del circuito visualizador de variables.

El circuito auditivo tiene como fin entregar señales auditivas en caso de falla de la transmisión de la corriente. Este circuito contiene una salida tipo relé para colocar un indicador auditivo adicional al indicador visual incorporado. La figura 2.23 muestra el circuito para un indicador auditivo (zumbador de 12V).

Con la configuración de voltaje de entrada $0-10V$ para obtener la corriente de $4-20mA$, se toma en cuenta las características de la carga, como la impedancia generada por los cables transmisores de la señal y el valor de resistencia de la carga al otro extremo del transmisor.

Los cables de transmisión presentan a largas distancias características inductivas, por lo que se usa el siguiente circuito que se describe a continuación.

Las inductancias parásitas generadas llevan a picos de voltaje debido a variaciones de corriente $\frac{di}{dt}$, especialmente al iniciar la transmisión de la señal, generando posibles variaciones que afecten el funcionamiento correcto del transmisor.

La solución es colocar un diodo en la salida del transmisor y evitar el retorno de corriente al transmisor, como indica la figura 2.21.

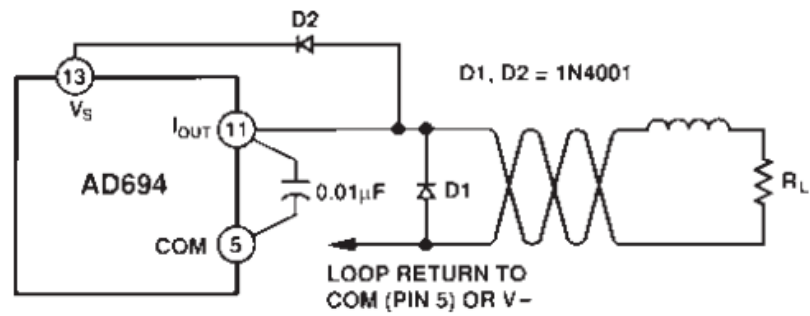


Figura 2.21 Impedancia generada para la salida del transmisor.

El valor de la resistencia colocada en el sentido del valor de corriente que envía el transmisor es función del voltaje de polarización del transmisor, se determina por medio de la siguiente fórmula:

$$R_L (MAX) = \frac{(V_S - 2V)}{20mA}$$

$R_L (MAX)$: Resistencia de carga máxima vista por el transmisor.

V_S : Voltaje de polarización del transmisor.

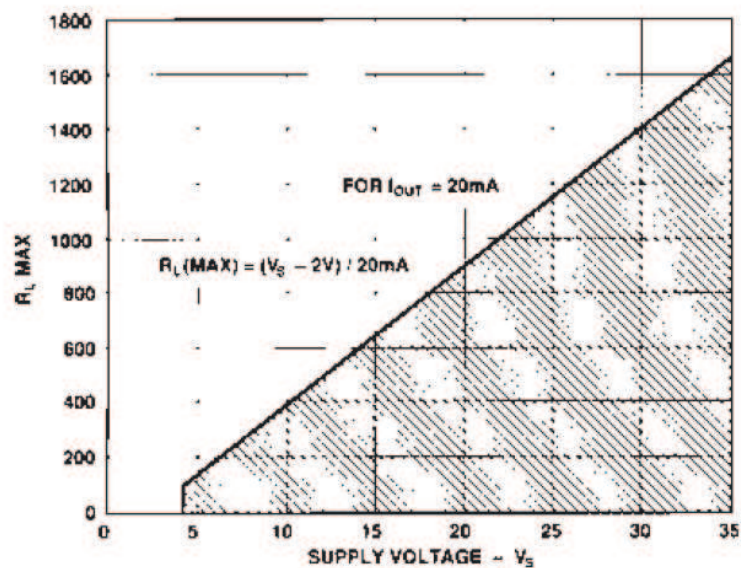


Figura 2.22 Resistencia máxima de carga vs. Voltaje de polarización.

La figura 2.22, representa el rango de variación de la carga en función del voltaje de polarización que tolera el transmisor.

Aplicando la fórmula anterior se obtiene el valor de resistencia máxima de carga de la siguiente manera:

Para un voltaje de polarización de: $V_S = 12V$

$$R_L (MAX) = \frac{(12V - 2V)}{20mA}$$

$$R_L (MAX) = 500\Omega$$

El voltaje máximo sobre la resistencia es:

$$V_{R_L} MAX = 500\Omega \times 20mA$$

$$V_{R_L} MAX = 10V$$

El voltaje mínimo sobre la resistencia es:

$$V_{R_L} MIN = 2V$$

Entonces: el valor de resistencia de carga es: $R_L = 500\Omega$

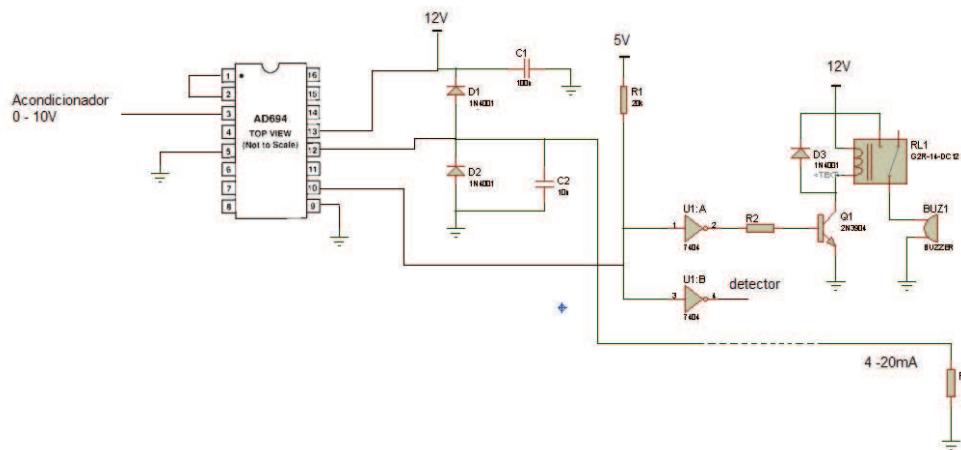


Figura 2.23 Circuito transmisor de corriente 4-20mA con detección de circuito abierto.

2.3 DISEÑO DEL CIRCUITO VISUALIZADOR DE VARIABLES.

Las señales del controlador para generar el ángulo de disparo para el circuito de potencia, el voltaje aplicado a la lámpara y la temperatura dentro de la cámara son señales que a más de ser controlas tienen que ser visualizadas.

Las señales para realizar la medición son:

- Temperatura de la cámara.
- Ángulo de disparo.
- Voltaje RMS aplicado a la lámpara.

La medición de variables se realiza utilizando varias técnicas, como medición por frecuencia, por voltaje, por corriente, por resistencia, etc. En este caso para la medición por voltaje DC se utiliza dispositivos analógicos o digitales.

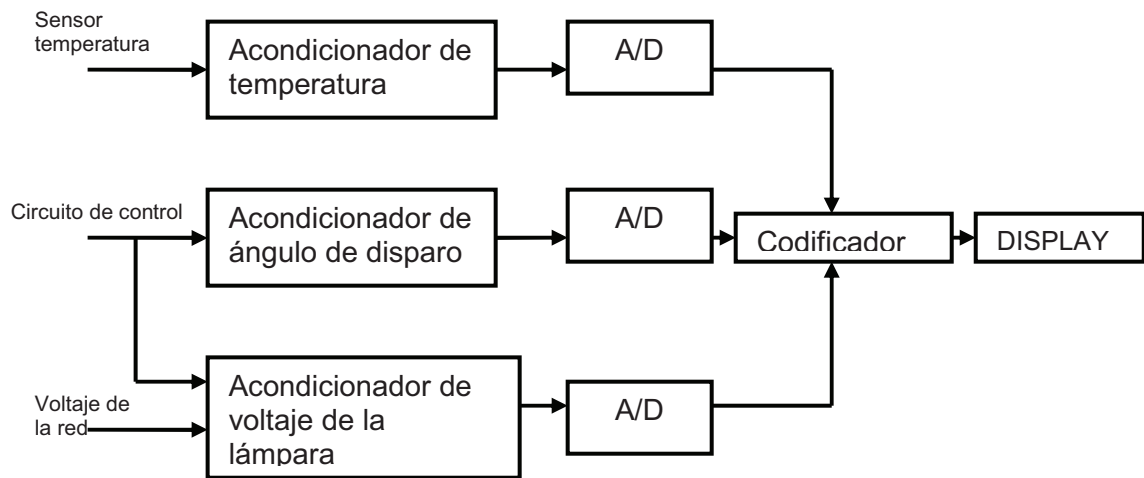


Figura 2.24 Diagrama de bloques del visualizador de señales.

Los circuitos acondicionadores de señal son los que permiten tener las señales de voltaje dentro del rango de lectura del conversor análogo – digital.

El conversor análogo – digital permite tomar una señal analógica de voltaje y representarla en un valor numérico.

Los conversores manejan los niveles de voltaje TTL, por lo que el voltaje del acondicionador tiene que estar en el rango de 0-5V.

2.3.1 CIRCUITO ACONDICIONADOR DE TEMPERATURA.

El circuito acondicionador de temperatura diseñado, figura 2.17 tiene niveles de voltaje de 0–10V para un rango de temperatura de 0–100°C respectivamente.

Los niveles de voltaje requerido para el conversor de 0–5V, por la que se utiliza un circuito amplificador de voltaje, o en su defecto un divisor de voltaje para evitar el uso de otro circuito amplificador innecesario. La figura 2.17 muestra el circuito acondicionador para el medidor de temperatura.

2.3.2 CIRCUITO ACONDICIONADOR DEL ANGULO DE DISPARO.

En el diseño del actuador, el voltaje de comparación de la rampa lineal determina en forma implícita el ángulo de disparo del convertor, como se observa en la figura 2.9.

El voltaje de comparación es el voltaje medido para determinar el ángulo de disparo, que proviene del circuito restador de la señal de referencia con el voltaje constante de 10V, figura 2.9.

De la misma forma del acondicionador de temperatura, el voltaje de comparación varía desde $0-10V$ para obtener el ángulo de disparo $0-180^\circ C$ respectivamente.

Se utiliza un divisor de voltaje para obtener el rango de voltaje $0-5V$, figura 2.25.

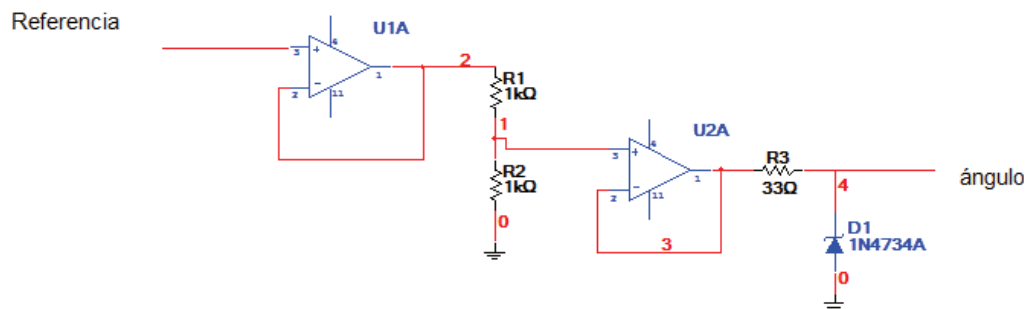


Figura 2.25. Circuito acondicionador para la visualización del ángulo de disparo.

Para el diseño de este circuito se requiere de dos circuitos seguidores de voltaje para acople de impedancias, y el diodo zener tiene como objetivo limitar el voltaje de entrada al convertor al valor de 5V como máximo, y también evitar voltajes negativos.

La resistencia de Zener es de valor bajo para evitar caídas de voltaje y eliminar medidas erróneas.

2.3.3 CIRCUITO ACONDICIONADOR DEL VOLTAJE APLICADO A LA LÁMPARA.

En el control de fase directo, las variables para obtención del voltaje RMS aplicado a la carga son:

- Ángulo de disparo.
- Voltaje máximo de la fuente.

Representado por medio de la siguiente fórmula: [2]

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} (V \max \operatorname{sen}(wt))^2 dwt + \int_{\alpha+\pi}^{2\pi} (V \max \operatorname{sen}(wt))^2 dwt \right]$$

Resolviendo la expresión se obtiene:

$$V_{rms} = V \max \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{4\pi} + \frac{\operatorname{sen}(2\alpha)}{2\pi}}$$

Donde α se mide en radianes.

Para el acondicionamiento del voltaje máximo de la fuente, primero se disminuye el voltaje de la red por medio de un transformador.

El transformador utilizado es el que se encuentra en el circuito detector de cruce por cero, figura 2.4. Tras pruebas realizadas se determinó que la relación de transformación del transformador es:

$$\frac{n_1}{n_2} = 8.67$$

Con el voltaje obtenido del transformador, el siguiente paso es la rectificación de voltaje por medio de un conversor AC – DC.

En el rectificador de voltaje de onda completa, la expresión de voltaje DC en función del voltaje máximo a la salida del transformador es:

$$V_{dc} = \frac{n_2}{\pi n_1} \int_0^{\pi} V_{\max} \text{Sen}(wt) dt$$

Resolviendo la expresión se obtiene:

$$V_{dc} = \frac{2}{8.67 \times \pi} V_{\max}$$

Para un voltaje de 118V RMS de la red eléctrica se tiene: [2]

$$V_{dc} = \frac{2}{\pi} \frac{118V \sqrt{2}}{8.67}$$

$$V_{dc} = 12.25V$$

Se toma un rango de variación de voltaje de línea de 100V – 130V RMS medible.

El voltaje máximo a la salida del transformador es:

$$V_{T \max_{130V}} = \frac{130V \sqrt{2}}{8.67}$$

$$V_{T \max_{130V}} = 21.2V$$

Para tener un voltaje máximo menor de 12V debido a la polarización de los amplificadores operacionales se coloca un divisor de voltaje.

Se toma un voltaje máximo de 11V para evitar la saturación del operacional, figura 2.26.

$$11V = 21.2V \frac{R_b}{R_a + R_b}$$

Utilizando un potenciómetro de $1K\Omega$.

$$R_b = \frac{11V * 1K\Omega}{21.2V}$$

$$R_b = 518\Omega$$

$$R_a = 482\Omega$$

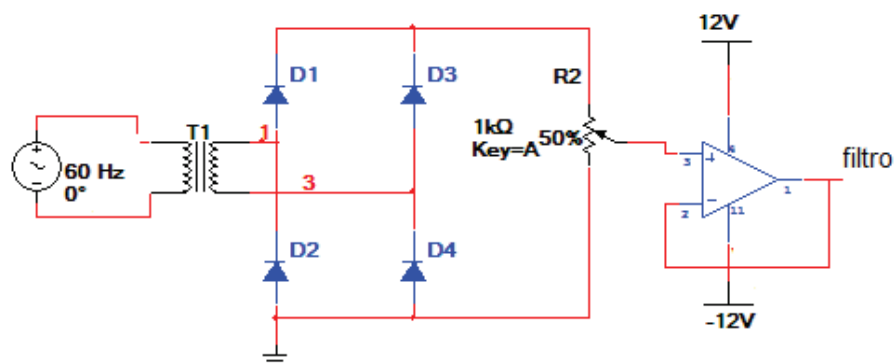


Figura 2.26 Circuito divisor de voltaje rectificado.

Con el voltaje rectificado, se filtra para obtener el voltaje DC de la señal rectificada. Para esto se utiliza un filtro activo de segundo orden (filtro Butterworth), en cascada con un filtro de primer orden figura 2.27.

La frecuencia del voltaje rectificado es $f = 120Hz$.

Para el diseño del filtro se toma esa frecuencia como frecuencia de corte.

$$f_c = 120\text{Hz}$$

Las fórmulas del filtro activo de segundo orden son las siguientes: [3]

$$C_a = \frac{0.9548}{2\pi f_c R}$$

$$C_b = \frac{0.4998}{2\pi f_c R}$$

Tomando el valor de $C_a = 100\text{nF}$

$$R = \frac{0.9548}{2\pi(100\text{nF})(120\text{Hz})}$$

$$R = 12.6\text{K}\Omega$$

Sea $R = 10\text{K}\Omega$

$$C_b = \frac{0.4998}{2\pi(120\text{Hz})(10000\Omega)}$$

$$C_b = 66.2\text{nF}$$

Sea: $C_b = 47\text{nF}$

Realizando la simulación del circuito se obtiene la forma de onda filtrada mostrada en la figura 2.28.

Del voltaje obtenido del filtro de activo, esa señal se la vuelve a filtrar con un filtro de primer orden.

Se toma la frecuencia de corte de la señal $f_{c_2} = 10\text{Hz}$, eliminando el rizado del voltaje filtrado.

[3] FAULKENBERRY, Lucas. INTRODUCCIÓN A LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES CON APLICACIONES ACI LINEALES, LIMUSA, Grupo Noriega, 1992, México.

$$f_c = \frac{1}{RC}$$

$$C = \frac{1}{10\text{Hz}(10000\Omega)}$$

$$C = 10\mu\text{F}$$

El filtro diseñado corresponde a un filtro activo de tercer orden pasa bajos.

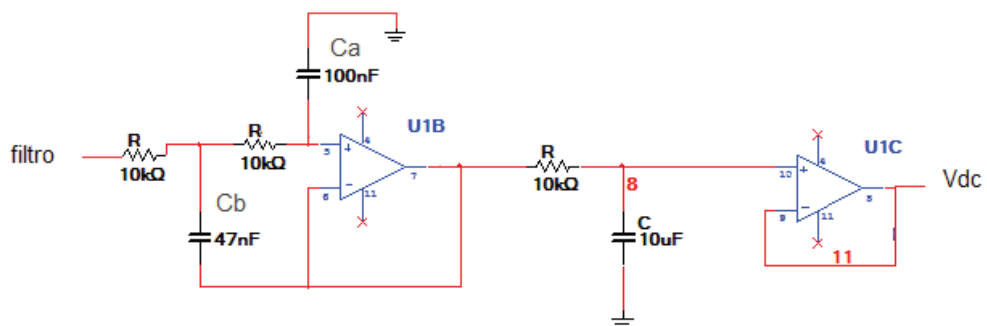


Figura 2.27 Filtro activo de tercer orden pasa bajos.

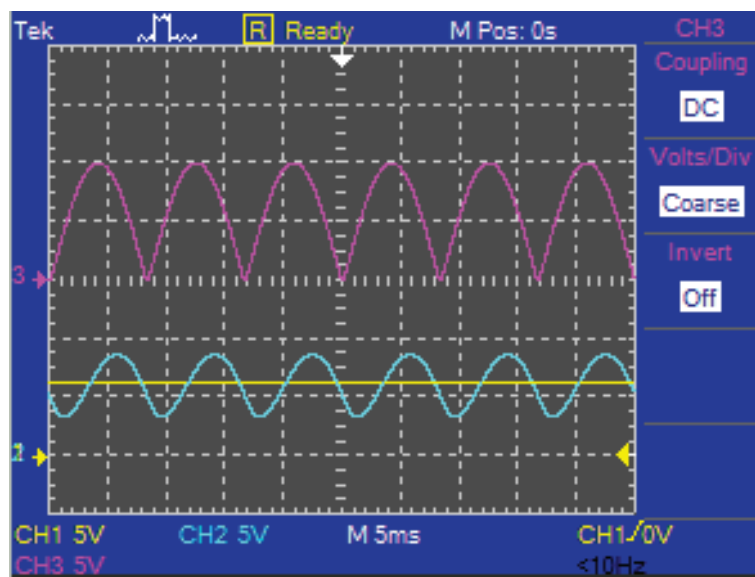


Figura 2.28 Simulación de filtro activo de tercer orden diseñado.

La figura 2.28 muestra las señales del rectificador (3), la señal filtrada del filtro Butterworth (2), y la señal 1 es la señal filtrada a la salida del filtro de tercer orden.

Con la obtención del voltaje DC de la señal rectificada se toma el rango de variación de voltaje de 100V – 130V RMS para tener un voltaje de 0 – 5V respectivamente. La figura 2.29 presenta el acondicionador del voltaje filtrado, para obtener el voltaje acondicionado a partir del voltaje máximo de la red.

El voltaje máximo del puente rectificador para el voltaje de 100V es:

$$V_T \max_{100V} = 16.31V$$

El voltaje a la salida del divisor de voltaje es:

$$V \max_{Rb} = 16.31 \frac{518\Omega}{1000\Omega}$$

$$V \max_{Rb} = 8.45V$$

El voltaje a la salida del filtro es:

$$Vdc_{\min} = \frac{2}{\pi} 8.45V$$

$$Vdc_{\min} = 5.38V$$

Se realiza los mismos cálculos para obtener el voltaje DC cuando el voltaje de la red es de 130V:

$$Vdc_{\max} = 7V$$

Para obtener un voltaje de 0v cuando el voltaje mínimo es de 5.38V, se utiliza un circuito restador de voltaje.

El voltaje de salida de restador cuando el voltaje es 7V es:

$$V_{dc_{\max}} - 5.38V = 1.62V$$

Para obtener el voltaje 5V, se requiere de un amplificador de voltaje con una ganancia de:

$$G = \frac{5V}{1.62V}$$

$$G = 3.09$$

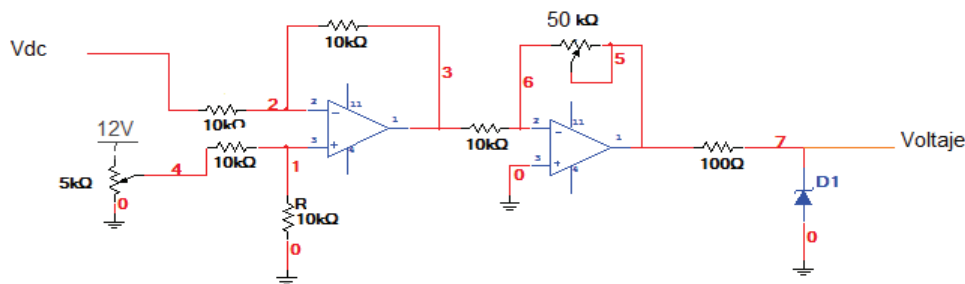


Figura 2.29 Diseño del circuito generador de la señal acondicionada de voltaje.

El diseño del circuito de la figura 2.29 realiza la resta del voltaje constante con el voltaje DC resultando un voltaje negativo; con el amplificador inversor se obtiene el voltaje deseado.

El Zener y la resistencia limitan el voltaje superior a 5.1V y eliminan los voltajes negativos.

2.3.4 CODIFICADOR DE LAS SEÑALES ACONDICIONADAS.

En esta etapa del circuito, la visualización requiere la conversión de las señales de análogo a digital para poder procesarlas. Se hace uso de un microcontrolador que contenga el conversor análogo-digital para disminuir la complejidad del hardware del diseño del circuito.

Se escoge el microcontrolador PIC16F873 que tiene las siguientes características principales:

- Frecuencia de operación: $DC - 20MHz$
- Memoria de programa: $4K$ de palabras de 14 bits
- Memoria de datos: $192Bytes$
- Memoria EEPROM: $128Bytes$
- Puertos: A, B, C
- Timers: 3
- Conversor A/D: 5 canales de 10 bits
- Comparadores análogos: 0
- Set de instrucciones: 35 RISC
- 28 pines
- Polarización 5V

El microcontrolador se encarga de la conversión de los voltajes acondicionados y procesamiento de las señales de temperatura, ángulo de disparo y voltaje RMS aplicado a la carga.

La visualización de los parámetros se realiza por medio de cuatro displays de 7 segmentos en configuración de barrido.

La temperatura, el ángulo de disparo y el voltaje RMS aplicado a la lámpara se muestran en forma individual, para lo cual por medio de pulsantes se puede escoger cual de estos parámetros quiere que se presente en los displays.

La visualización de la temperatura de la cámara toma en cuenta la conversión. Se configura al microcontrolador para leer el valor del acondicionador de temperatura $0 - 5V$ para obtener un valor de conversión de $0 - 1023$ de valor numérico.

Se toma al conversor el tamaño de 8 bits para la conversión obteniendo $0 - 255$, para una temperatura de $0 - 125^{\circ}C$ respectivamente.

Como el voltaje acondicionado es directamente proporcional a la temperatura, no se requiere compensación para linealizar la variable, por lo que, el valor numérico

como resultado de la conversión es lineal a la temperatura y se obtiene el valor de temperatura por medio de una división.

La visualización del ángulo de disparo utiliza el mismo criterio que para la temperatura.

La visualización del voltaje aplicado a la lámpara, la obtención de este valor es más complejo, debido a que el voltaje RMS del convertor de fase directo es función del voltaje pico de la señal de la red y del ángulo de disparo del actuador.

$$V_{rms} = f(V_{max}, \alpha)$$

El voltaje RMS aplicado a la lámpara es:

$$V_{rms} = V_{max} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{4\pi} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2\pi}} \quad [^2]$$

Donde α se mide en radianes.

Una forma de obtener el valor de voltaje RMS es incorporando al microcontrolador la ecuación, pero este método es muy complejo en programación.

Otro método es el uso de tablas que es más sencillo que el método anterior. Funciona con los valores del convertor del ángulo de disparo y del voltaje. Una vez con el valor de los convertidores se apunta al valor de la tabla correspondiente. La ecuación disminuye a una expresión más fácil de manejar.

Considerando la siguiente expresión:

$$V_{rms} = X * Y \quad \text{donde:}$$

$$X = V_{max}$$

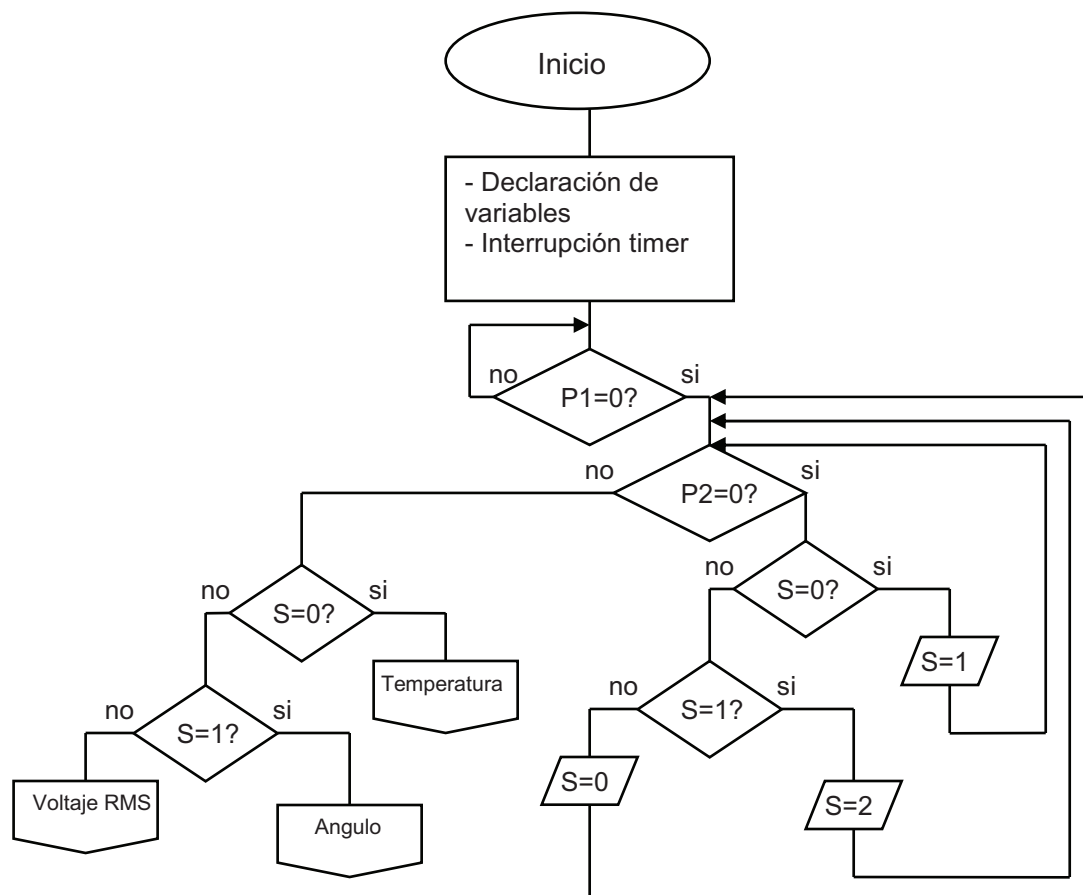
$$Y = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{4\pi} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2\pi}}$$

Las tablas se realizan utilizando Excel e introduciendo las ecuaciones.

Para el valor de voltaje máximo de la red, se toma el voltaje acondicionado del voltaje máximo, y de la expresión Y que se encuentra en función del ángulo de disparo, se toma el voltaje acondicionado del ángulo de disparo. Con estos dos valores de voltaje se realiza la digitalización, y se traduce por medio de tablas para obtener directamente el valor de X e Y.

Se realiza la multiplicación y se muestra en los displays.

El diagrama de flujo muestra la ejecución del programa del microcontrolador.



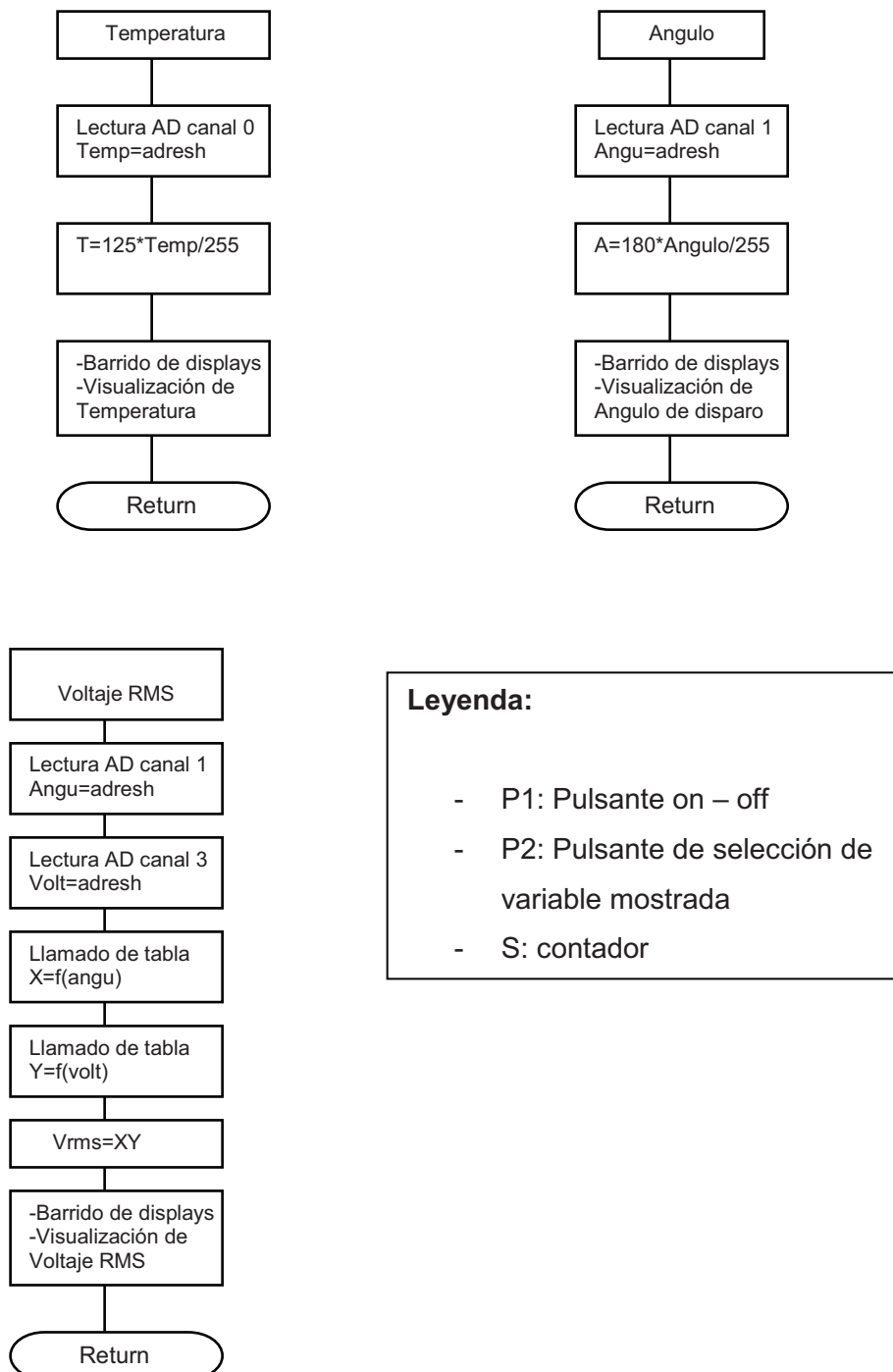


Figura 2.30 Diagrama de flujo del funcionamiento del microcontrolador medidor de variables.

Con el diagrama de flujo se procede a la realización del programa de control. El programa se realiza en el compilador MICROCODE STUDIO que maneja lenguaje

de alto nivel para los microcontroladores MICROCHIP. Facilitando la programación.

En el CD adjunto del proyecto, se encuentra el programa de control del visualizador de variables.

La simulación del visualizador de variables se realiza en el programa PROTEUS 6.9. La figura 2.31 muestra el diagrama lógico y la simulación del funcionamiento del programa del circuito visualizador de variables del módulo de temperatura.

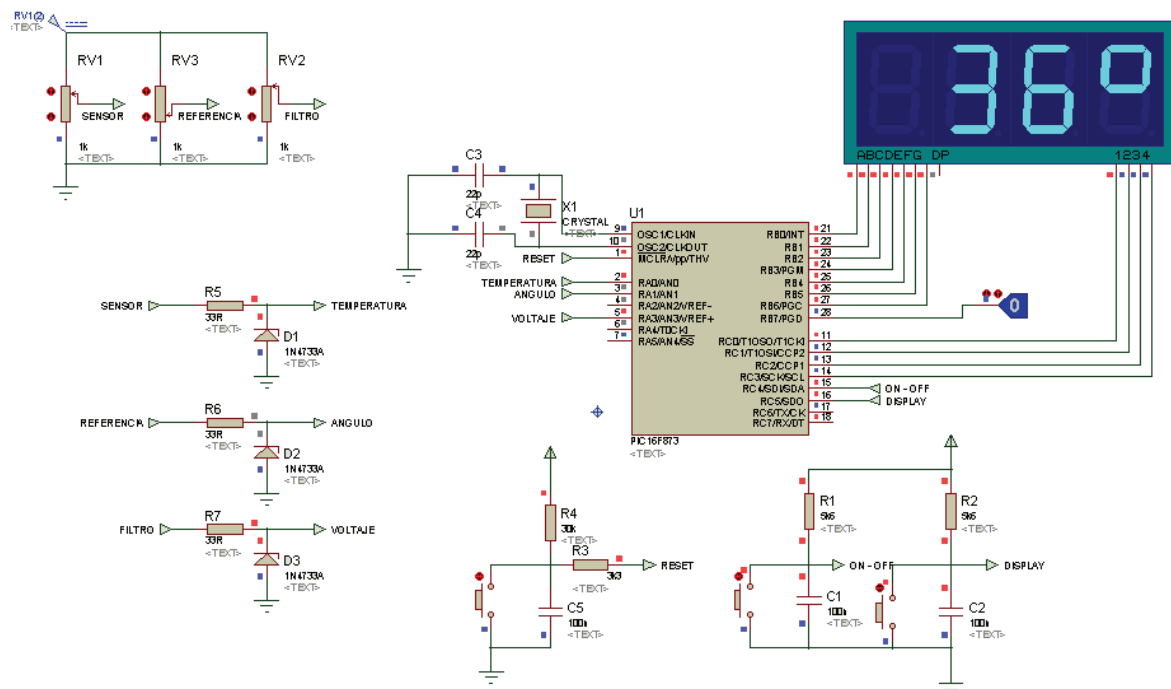


Figura 2.31 Diagrama lógico del circuito visualizador de variables.

2.4 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE TEMPERATURA.

2.4.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS TARJETAS.

Dentro de la construcción del módulo de temperatura, la construcción de las tarjetas de los circuitos diseñados se realiza en base a un programa computacional para ruteo de circuitos impresos.

El programa utilizado en esta ocasión es el EAGLE 4.11. El cual contiene todo lo necesario para la construcción de circuitos impresos, tanto los circuitos de control como de potencia, y brinda facilidades en ruteo simple y a doble lado.

Todos los circuitos diseñados, se dividen en tres tarjetas que tienen similares dimensiones, pero no la misma complejidad, para obtener un mejor diseño en lo que refiere a la construcción del módulo.

Los circuitos se dividen en las siguientes tarjetas:

- Tarjeta 1 (Actuador).
- Tarjeta 2 (Visualizador).
- Tarjeta 3 (Transmisor).

La tarjeta 1 incluye los siguientes circuitos: Circuito de potencia, circuito de disparo completo, circuito acondicionador de ángulo de disparo, circuito acondicionador de voltaje aplicado a la lámpara y circuito de selección de control en lazo abierto y control externo.

La tarjeta 2 se compone del circuito de visualización de variables del módulo de temperatura, incluyendo el microcontrolador, circuitos de protección y salida de datos hacia los displays.

La tarjeta 3 se compone de: circuito de acondicionamiento de temperatura, para el transmisor y para el microcontrolador con sus respectivas protecciones contra sobre voltaje; el circuito transmisor de corriente y el circuito de detección contra circuito abierto en el transmisor.

Las tarjetas 2 y 3, están ruteadas a un solo lado. La tarjeta 1 se encuentra ruteada en ambos lados, debido a su mayor complejidad y cantidad de elementos.

Dentro de la planta existen dos tarjetas más para el manejo de los displays y para un puerto adicional dentro del módulo.

El anexo C muestra los circuitos esquemáticos y el ruteado de las tres tarjetas que componen los circuitos del módulo de temperatura.

2.4.2 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO.

La planta está construida en un módulo de madera triplex de 9mm de espesor para todos los lados de la caja, a excepción de la tapa frontal del compartimiento de los circuitos electrónicos.

La forma y las dimensiones del módulo se muestran en la figura 2.32. La caja consta de dos compartimientos, uno para la circuitería, y el otro para la cámara de temperatura propiamente dicha. La división de los dos compartimientos está hecha de madera triplex del mismo espesor de las paredes laterales de la caja.

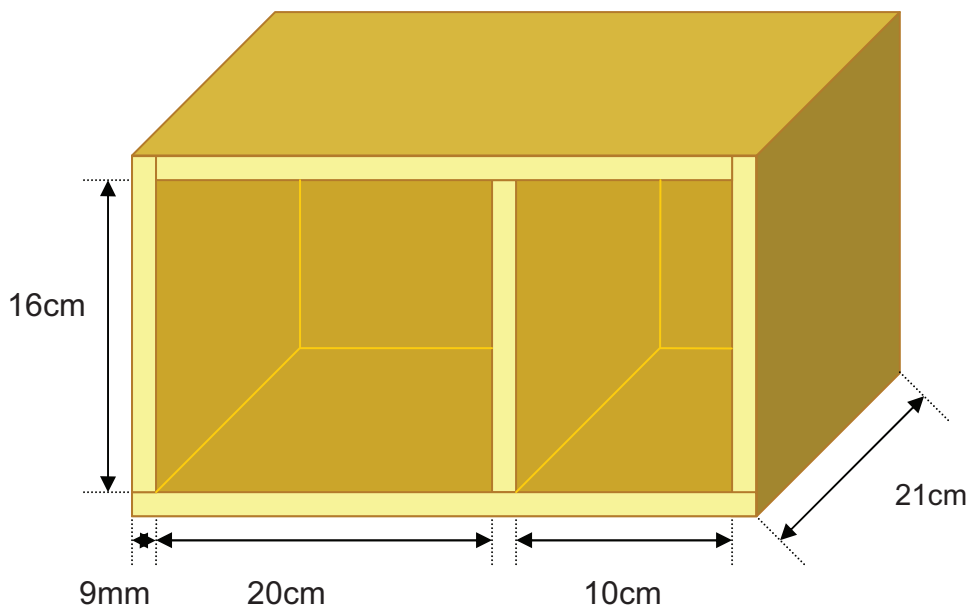


Figura 2.32 Dimensiones internas y espesor de las paredes del módulo de temperatura.

2.4.2.1 Compartimiento de los circuitos.

En el compartimiento izquierdo de la caja, se encuentra todos los circuitos que componen el actuador, como también el circuito de acondicionamiento de la temperatura y del transmisor de corriente; además de todos los elementos de señalización externos.

Este se encuentra dividido en tres niveles uno para cada tarjeta diseñada con las dimensiones de cada una de ellas, tanto en largo y espesor como en la altura de los elementos que conforma cada una de la tarjetas como se muestra en la figura 2.33.

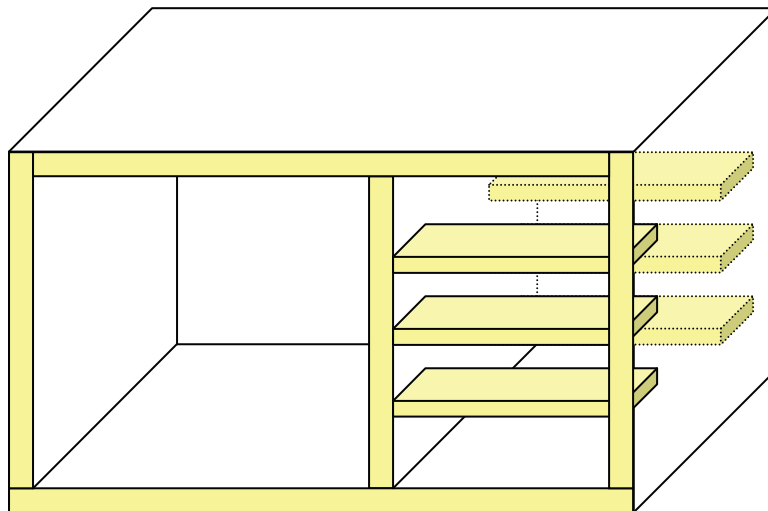


Figura 2.33 Niveles del compartimiento de los circuitos de la planta.

En la pared inferior de la caja se realizaron hendidias de ventilación, para el ingreso de aire frío hacia los circuitos, especialmente para el transformador y el TRIAC (elemento de potencia), a más del disipador, aprovechando de la posición de estos dos dispositivos que producen calentamiento dentro del módulo. Como se muestra en la figura 2.34.

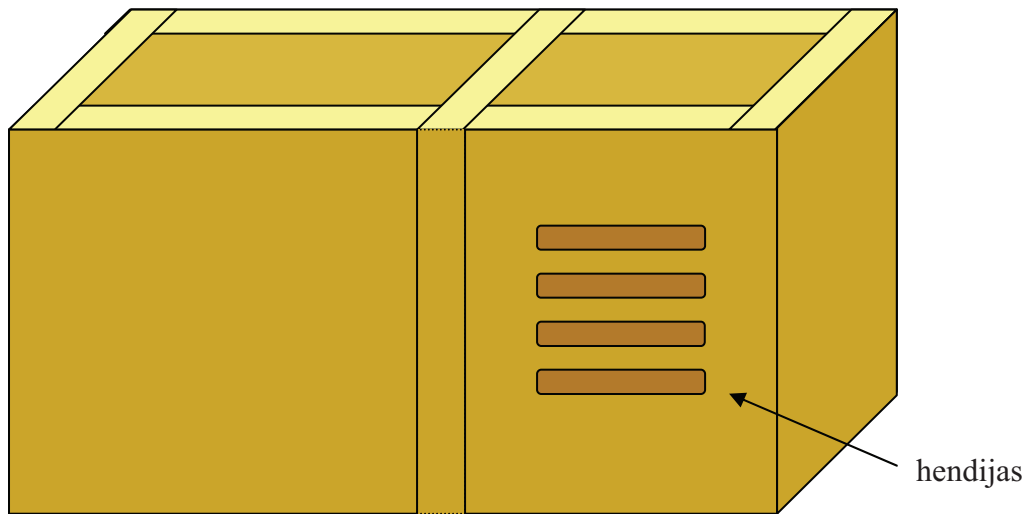


Figura 2.34 Parte inferior de la planta de temperatura.

Adicionalmente se tiene un agujero en la parte posterior de la caja donde se encuentra un ventilador.

2.4.2.2 Distribución de los elementos.

En la parte interior de la caja se encuentran las tarjetas que controlan al módulo, así como también los elementos adicionales. Las figuras 2.33 y la 2.35 muestran la distribución interna del módulo. Así se tiene:

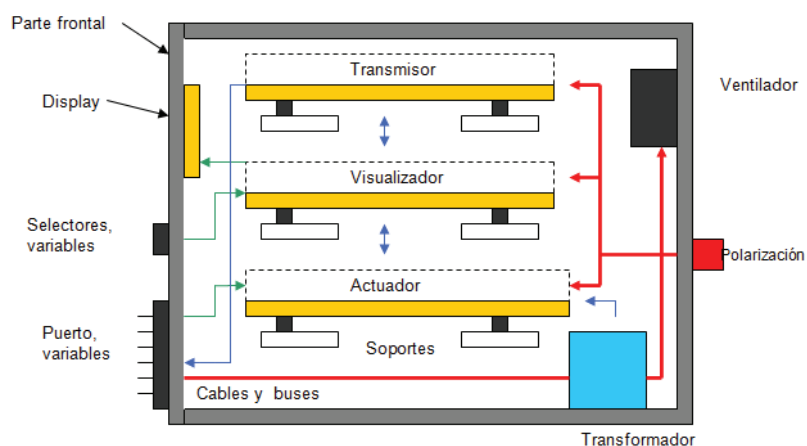


Figura 2.35 Distribución de las tarjetas y de los elementos internos del módulo (vista lateral).

- **Display.** Esta tarjeta arregla la distribución de pines del display multiplexado y permite la conexión con la tarjeta 2.
- **Puerto, variables.** Esta tarjeta ayuda a distribuir de forma ordenada los voltajes de polarización a cada tarjeta, enviar y recibir las señales de control hacia las tarjetas 1, 2 y 3.
- **Soportes.** Son sujetadores que mantienen suspendidas a las tarjetas evitando el contacto entre ellas.
- **Transformador.** Disminuye el voltaje y lo aísla, permitiendo al actuador realizar la comparación de voltaje y permite medir el voltaje de la red por parte de la tarjeta de visualización.
- **Cables y Buses.** Llevan los voltajes de polarización hacia las tarjetas y también la información de las variables medidas, las de control y de las controladas.
- **Actuador.** Esta tarjeta contiene el circuito de disparo, el circuito de potencia y el circuito de acondicionamiento con sus respectivos filtros, del ángulo de disparo y del voltaje aplicado a la lámpara para el circuito visualizador.
- **Transmisor.** Esta tarjeta contiene los circuitos de acondicionamiento de señal, proveniente del sensor de temperatura, para el transmisor y para el circuito visualizador y también contiene el circuito transmisor de señales de corriente con su respectivo circuito de alarma de detección de circuito abierto en el transmisor de corriente.
- **Visualizador.** Esta tarjeta contiene el circuito de visualización de las variables acondicionadas por las tarjetas 1 y 3. Está con su circuito de protección por sobre voltaje y por voltajes negativos; también conforma el

circuito de control para el barrido de los displays y de las entradas de los selectores de variables.

En la parte exterior del módulo se encuentran todos los elementos de señalización, cuya distribución se representa en la figura 2.36.

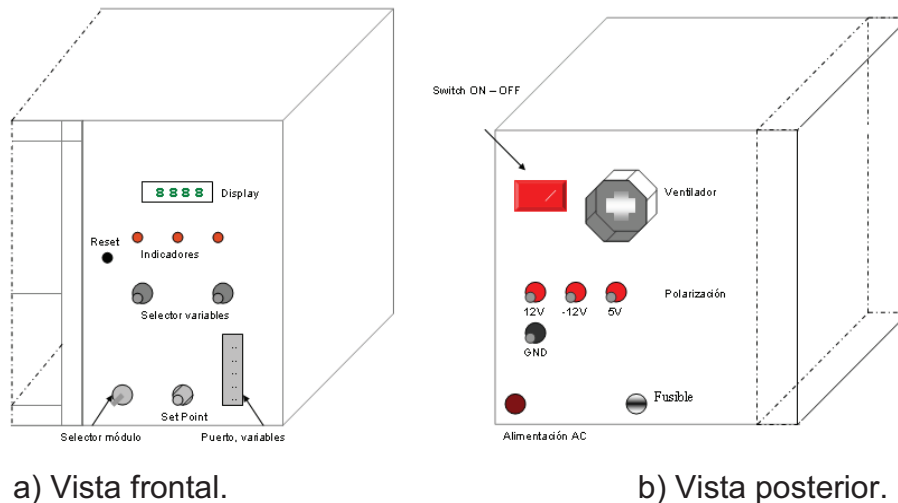


Figura 2.36 Distribución de los elementos de señalización del módulo de temperatura.

Los elementos de señalización se describen a continuación:

- **Display.** Indica los valores de las variables controladas, Temperatura medida, ángulo de disparo, Voltaje RMS aplicado a la lámpara y señal de alarma por circuito abierto en el transmisor de corriente.
- **Indicadores.** Muestra que variable está actualmente visualizada por el display.
- **Reset.** Pulsador para reiniciar el programa del microcontrolador.
- **Selector Variables.** Pulsantes que permiten cambiar la variable visualizada en el display y apagarlo.

- **Selector Módulo.** Switch que permite seleccionar el control con un controlador exterior a través del puerto ó control en lazo abierto dentro del mismo módulo.
- **Set Point.** Referencia para realizar el control en lazo abierto directamente con el ángulo de disparo.
- **Puerto, Variables.** Por medio de un puerto de entrada-salida mostrado en la figura 2.37 se envía y recibe las señales necesarias, y se recibe los voltajes de alimentación, a excepción de la red eléctrica para el módulo, colocado en la parte frontal e inferior del mismo.

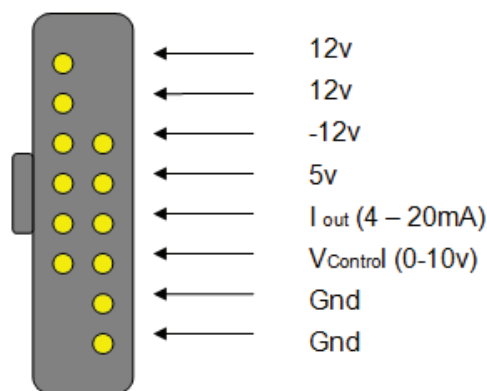


Figura 2.37 Puerto que envía y recibe las señales del módulo de temperatura.

Además se cuenta con entradas alternativas para el voltaje de polarización del módulo, en caso de que no se cuente con la toma del puerto, al realizar control en lazo abierto.

- **Switch ON-OFF.** Controla la entrada de voltaje aplicado a la carga. independientemente de la alimentación hacia todo el resto del circuito.
- **Ventilador.** Envía aire frío hacia las tarjetas y el transformador del módulo, a través de las hendiduras de la parte inferior del mismo.

- **Polarización.** Entradas de voltaje de alimentación hacia las tarjetas, en el caso de que no se utilice el puerto de variables de la parte frontal del módulo.
- **Alimentación AC.** Entrada de voltaje monofásico de la red eléctrica.
- **Fusible.** Protección contra cortocircuito por parte de la lámpara o por el TRIAC.

2.4.2.3 Compartimiento de la cámara de temperatura.

En el compartimiento de la izquierda de la figura 2.32 se encuentra la cámara de temperatura donde están la lámpara, el sensor de temperatura, y las protecciones adicionales dentro de la cámara para evitar la transferencia de calor a la parte exterior del módulo y al compartimiento donde se encuentra la circuitería.

Dentro de la cámara de temperatura se encuentran dos capas de aislante térmico de dos tipos distintos de materiales como se muestra en la figura 2.38.

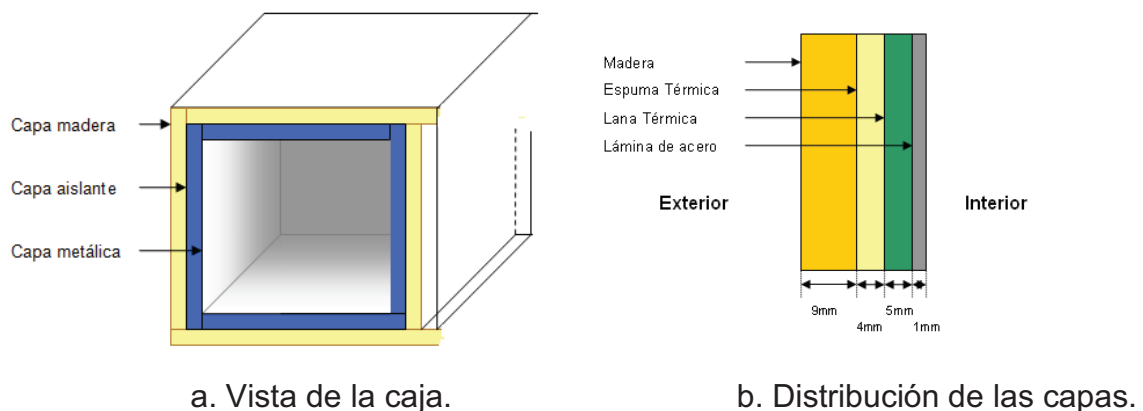


Figura 2.38 Distribución de las capas térmicas dentro de la cámara de temperatura.

Las capas se encuentran distribuidas en el orden como lo indica la figura 2.38 (b), y el espesor de ellas es uniforme en todas las paredes de la cámara de temperatura.

La lámina de latón se encuentra ensamblada en el interior de la cámara del módulo con el fin de tener una base dentro de la cámara, ésta se halla sujeta por pernos hacia el exterior de la caja por todos los lados de la caja a excepción de la pared de división de compartimientos.

La capa de lana térmica no se encuentra adherida a las otras capas con ningún pegamento, a diferencia de la capa de espuma térmica, que se encuentra adherida a la madera con pegamento blanco.

En la parte frontal, se encuentra una lámina de latón la cual se utiliza con el fin estético del módulo y evitar el manipuleo de las capas internas.

La lámpara se ubica en la parte inferior y centrada, la boquilla cerámica permite la tolerancia de la alta temperatura, y se encuentra fijada con tornillos a la caja; los cables utilizados son 14 AWG THW sólido, el aislante térmico de este cable soporta una temperatura de hasta 90°C, la distribución del cable se encuentra en la figura 2.39.

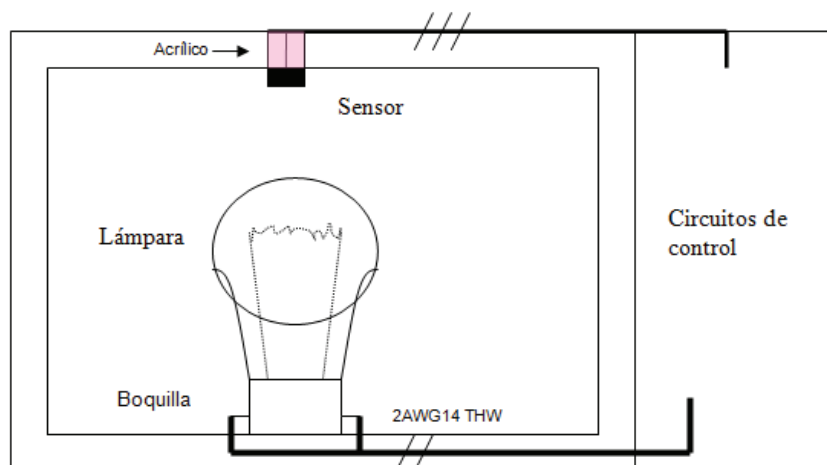


Figura 2.39 Distribución del elemento final de control y del sensor de temperatura.

El cable se encuentra entre en la capa de madera, para evitar la transferencia de calor hacia él, dándole protección adicional al aislamiento y al cable en sí.

El sensor se localiza en la parte superior de la cámara de temperatura, figura 2.39. Este se encuentra atornillado con la parte exterior de la caja, debido a la forma que tiene el sensor. Los pines de éste se encuentran aislados con la utilización de un recubrimiento de acrílico permitiendo el aislamiento del voltaje de polarización con la lámina de acero y del aumento de temperatura hacia los pines del sensor.

Los cables de alimentación y de la señal del sensor se encuentran aislados térmicamente con la cámara debido a su colocación, figura 2.39. Se encuentran en el exterior de la caja hasta llegar al compartimiento de la derecha.

El recubrimiento exterior de la caja es de papel contact, y los tornillos tienen un diámetro de 1/8" para todos los usos pertinentes.

En el anexo A se encuentra fotografías del módulo de temperatura.

2.5 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL MÓDULO DE TEMPERATURA.

Se detalla el presupuesto elaborado para el módulo de temperatura.

Para el análisis económico se considera únicamente el módulo como tal, es decir el costo de la mano de obra, las herramientas, diseño, o costos adicionales no se incluye en este análisis sino sólo el precio de los componentes y los materiales que conforman el módulo.

El costo del módulo de temperatura se divide en dos etapas detalladas a continuación:

2.5.1 COSTOS DE LAS TARJETAS

La distribución de todos los elementos y de los materiales que componen sólo las tarjetas del módulo de temperatura se presentan en forma individual para cada tarjeta.

Los precios de los elementos de cada tarjeta incluido IVA y el costo de cada tarjeta se describen a continuación:

| Tarjeta 1 (Actuador) | | | | |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Baquelita doble lado (10x20cm) | 1 | \$ 1,98 | \$ 1,98 |
| 2 | Cloruro Férrico | 3 | \$ 0,30 | \$ 0,90 |
| 3 | Acetato | 3 | \$ 0,20 | \$ 0,60 |
| 4 | Impresión Ruteo | 6 | \$ 0,05 | \$ 0,30 |
| 5 | Bornera 3P 5mm | 1 | \$ 0,30 | \$ 0,30 |
| 6 | Bornera 2P 5mm | 2 | \$ 0,25 | \$ 0,50 |
| 7 | zócalo 8P | 1 | \$ 0,05 | \$ 0,05 |
| 8 | Zócalo 14P | 3 | \$ 0,07 | \$ 0,21 |
| 9 | TL084 O-AMP | 3 | \$ 0,68 | \$ 2,04 |
| 10 | Potenciómetro de precisión G | 1 | \$ 0,80 | \$ 0,80 |
| 11 | Potenciómetro pequeño | 2 | \$ 0,30 | \$ 0,60 |
| 12 | Resistencias 1/4w | 25 | \$ 0,01 | \$ 0,25 |
| 13 | Puente de diodos | 1 | \$ 0,60 | \$ 0,60 |
| 14 | Condensador 100nF (104) | 2 | \$ 0,08 | \$ 0,16 |
| 15 | Diodos Zéner | 2 | \$ 0,10 | \$ 0,20 |
| 16 | Resistencia 2.7K 2w | 1 | \$ 0,25 | \$ 0,25 |
| 17 | TRIAC BT136 | 1 | \$ 0,80 | \$ 0,80 |
| 18 | Optotriac MOC3010 | 1 | \$ 0,50 | \$ 0,50 |
| 19 | Condensador 10uF | 2 | \$ 0,20 | \$ 0,40 |
| 20 | Diodos 1N4007 | 2 | \$ 0,05 | \$ 0,10 |

| | | | | |
|----|------------------------------|---|---------------|----------|
| 21 | Potenciómetro de precisión P | 2 | \$ 0,78 | \$ 1,56 |
| 22 | Conector 2p | 2 | \$ 0,23 | \$ 0,46 |
| 23 | Transistor 3904 | 1 | \$ 0,08 | \$ 0,08 |
| 24 | Conector 4P | 1 | \$ 0,39 | \$ 0,39 |
| 25 | Disipador | 1 | \$ 0,50 | \$ 0,50 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 14,53 |

Tabla 2.2 Costos de la tarjeta 1

| Tarjeta 2 (Visualizador) | | | | |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Baquelita un lado (10x20cm) | 1 | \$ 0,70 | \$ 0,70 |
| 2 | Cloruro Férrico | 2 | \$ 0,30 | \$ 0,60 |
| 3 | Acetato | 2 | \$ 0,20 | \$ 0,40 |
| 4 | Impresión Ruteo | 4 | \$ 0,05 | \$ 0,20 |
| 5 | Bornera 2P 5mm | 3 | \$ 0,25 | \$ 0,75 |
| 6 | Espadín doble 80P | 1 | \$ 1,60 | \$ 1,60 |
| 7 | Conector de baquelita 2P | 6 | \$ 0,23 | \$ 1,38 |
| 8 | Resistencias 1/4W | 25 | \$ 0,01 | \$ 0,25 |
| 9 | Transistor 3904 | 4 | \$ 0,08 | \$ 0,32 |
| 10 | Transistor 3906 | 7 | \$ 0,08 | \$ 0,56 |
| 11 | Zócalo 14P | 2 | \$ 0,07 | \$ 0,14 |
| 12 | Cristal 12MHz | 1 | \$ 0,30 | \$ 0,30 |
| 13 | Condensador 22pF | 2 | \$ 0,05 | \$ 0,10 |
| 14 | condensador 100nF | 3 | \$ 0,05 | \$ 0,15 |
| 15 | PIC16F873A | 1 | \$ 6,00 | \$ 6,00 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 13,45 |

Tabla 2.3 Costos de la tarjeta 2

| Tarjeta 3 (Transmisor) | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Baquelita un lado (10x20cm) | 1 | \$ 0,70 | \$ 0,70 |
| 2 | Cloruro Férrico | 2 | \$ 0,30 | \$ 0,60 |
| 3 | Acetato | 2 | \$ 0,20 | \$ 0,40 |
| 4 | Impresión Ruteo | 4 | \$ 0,05 | \$ 0,20 |
| 5 | Bornera 2P 5mm | 1 | \$ 0,25 | \$ 0,25 |
| 6 | Conector de baquelita 4P | 3 | \$ 0,39 | \$ 1,17 |
| 7 | conector de baquelita 2P | 2 | \$ 0,23 | \$ 0,46 |
| 8 | Diodos Zener 10V | 2 | \$ 0,10 | \$ 0,20 |
| 9 | Diodos 1N4007 | 3 | \$ 0,05 | \$ 0,15 |
| 10 | Resistencias 1/4W | 9 | \$ 0,01 | \$ 0,09 |
| 11 | Zócalo 14P | 3 | \$ 0,07 | \$ 0,21 |
| 12 | Zócalo 16P | 1 | \$ 0,10 | \$ 0,10 |
| 13 | Condensador 100nF | 2 | \$ 0,05 | \$ 0,10 |
| 14 | condensador 10uF (Electrolítico) | 2 | \$ 0,10 | \$ 0,20 |
| 15 | Transistor 3904 | 1 | \$ 0,08 | \$ 0,08 |
| 16 | Relé 12V 5P | 1 | \$ 0,65 | \$ 0,65 |
| 17 | Potenciómetro de precisión G | 1 | \$ 0,80 | \$ 0,80 |
| 18 | potenciómetro | 1 | \$ 0,30 | \$ 0,30 |
| 19 | TL084 O-AMP | 2 | \$ 0,68 | \$ 1,36 |
| 20 | TTL 7404HS | 1 | \$ 0,35 | \$ 0,35 |
| 21 | AD694AQ (Transmisor de corriente) | 1 | \$ 25,00 | \$ 25,00 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 33,37 |

Tabla 2.4 Costos de la tarjeta 3

| Tarjeta 4 (Puerto planta) | | | | |
|----------------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Baquelita 1 lado | 1 | \$ 0,35 | \$ 0,35 |
| 2 | Cloruro Férrico | 1 | \$ 0,30 | \$ 0,30 |
| 3 | Acetato | 1 | \$ 0,20 | \$ 0,20 |
| 4 | Impresión | 2 | \$ 0,05 | \$ 0,10 |
| 5 | Espadín Doble 80P | 1 | \$ 1,60 | \$ 1,60 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 2,55 |

Tabla 2.5 Costos de la tarjeta 4

| Tarjeta 5 (Display) | | | | |
|----------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Baquelita 1 lado | 1 | \$ 0,35 | \$ 0,35 |
| 2 | Cloruro Férrico | 1 | \$ 0,30 | \$ 0,30 |
| 3 | Acetato | 1 | \$ 0,20 | \$ 0,20 |
| 4 | Impresión | 2 | \$ 0,05 | \$ 0,10 |
| 5 | Espadín simple 40P | 0 | \$ 0,65 | \$ 0,00 |
| 6 | Zócalo 40P | 1 | \$ 0,20 | \$ 0,20 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 1,15 |

Tabla 2.6 Costos de la tarjeta 5

2.5.2 COSTOS DEL MÓDULO

Los costos del módulo comprenden todos los dispositivos eléctricos y electrónicos que se encuentren fuera de las tarjetas como el sensor de temperatura, la

lámpara, cables, pulsantes, displays, entre otros. También de otros componentes adicionales como la caja, los aislantes, etc.

| Dispositivos externos | | | | |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | LM35D (Sensor de temperatura) | 1 | \$ 3,50 | \$ 3,50 |
| 2 | Display multiplexados | 1 | \$ 0,93 | \$ 0,93 |
| 3 | Led rojo | 3 | \$ 0,06 | \$ 0,18 |
| 4 | Pulsantes grandes | 2 | \$ 0,20 | \$ 0,40 |
| 5 | Pulsante | 1 | \$ 0,08 | \$ 0,08 |
| 6 | Selector 3 posiciones | 2 | \$ 0,25 | \$ 0,50 |
| 7 | Potenciómetro | 1 | \$ 0,25 | \$ 0,25 |
| 8 | Perilla | 1 | \$ 0,10 | \$ 0,10 |
| 9 | Bus 16P | 1 | \$ 0,80 | \$ 0,80 |
| 10 | Conector de bus 16P | 2 | \$ 0,55 | \$ 1,10 |
| 11 | Cable Telefónico | 1 | \$ 0,50 | \$ 0,50 |
| 12 | Transformador 12V - 3ª | 1 | \$ 2,50 | \$ 2,50 |
| 13 | Ventilador 12vDC - 100mA | 1 | \$ 1,50 | \$ 1,50 |
| 14 | Porta Fusible + Fusible | 1 | \$ 0,25 | \$ 0,25 |
| 15 | Cable Gemelo #14 AWG TW | 3 | \$0,40 | \$ 1,20 |
| 16 | Enchufe industrial | 1 | \$ 0,25 | \$ 0,25 |
| 17 | Conector Banana | 4 | \$ 0,15 | \$ 0,60 |
| 18 | Cable sólido #14 AWG THW | 1 | \$ 0,35 | \$ 0,35 |
| 19 | Boquilla Cerámica | 1 | \$0,80 | \$ 0,80 |
| 20 | Foco incandescente 100W | 1 | \$ 0,50 | \$ 0,50 |
| 21 | Espuma térmica | 1 | \$ 0,50 | \$ 0,50 |
| 22 | Lana Aislante | 1 | \$ 15,00 | \$ 15,00 |
| 23 | Recubrimiento metálico | 1 | \$ 3,00 | \$ 3,00 |
| 24 | Tornillos 1/8" | 25 | \$ 0,03 | \$ 0,75 |
| 25 | Tuercas 1/8" | 25 | \$ 0,01 | \$ 0,25 |

| | | | | |
|----|----------------|---|--------------------------|-----------|
| 26 | Tornillos 1/4" | 2 | \$ 0,07 | \$ 0,14 |
| 27 | Tuercas 1/4" | 2 | \$ 0,02 | \$ 0,04 |
| 28 | Interruptor | 1 | \$ 0,40 | \$ 0,40 |
| 29 | Caja | 1 | \$ 20,00 | \$ 20,00 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 56,37 |
| | | | | |
| | | | COSTO DEL MÓDULO: | \$ 121,42 |

Tabla 2.7 Costos de los dispositivos externos

La tabla 2.7 describe en forma detallada los costos y cantidad de los dispositivos externos del módulo y el costo total del módulo de temperatura.

Los elementos del módulo son de bajo costo y fáciles de encontrar en el mercado interno, a excepción del transmisor de corriente; éste tiene un valor elevado que llega a ser la quinta parte del costo total del módulo debido a que es importado.

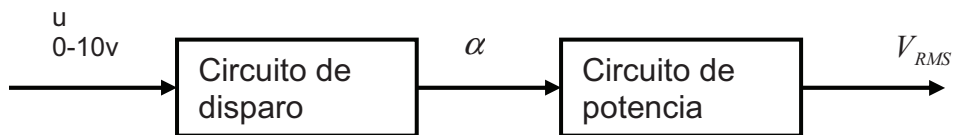
El costo total de módulo de temperatura es bajo comparado con las prestaciones que brinda como módulo didáctico de control de temperatura.

2.6 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.

La función de transferencia del módulo de temperatura se compone de la función de transferencia del actuador y la de la planta.

2.6.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL ACTUADOR.

El actuador diseñado está conformado por dos circuitos: el circuito de disparo y el circuito de potencia.



$$G_{actuador}(s) = G_{C_disp} * G_{C_pot}$$

Figura 2.40 Diagrama de bloques del actuador.

G_{C_disp} ; Función de transferencia del circuito de disparo.

G_{C_pot} ; Función de transferencia del circuito de potencia.

2.6.1.1 Función de transferencia del circuito de disparo.

El circuito de disparo comprende de un circuito comparador con una rampa lineal, comparada con un voltaje de referencia; generando una señal PWM de frecuencia de funcionamiento del doble de la onda sinusoidal de la red ($f = 60Hz$).

La Figura 2.10 muestra las señales generadas por el circuito de disparo. El voltaje de comparación calibrado tiene un rango de variación de: $0-10V$.

El rango de voltaje de la rampa lineal es de $0-10V$, con una frecuencia de operación de: $f_r = 120Hz$.

El periodo de la rampa es: $T = 8,333ms$

El ángulo de disparo para el convertidor AC-AC (control de fase directo), la variación del ángulo de disparo, es de: $\alpha: 0-180^\circ$.

El voltaje de comparación en función del ángulo de disparo se representa por medio de la siguiente ecuación:

$$m = 18[\text{grados} / V]$$

$$\alpha = 18 * V_{comp}$$

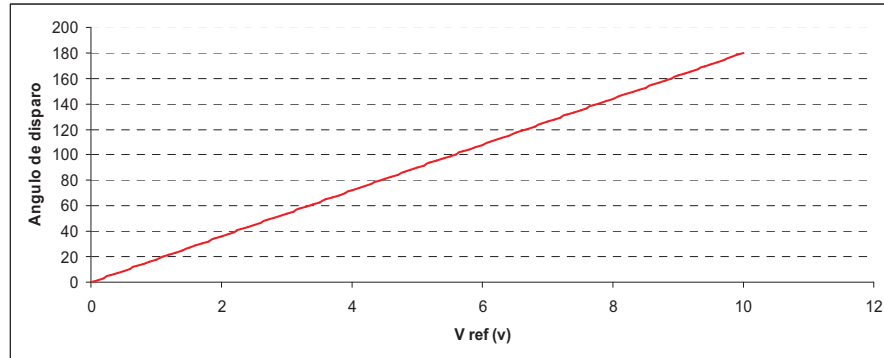


Figura 2.41 Voltaje de comparación vs. El ángulo de disparo.

Como el voltaje de referencia es un voltaje normalizado 0 – 10V, para obtener la variación del ángulo de disparo de α : $180 - 0^\circ$, la relación entre el ángulo de disparo y el voltaje de referencia es:

$$\alpha = 180^\circ - 18V_{ref}$$

Cuya gráfica de la ecuación se presenta en la figura 2.42.

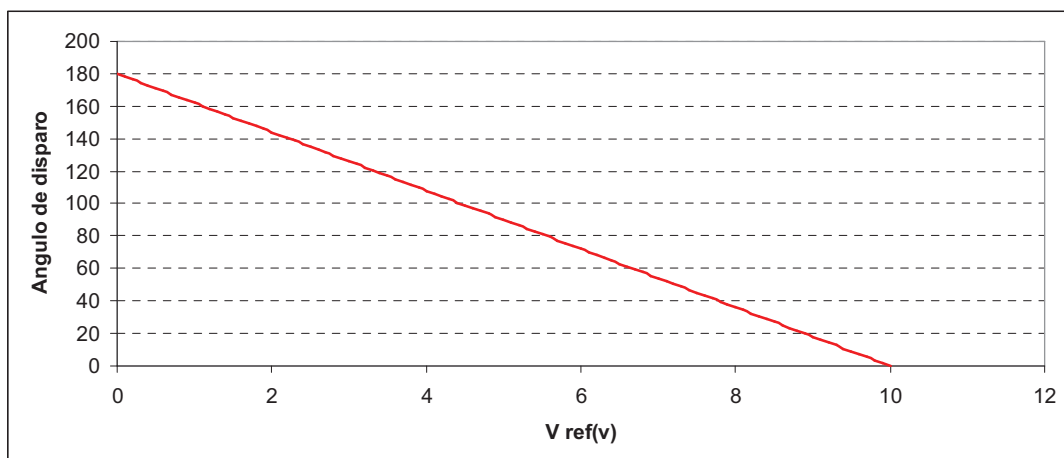


Figura 2.42 Voltaje de referencia vs. el ángulo de disparo.

Entonces, la relación entre el voltaje de referencia y el ángulo de disparo es lineal; la respuesta del circuito de disparo es prácticamente instantánea por lo que la función de transferencia no contiene ni polos ni ceros.

$$G_{C_disp} = \frac{\alpha}{V_{ref}}$$

$$G_{C_disp} = \frac{180 - 0}{0 - 10} = -18[\text{grados} / V]$$

2.6.1.2 Función de transferencia del circuito de potencia.

El diagrama de bloques del actuador, el circuito de potencia, tiene como señal de entrada el ángulo de disparo (α), de activación del tiristor, obteniendo como la señal de salida el voltaje RMS aplicado a la lámpara.

La función de transferencia del circuito de potencia se la puede aproximar a una función de primer orden.

$$G_{C_pot} = \frac{V_{RMS}}{\alpha}$$

$$G_{C_pot} = \frac{K_{C_pot}}{1 + \tau_{C_pot} s}$$

En el convertidor AC – AC, control de fase directo, la forma de onda de voltaje aplicado a la lámpara se muestra en la figura 2.1 y la expresión que relaciona el voltaje RMS y el ángulo de disparo es la siguiente:

$$V_{rms} = V \max \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4\pi}}$$

La expresión está representada bajo condiciones ideales, despreciando la caída de voltaje en el elemento de potencia en conducción y despreciando posibles variaciones de amplitud de voltaje en la red eléctrica.

La gráfica de dicha ecuación está en la figura 2.43.

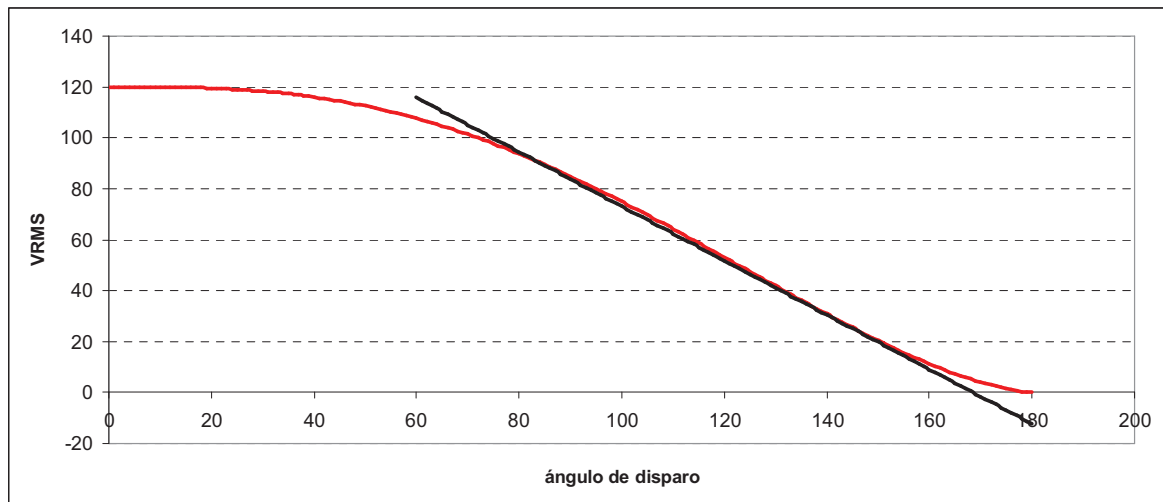


Figura 2.43 Voltaje RMS aplicado a la lámpara vs. Ángulo de disparo.

En la curva de la figura 2.43 se toma en cuenta la zona lineal para obtener el valor de la ganancia de la función de transferencia (K_{C_pot}).

Debido a que los circuitos conversores son de característica no lineal. Existe una zona donde el comportamiento de la función es lineal, por lo que se realiza la linealización de la curva aproximando su comportamiento.

La zona de linealidad de la ecuación comprende desde $\alpha_1 = 86^\circ$, hasta $\alpha_2 = 146^\circ$, cuyos valores correspondientes de voltaje RMS son: $V_{RMS1} = 88[V]$ y $V_{RMS2} = 24[V]$ para un voltaje pico de: $V_p = 120\sqrt{2}[V]$

La ganancia del circuito de potencia se calcula de la siguiente forma:

$$K_{C_pot} = \frac{(88 - 24)[V]}{(86 - 146)[\text{grados}]}$$

$$K_{C_pot} = -1.067 \left[\frac{V}{\text{grados}} \right]$$

La ganancia puede variar dependiendo de la no linealidad y por el voltaje pico de la red.

τ_{C_pot} : es la constante de tiempo de la respuesta del voltaje distorsionado al ángulo de disparo que controla el TRIAC. El tiempo de respuesta del conversor depende íntegramente de la frecuencia de operación del circuito de disparo. Se toma como el valor promedio de la variación del ángulo de disparo $0 - 180^\circ$; para la transformación a segundos se toma el valor del periodo de la rampa lineal del circuito de disparo $Tr = 8,333ms$.

La constante de tiempo del circuito de potencia se toma del valor promedio del periodo de la rampa lineal.

$$\tau_{C_pot} = \frac{0 + 8.333ms}{2}$$

$$\tau_{C_pot} = 4.166ms$$

La función de transferencia del circuito de potencia es:

$$G_{C_pot} = \frac{-1.067}{1 + 4.166 \times 10^{-3} s}$$

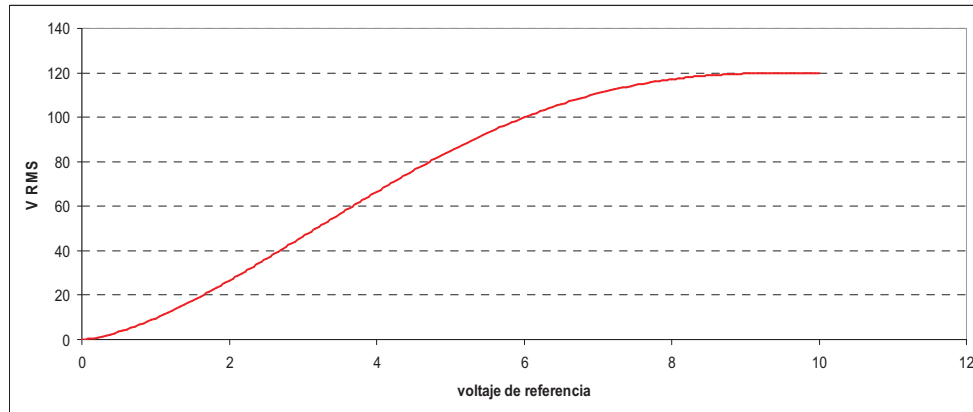


Figura 2.44 Voltaje RMS aplicado a la lámpara vs. Voltaje de referencia.

Donde el Voltaje de referencia es el voltaje controlado proveniente del controlador.

Entonces la función de transferencia del actuador es:

$$G_{actuador}(s) = -18 * \frac{-1.067}{1 + 4.166 \times 10^{-3} s}$$

$$G_{actuador}(s) = \frac{19.2}{1 + 4.166 \times 10^{-3} s} \left[\frac{V_{RMS}}{V_{DC}} \right]$$

2.6.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA.

La planta está conformada por la lámpara incandescente, la cual convierte la energía eléctrica en energía lumínica y energía calórica; produce cambio de temperatura conforme existe cambio de voltaje RMS aplicado.

La función de transferencia puede ser aproximada a una función de transferencia de primer orden:

$$G_{planta} = \frac{K_{pl}}{1 + \tau_{pl}s}$$

K_{pl} : Ganancia de la planta.

τ_{pl} : Constante de tiempo de la planta.

Para poder determinar la ganancia de la planta se procede a realizar pruebas, con distintos valores de voltaje RMS, para obtener el valor correspondiente de temperatura en estado estable para todos los casos.

| Angulo de disparo (grados) | Voltaje RMS (V) | Temperatura (°C) |
|----------------------------|-----------------|------------------|
| 140 | 32 | 30 |
| 130 | 41 | 35 |
| 120 | 51 | 41 |
| 110 | 64 | 48 |
| 100 | 76 | 56 |
| 90 | 86 | 64 |
| 75 | 98 | 72 |
| 60 | 108 | 80 |
| 45 | 116 | 86 |
| 20 | 122 | 91 |
| 0 | 122 | 91 |

Tabla 2.8 Resultados de pruebas de la planta en lazo abierto.

Con los datos obtenidos de la tabla 2.8 se traza las curvas correspondientes obteniendo los siguientes resultados:

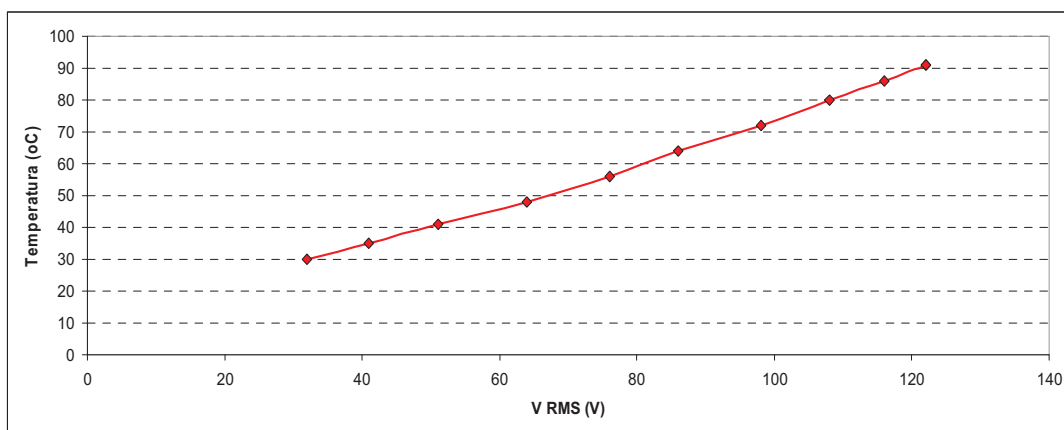


Figura 2.45 Temperatura de la planta vs. Voltaje RMS.

En la figura 2.45 la curva se puede aproximar a una recta cuya pendiente es la ganancia de la función de transferencia de la planta.

Utilizando métodos estadísticos se obtiene la siguiente ecuación:

$$T = 0.68618V_{RMS} + 5.95011$$

Entonces:

La ganancia de la planta es el valor de la pendiente de la recta obtenida.

$$K_{pl} = 0.68618 \left[\frac{^{\circ}C}{V} \right]$$

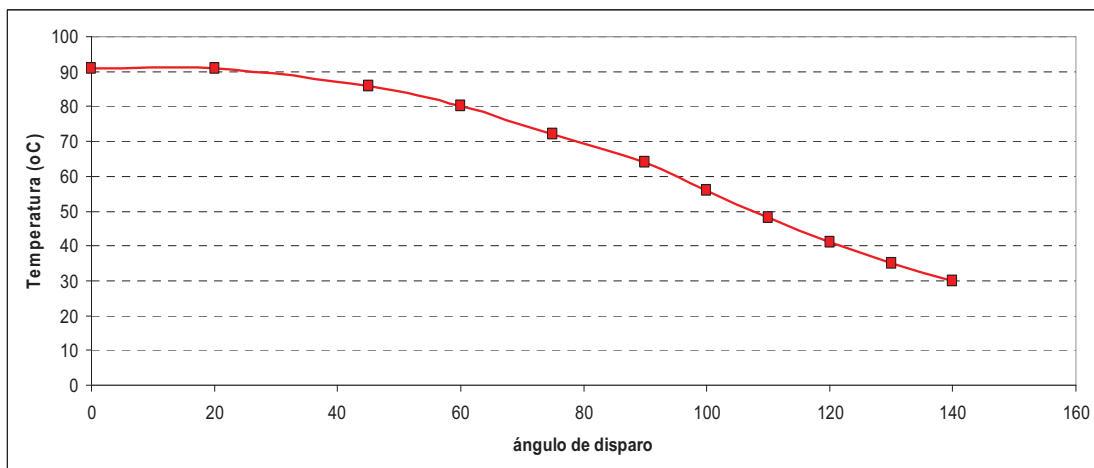


Figura 2.46 Temperatura de la planta vs. Ángulo de disparo.

La figura 2.46 representa la temperatura obtenida en estado estable en función del ángulo de disparo, asemejando a la figura 2.43 del voltaje RMS en función del ángulo de disparo muestra la forma no lineal de la curva.

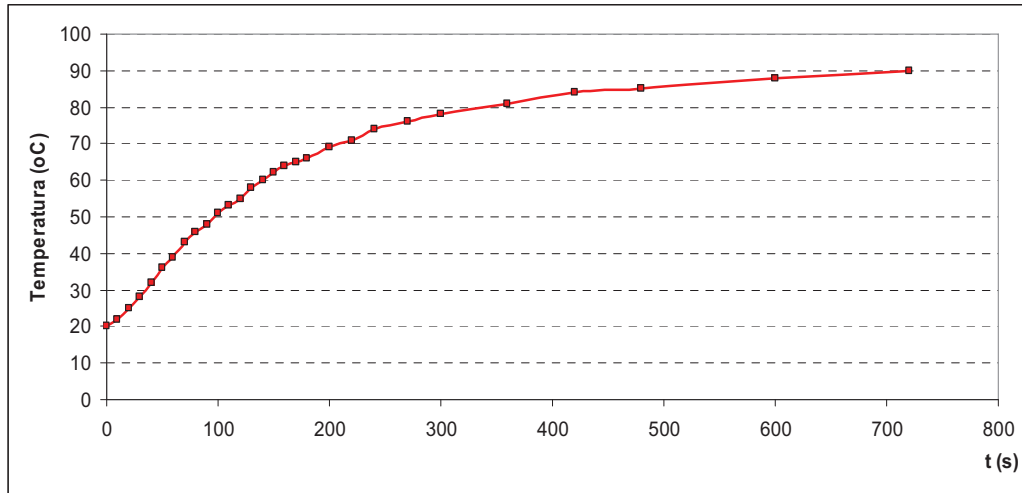


Figura 2.47 Temperatura de la planta vs. Tiempo.

La figura 2.47 demuestra que la función de transferencia a una entrada paso de voltaje ($V_{RMS} = 123[V]$) es una función exponencial, la temperatura inicial $t = 0$, es la temperatura ambiente $T_A = 20^{\circ}C$. El valor de la temperatura $T_f = 90^{\circ}C$

La constante de tiempo de la planta se la obtiene:

$$T = (T_f - T_A)(1 - e^{-at}) + T_0$$

$$T = 70(1 - e^{-at}) + T_0$$

Condición de $\tau \rightarrow (1 - e^{-1})$

$$T(\tau) = 70(1 - e^{-1}) + 20^{\circ}C$$

$$T(\tau) = 64,2^{\circ}C$$

El valor de la constante de tiempo de la planta se la toma como el valor del tiempo a la temperatura de $64,2^{\circ}C$, el valor medido es:

$$\tau_{pl} = 160 \text{seg}$$

La función de transferencia de la planta es:

$$G_{planta} = \frac{0.686}{1 + 160s} \left[\frac{^{\circ}C}{V_{RMS}} \right]$$

La función de transferencia del módulo de temperatura es:

$$G_{MT}(s) = G_{actuador}(s) * G_{planta}(s)$$

$$G_{MT}(s) = \frac{19.2}{1 + 4.166 \times 10^{-3} s} \frac{0.686}{1 + 160s} \left[\frac{^{\circ}C}{V_{dc}} \right]$$

$$G_{MT}(s) = \frac{13.17}{(1 + 4.166 \times 10^{-3} s)(1 + 160s)} \left[\frac{^{\circ}C}{V_{dc}} \right]$$

CAPÍTULO 3.

3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR.

Este capítulo trata de diseñar, simular, y construir un controlador que maneje al prototipo de temperatura y otros tipos de planta con diferentes acciones de control análogos y digitales.

El controlador cumple la función de mantener la variable temperatura a valores deseados aún ante perturbaciones externas del sistema.

Para realizar el control de diferentes plantas incluyendo la de temperatura se ha planteado las siguientes formas de control:

- Control en lazo cerrado.
- Control en lazo abierto (incluido en el módulo de temperatura).
- Control PID análogo.
- Control PID digital en base de Microprocesador.
- Control PID digital en base a computador personal.
- Control Redes en adelanto y atraso en base a computador personal.

La figura 3.1 muestra el diagrama de bloques de la distribución de los tipos de control que maneja el controlador.

El diagrama de bloques presenta todas las funciones del controlador; las formas de control implementadas y la forma de acceso a cada uno de ellos por medio de un sistema microprocesado.

Las señales de los controladores analógicos no se digitalizan para enviar la señal de control como se muestra en el diagrama de bloques.

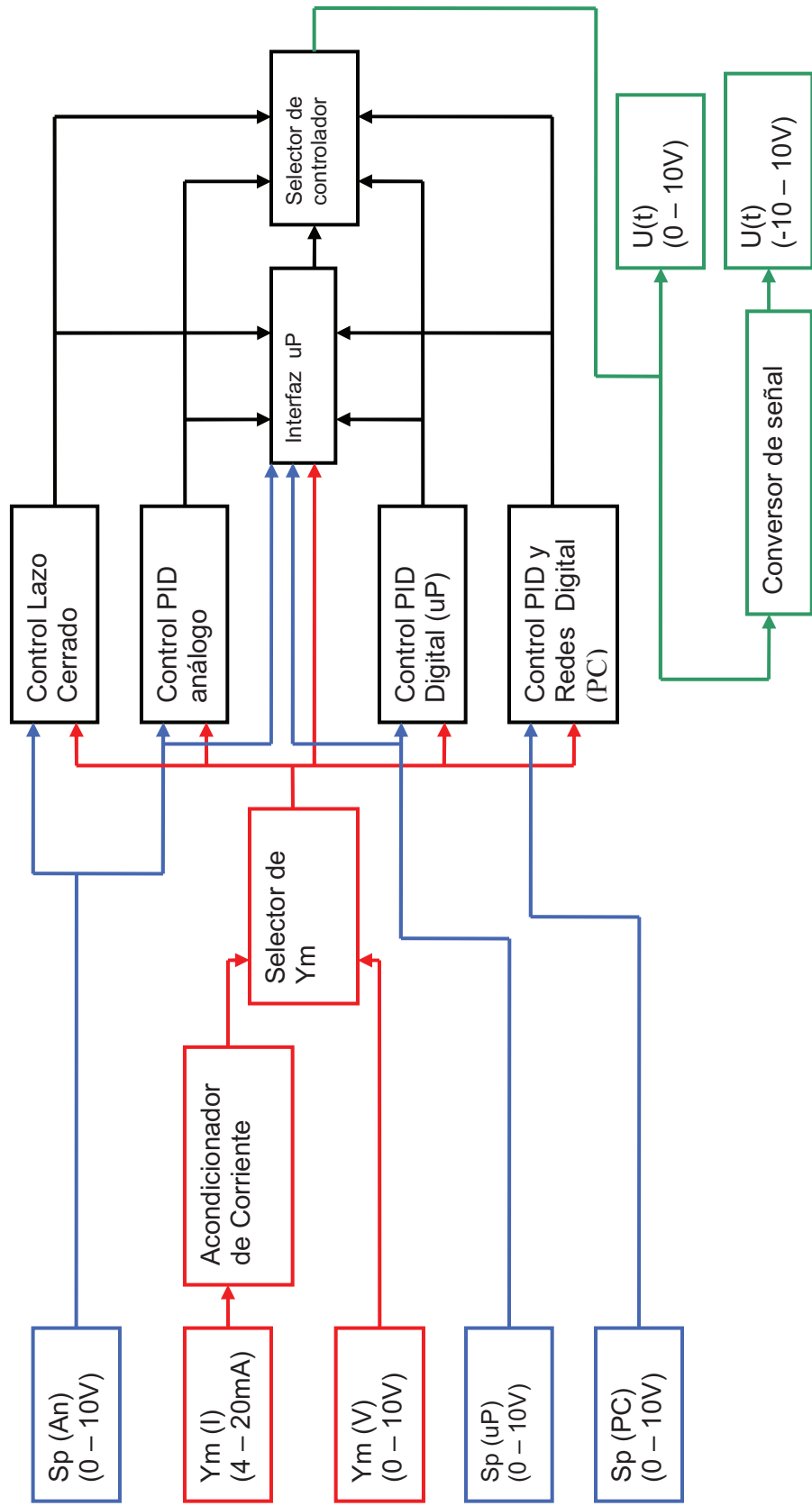


Figura 3.1 Diagrama de bloques del controlador.

Las entradas de las señales provenientes de la variable controlada (Y_m) pueden ser de corriente o de voltaje según sea el circuito transmisor de la variable controlada.

Las señal de control del controlador (U) tiene un rango de voltaje (0 – 10V), y otra señal de control que tiene otro rango de voltaje (-10 – 10V) para otro tipo de plantas.

Las Señales de referencia (r) son independientes para cada tipo de control implementado, en este caso la referencia es independiente para el control analógico y para el control digital.

3.1 DISEÑO DEL CIRCUITO ACONDICIONADOR PARA EL TRANSMISOR DE CORRIENTE.

La variable controlada para cualquier tipo de planta se acondiciona en todos los casos a valores normalizados ya sea de voltaje ó de corriente por los transmisores de señal.

En el caso de la transmisión por voltaje el rango estandarizado es (0 – 10V), para lo cual simplemente el circuito de acondicionamiento es un limitador de voltaje hasta de 10V y de voltajes negativos, para protección de los componentes del controlador.

Para la transmisión por corriente se toma en cuenta el voltaje de alimentación del transmisor de corriente.

La resistencia máxima de carga para el transmisor del módulo de temperatura es de:

$$R_L = 500\Omega$$

Con este valor de resistencia el voltaje mínimo de polarización del transmisor es de 12v para el caso del transmisor de corriente AD694AQ.

El valor de resistencia de carga dentro del controlador es de $R_L = 500\Omega$

Con esta resistencia se realiza la conversión de corriente a voltaje por medio de la Ley de Ohm:

$$I_{Ym} \rightarrow (4 - 20mA) \quad V_{Ym} \rightarrow (2 - 10V)$$

Para obtener mayor precisión en la lectura de la corriente, se utiliza, como resistencia de carga, un potenciómetro de precisión de $R_{v1} = 1K\Omega$ calibrado a un valor de resistencia de 500Ω .

El rango de voltaje producido es de 8V con un voltaje mínimo de 2V.

Para obtener el voltaje normalizado (0 - 10v), se utiliza dos etapas para la conversión a este voltaje. Primero restando el voltaje mínimo por medio de un circuito diferencial para obtener como voltaje mínimo 0V y luego amplificar este voltaje para tener el rango de voltaje de 10V.

El amplificador diferencial tiene una ganancia unitaria, entonces:

$$R1 = R2 = R3 = R4 = R$$

$$\text{Siendo: } R = 10K\Omega$$

La etapa de amplificación del rango de voltaje utiliza un amplificador inversor, cuya ganancia es:

$$G_{Ymi} = -\frac{V_{Ymo}}{V_{Ym}} = -\frac{10V}{-8V}$$

$$G_{Ymi} = 1.25 = \frac{R6}{Rv3 + R5}, \text{ según el circuito de la figura 3.2.}$$

Resolviendo y asumiendo los valores de resistencia se obtiene:

$$R6 = 10K\Omega$$

$$R5 = 4.7K\Omega$$

$Rv3 = 10K\Omega$, calibrado a un valor de resistencia de: $R = 3.3K\Omega$

V_{ymo} : Señal de voltaje (0 – 10V) a partir de (4 – 20mA) del circuito acondicionador de la variable controlada.

En la figura 3.2 se muestra el circuito de acondicionamiento de la variable medida, con la cual se puede seleccionar el tipo de señal proveniente de la planta que se utilice, también se encuentran los valores de los elementos previamente diseñados.

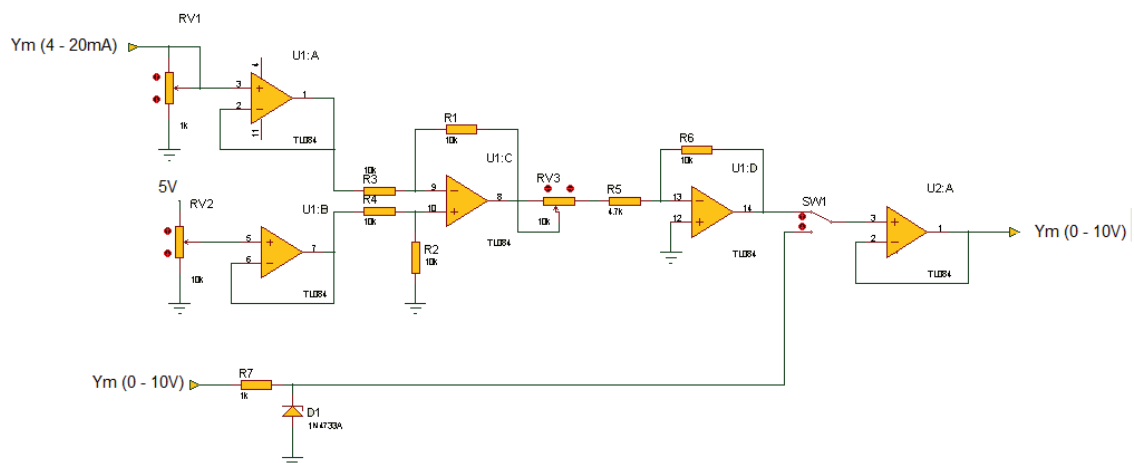


Figura 3.2 Circuito de acondicionamiento para la transmisión por corriente.

3.2 DISEÑO DE LOS CONTROLADORES ANÁLOGOS.

El diseño del circuito de acondicionamiento de la variable controlada se utiliza para que el controlador reciba señales tanto de voltaje como de corriente normalizados.

En este proyecto existen dos tipos de control análogos a considerar:

- Control en lazo Cerrado.
- Control PID configuración paralelo.

Los dos tipos de control utilizan la misma referencia o Set Point de forma análoga y el mismo circuito generador de la señal de error (V_E).

Para la obtención de la señal de error se opta por un circuito amplificador diferencial con ganancia unitaria.

El rango de voltaje de la referencia (V_r) es de (0 – 10V), con ayuda de un circuito en base a un potenciómetro para llegar a obtenerlo como indica la figura 3.3.

El Diodo zener 1N4740 tiene un voltaje Zener de 10V y una corriente máxima en conducción directa de 25mA.

Sea el valor de la resistencia limitadora de $R_{11} = 100\Omega$ entonces:

La corriente de la rama es de $I_z = 20mA$.

Sea la corriente del zener: $I_z = 10mA$, entonces el valor de la resistencia total del potenciómetro está determinada por:

$$R_{v4} = \frac{V_z}{I - I_z}$$

$$Rv4 = \frac{10v}{20mA - 10mA}$$

$$Rv4 = 1K\Omega$$

El amplificador diferencial que genera la señal de error presenta la siguiente ecuación:

$$V_E = -(V_{Ym} - V_r) \frac{R7}{R9}$$

$$\text{Donde: } R7 = R8 \quad R9 = R10$$

Para tener la ganancia de uno entonces:

$$R7 = R8 = R9 = R10 = R$$

$$\text{Siendo } R = 10K\Omega$$

Se colocó adicionalmente un seguidor de voltaje con el fin de acoplar impedancias con los controladores análogos como muestra la figura 3.3.

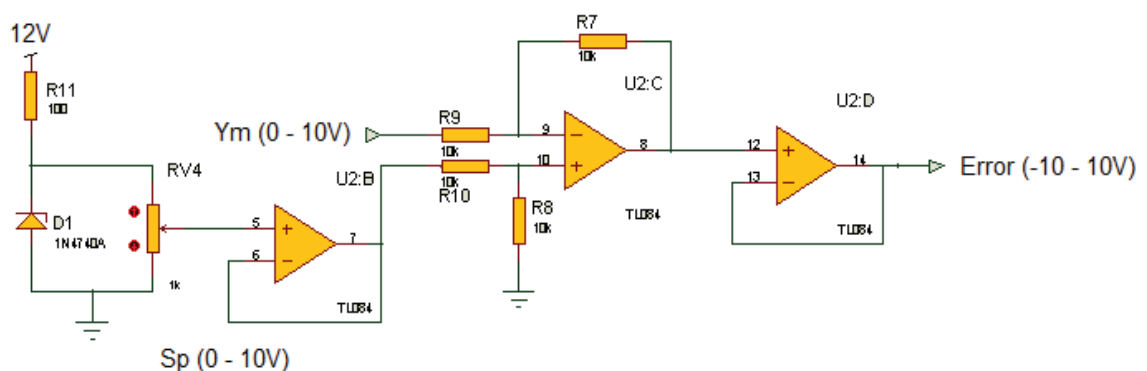


Figura 3.3 Circuito generador de la señal de error.

3.2.1 CONTROL EN LAZO CERRADO.

El control en lazo cerrado (G_{CLC}) (figura 3.4). Es un controlador cuya función de transferencia es: $G_{CLC} = 1$.

En lazo cerrado, la señal de control (U_{CLC}) es la señal de error dentro del lazo de control.

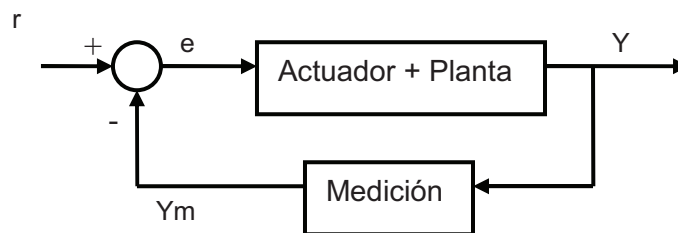


Fig. 3.4 Diagrama de bloques del control en lazo cerrado.

El circuito para el control en lazo cerrado es simplemente un circuito restador que genera la señal de error (e), figura 3.3, donde el rango de voltaje del controlador es (-10V – 10V).

Con este control se realiza el análisis en lazo cerrado del módulo de temperatura o de otra planta cualesquiera con el objetivo de analizar la respuesta del sistema en lazo cerrado.

3.2.2 DISEÑO DEL CONTROL PID ANÁLOGO.

El control PID presenta distintos tipos de características dependiendo de la conexión de los circuitos del controlador. La configuración más utilizada a nivel industrial es la conexión paralela que se representa en la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right)$$

La función de transferencia del control (G_{CPID}) es:

$$G_{CPID}(s) = \frac{U_{PID}(s)}{E(s)}$$

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

En donde:

K_p = Constante proporcional.

T_i = Tiempo integral.

T_d = Tiempo derivativo.

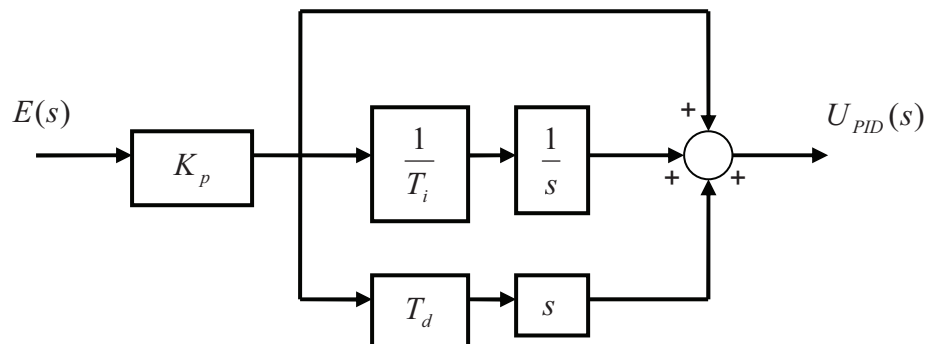


Figura 3.5 Diagrama de bloques del control PID análogo.

En el control PID análogo paralelo cuyo diagrama de bloques se muestra en la figura 3.5, la constante de proporcionalidad afecta el valor de la señal de error produciendo cambios en el comportamiento en la parte integral y derivativa del control.

Desarrollando la función de transferencia del control PID, se tiene:

$$G_{CPID} = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + K_p T_d s$$

En donde:

$$\frac{K_p}{T_i} = K_i \text{ Constante integral.}$$

$$K_p T_d = K_d \text{ Constante derivativa.}$$

$$G_{CPID} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

3.2.2.1 Determinación de las constantes.

Con la selección del tipo de control PID, se procede a determinar las constantes del controlador (K_p , T_i , T_d) para tener una referencia en la variación de las constantes.

Existen varios métodos para obtener las constantes del controlador como cancelación de polos y ceros. En este proyecto se utiliza el método de la curva de reacción de Ziegler y Nichols.

Este método se utiliza para plantas que tengan una respuesta a una señal escalón de tipo amortiguada que se pueden aproximar a una de primer orden con retardo.

El método de la curva de reacción se realiza en lazo abierto. Con la obtención de la respuesta de la planta, se toma el punto de inflexión y se traza una recta, figura 3.6.

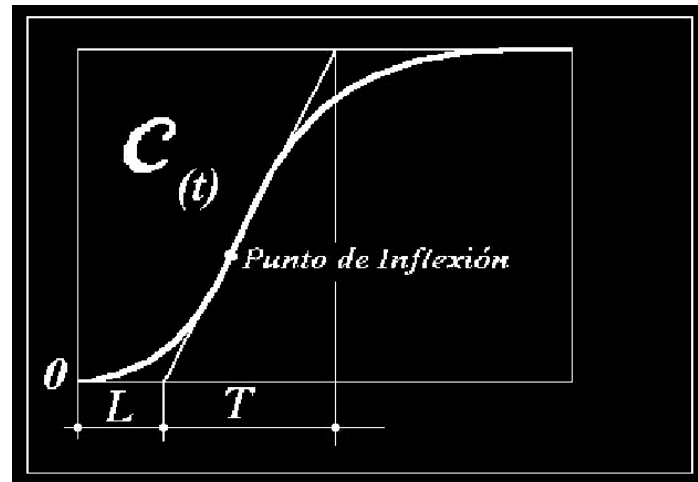


Figura 3.6 Curva de reacción.

Con los valores de L y T , se calculan los valores de las constantes del controlador PID por medio de la tabla 3.1.

| Tipo de controlador | K_p | T_i | T_d |
|---------------------|----------|----------|--------|
| P | T/L | ∞ | 0 |
| PI | $0.9T/L$ | $3.333L$ | 0 |
| PID | $1.2T/L$ | $2L$ | $0.5L$ |

Tabla 3.1 Valores recomendados de la curva de reacción.

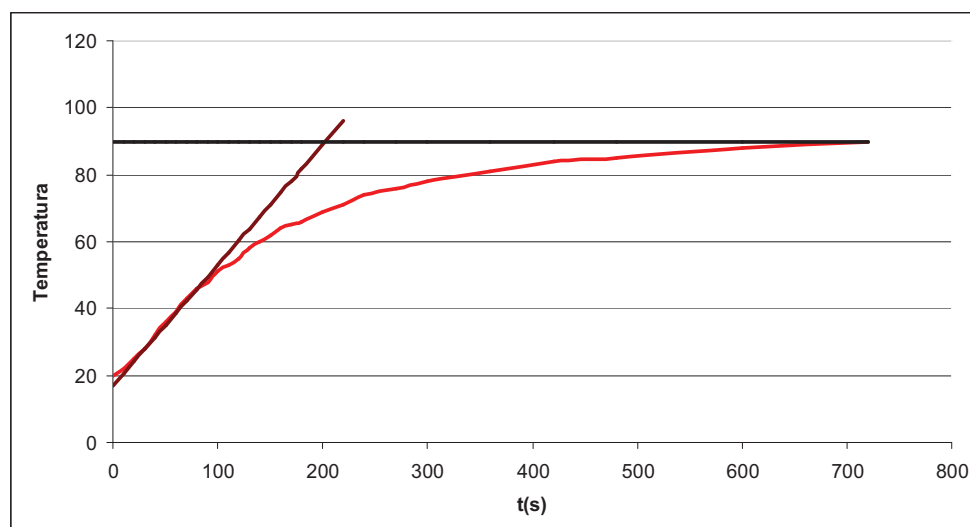


Figura 3.7 Curva de reacción del módulo de temperatura.

En la figura 3.7 se muestra la curva de reacción del módulo de temperatura; con la recta trazada se determinan los valores de L y T cuyos valores son:

$$L = 10s$$

$$T = 190s$$

Con estos datos el valor de las constantes del control PID son:

$$K_p = 22.8$$

$$T_i = 20$$

$$T_d = 5$$

Con estos valores, la función de transferencia del controlador es:

$$G_{CPID} = \frac{114(s^2 + 0.2s + 0.01)}{s}$$

Con la función de transferencia del controlador PID, se procede a realizar la simulación del sistema de control en lazo cerrado. Para la simulación se utiliza el programa LabVIEW 8.6.

En el CD del proyecto se encuentra el programa para la simulación del sistema de control ante una entrada paso, con todas las posibles variantes para realizar el control PID de cualquier tipo de planta.

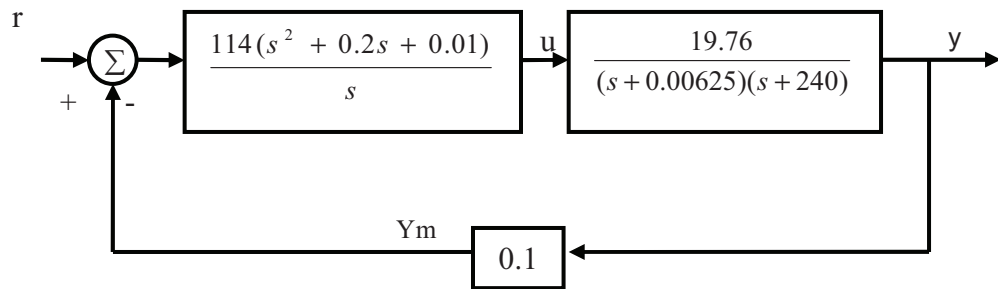


Figura 3.8 Sistema de control del prototipo de temperatura.

El sistema de control (figura 3.8), tiene implementado el controlador PID dimensionado anteriormente, la señal de realimentación es la señal acondicionada del sensor de temperatura. $H(s) = 0.1 \left[\frac{V}{^{\circ}C} \right]$.

La respuesta del sistema de control ante una entrada paso de 1V, $R(s) = \frac{1}{s}$, se encuentra en la figura 3.9.

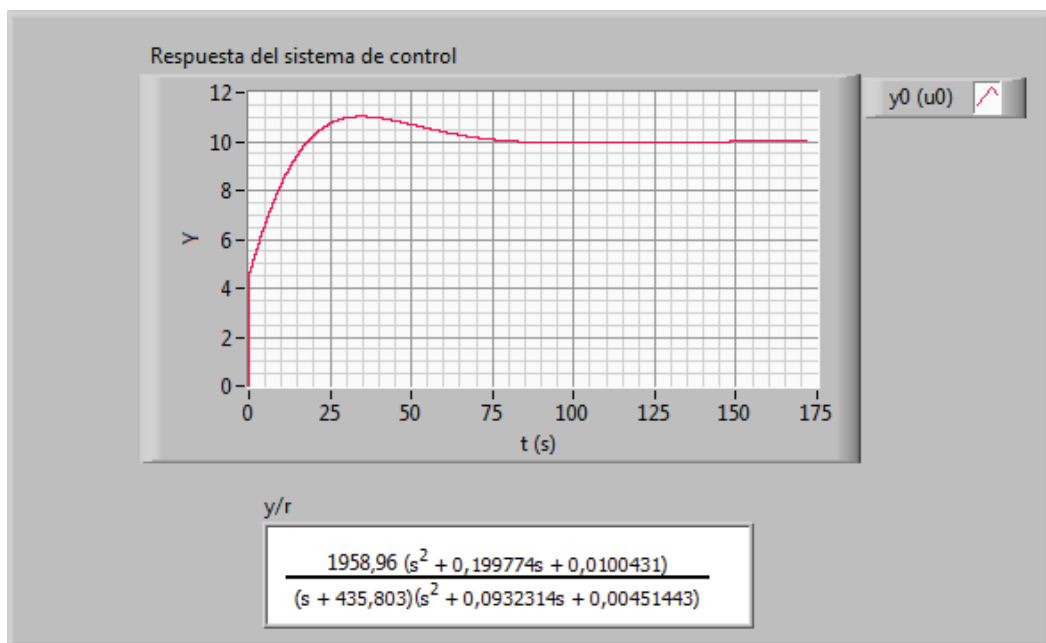


Figura 3.9 Respuesta del sistema de control ante una entrada paso.

Cabe resaltar que la señal paso de la simulación representa la temperatura de referencia de un valor de $T_R = 10^\circ C$.

La simulación de sistema de control arroja los siguientes resultados:

- Tiempo de establecimiento: $t_s = 65s$
- Error de posición respecto a la temperatura: $E_p = 0$
- Máximo sobre pico: $M_p = 11\%$

Con el primer controlador obtenido se realizan calibraciones para llegar a tener la mejor respuesta del sistema de control por medio de la simulación.

Entonces, el rango de variación de los parámetros de calibración del controlador PID son:

$$K_p \rightarrow (0 - 30)$$

$$T_i \rightarrow (0 - 22)$$

$$T_d \rightarrow (0 - 22)$$

3.2.2.2 Diseño del Circuito.

Con el dimensionamiento de las constantes del controlador, se realiza el diseño del circuito del control PID. Para este tipo de control se utiliza amplificadores operacionales que cumplan con el diagrama de bloques del controlador (figura 3.5).

El control PID se compone de varias etapas con circuitos simples a base de amplificadores operacionales.

La figura 3.10 muestra los cuatro diagramas circuitales básicos para obtener el control PID. [3]

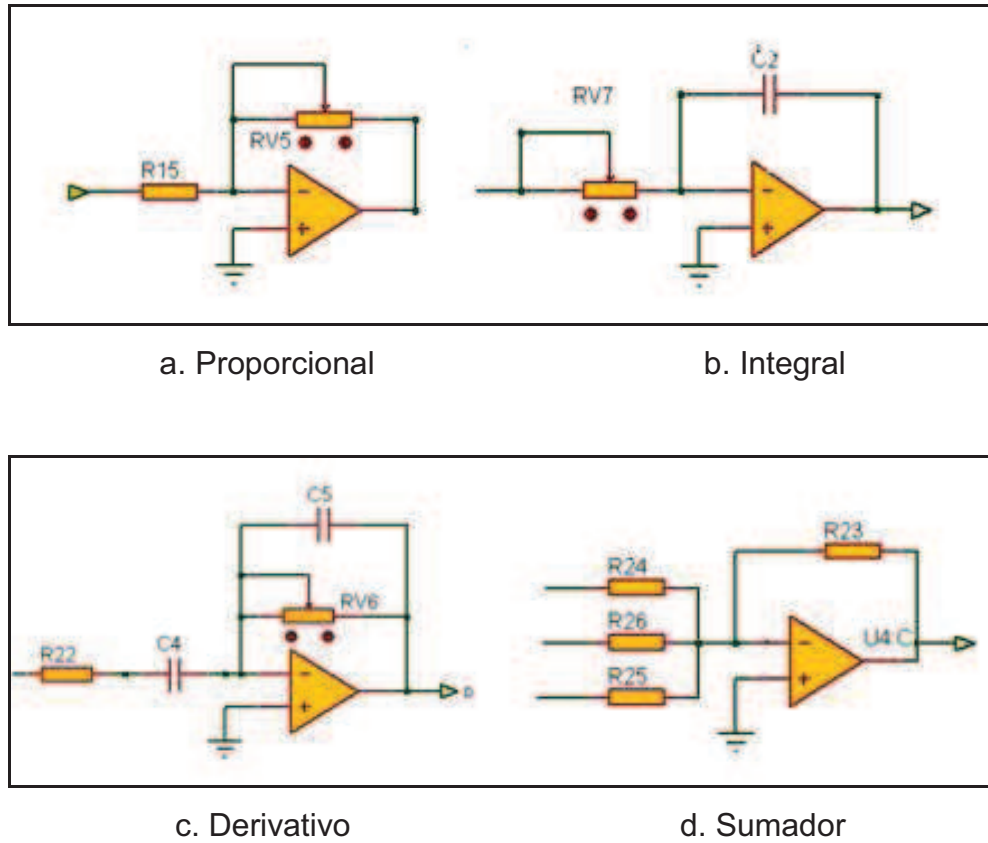


Figura 3.10 Circuitos individuales del control PID análogo.

Para la parte proporcional la función de transferencia es:

$$\frac{V_P}{V_E} = -K_p = -\frac{RV5}{R15}$$

Se escoge un valor de resistencia del potenciómetro de: $RV5 = 100K\Omega$

$$R15 = \frac{100K\Omega}{30}$$

$$R15 = 3.33K\Omega$$

Para la parte integral la función de transferencia es:

$$\frac{V_i}{V_p}(s) = -\frac{1}{RCs} = -\frac{1}{T_i s}$$

Como $T_{i \max} = 22$ y el control maneja voltajes negativos se utiliza únicamente condensadores no polarizados.

Los condensadores no polarizados son de valor bajo de capacitancia (máx. 10uF), se toma en cuenta el diseño en cascada del diagrama de bloques de la figura 3.5, que indica una etapa de escalamiento del tiempo integral y del derivativo.

Con esta consideración se adiciona otra etapa de amplificación individual para la parte integral y para la parte derivativa del controlador. Figura 3.11. [4]

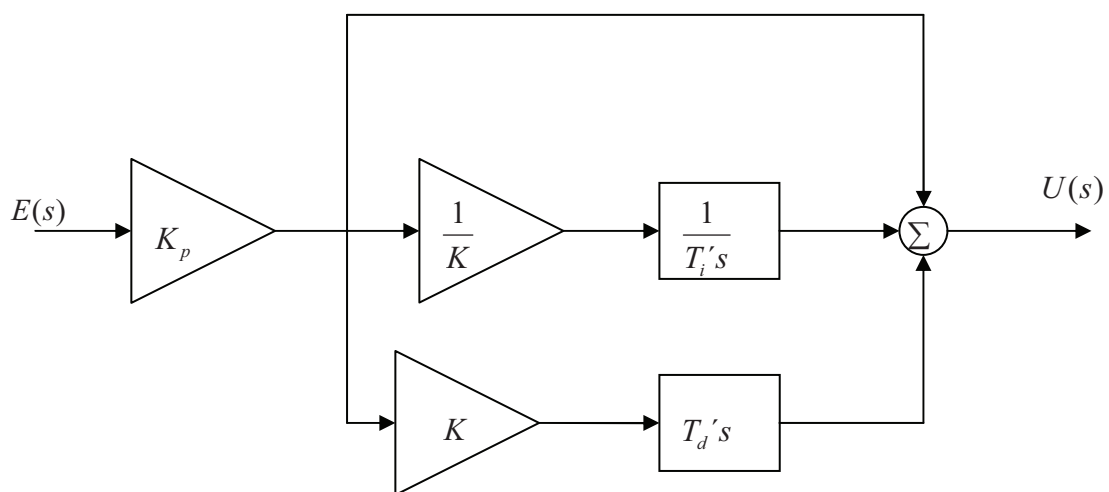


Figura 3.11 Variante del control PID.

$$T_i = KT_i'$$

Donde: T_i' = tiempo integral para cálculo.

[4] AMÉSTEGUI, Mauricio. APUNTES DE CONTROL PID. Universidad Mayor de San Andrés (Bolivia), 2001.

http://www.alumnos.usm.cl/~ignacio.morande/descargas/apuntes_de_control_pid.pdf

Asumiendo un valor de $K = 10$

Entonces: $T_{i \max}' = 2.2$

$$T_i' = C2 * RV7$$

Sea: $RV7 = 500K\Omega$

$$C2 = 4.4\mu F$$

Se utiliza dos condensadores de $C = 2.2\mu F$ en conexión paralelo.

Para la parte derivativa la función de transferencia es:

$$\frac{V_d}{V_p}(s) = -RCs = -T_d s$$

De igual forma: el tiempo derivativo máximo $T_{d \max} = 22$ se considera otra etapa de amplificación (figura 3.11) para obtener un valor del tiempo derivativo menor.

$$T_d = KT_d'$$

Donde: T_d' = tiempo derivativo para el cálculo.

Asumiendo un valor de $K = 10$

Entonces: $T_d' = 2.2$

$$T_d' = C4 * RV6$$

Sea: $RV6 = 500K\Omega$

$$C4 = 4.4\mu F$$

Se utiliza dos condensadores de $C = 2.2\mu F$ en conexión paralelo.

El circuito derivativo (figura 3.10c) completo comprende una resistencia en serie al condensador a la entrada y un condensador en paralelo a la resistencia de realimentación; tienen como fin eliminar las perturbaciones (ruido) que puedan afectar al control PID.

La cuarta etapa del control PID paralelo es la suma de las tres componentes del controlador, se realiza la suma con un circuito sumador inversor (figura 3.10d). Donde la ganancia del circuito es 1.

$$V_{uPID} = -\left(\frac{R23}{R24}V_p + \frac{R23}{R26}V_i + \frac{R23}{R25}V_d\right)$$

$$\text{Sea: } R23 = R24 = R25 = R26 = 10K\Omega$$

$$V_{uPID} = -(V_p + V_i + V_d)$$

La figura 3.12 muestra el diagrama circuital del control PID análogo con la etapa de preamplificación para la parte integral y derivativa del control.

Para tener un control fino cuando se necesitan valores bajos de las constantes integral y derivativa, se tiene un selector para escoger la escala de variación de la parte integral y derivativa del control como muestra la figura 3.12..

Además el circuito presenta dos seguidores de voltaje, esto tiene como fin acoplar impedancias del control ya que maneja valores altos de resistencia.

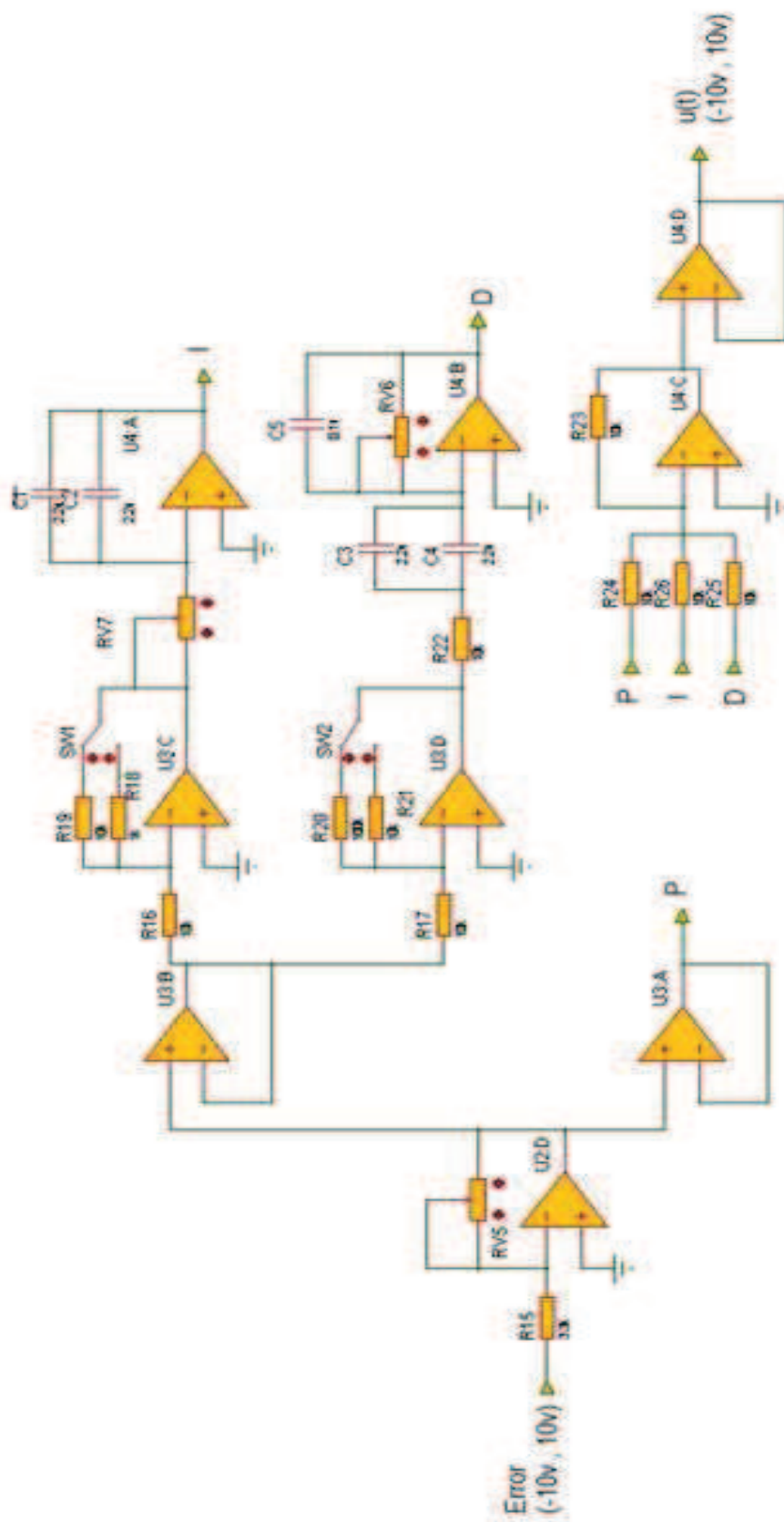


Figura 3.12 Diagrama circuital del control PID.

3.2.2.3 Circuito limitador de voltaje del control PID.

El rango de la señal de control $U(t)$, de todos controladores está limitado por el voltaje de polarización de los circuitos generando un voltaje de saturación para los controladores.

Para cualquier tipo de planta a ser controlada, la señal de control es limitada; en el caso del módulo de temperatura está limitada a un voltaje de control $V_{uc} \rightarrow (0-10V)$

Los voltajes de polarización del control PID análogo son:

$$V_{+} = 12V$$

$$V_{-} = -12V$$

Entonces, el rango de voltaje de funcionamiento del controlador PID está entre: $12V$ y $-12V$.

Para realizar un cambio del rango de variación de voltaje se utiliza un circuito que permita hacer la conversión de los límites del control PID.

La figura 3.13 muestra el circuito que cambia los límites de funcionamiento de $(-12V, 12V)$ a $(0, 10V)$.

El circuito está constituido por dos etapas. La primera es de reducción de los niveles de voltaje a $(-5V, 5V)$, y la segunda de cambio de nivel mínimo de voltaje a: $(0V, 10V)$

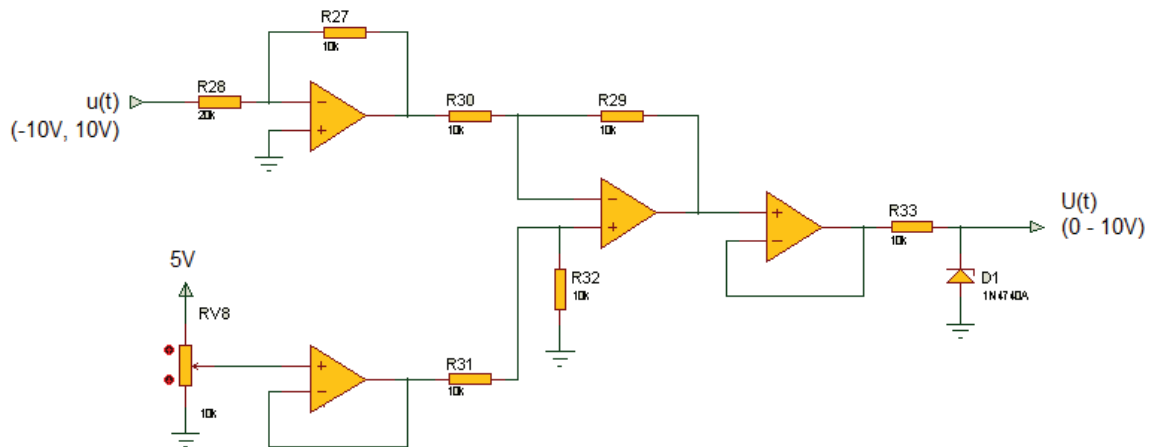


Figura 3.13 Circuito limitador de voltaje.

Para la primera etapa se utiliza un amplificador operacional en conexión amplificador inversor:

$$\frac{V_x}{U(t)} = G = -\frac{R27}{R26}$$

Realizando las mediciones correspondientes los valores de voltaje de saturación son: (-9.92V, 10.2V)

$$G = -\frac{-5V}{-9.92V} = -0.5$$

Sea: $R26 = 20K\Omega$

Calculando el valor de R27 es: $R27 = 10K\Omega$

El voltaje (V_x) tiene un rango de funcionamiento es: (4.96, -5.1V) correspondiente al voltaje de funcionamiento del controlador PID.

Para la segunda etapa se utiliza un amplificador operacional en conexión amplificador diferencial con ganancia 1.

El voltaje a la salida del amplificador diferencial es:

$$V_{UPID}(t) = 5V - V_x$$

El valor de las resistencias del amplificador diferencial es:

$$R_{29} = R_{30} = R_{31} = R_{32} = 10K\Omega$$

3.3 DISEÑO DE LOS CONTROLADORES DIGITALES.

Los sistemas de control análogos utilizan señales definidas en un intervalo de tiempo. La gran mayoría de las señales que se desean controlar son de naturaleza análoga, para llevarlas a sistemas de control digitales se procede a la digitalización de las mismas por medio de conversores análogo-digitales en un tiempo discreto, a esto se llama muestreo de señales.

El proceso de muestreo es seguido de un proceso de cuantificación, o sea llevar a la señal muestreada a una representación numérica binaria, de esta manera se procesa el dato numérico por medio de microcontroladores o microprocesadores para recibir una respuesta digital, la misma que se la transforma a una señal analógica por medio de conversores de digital a analógico.

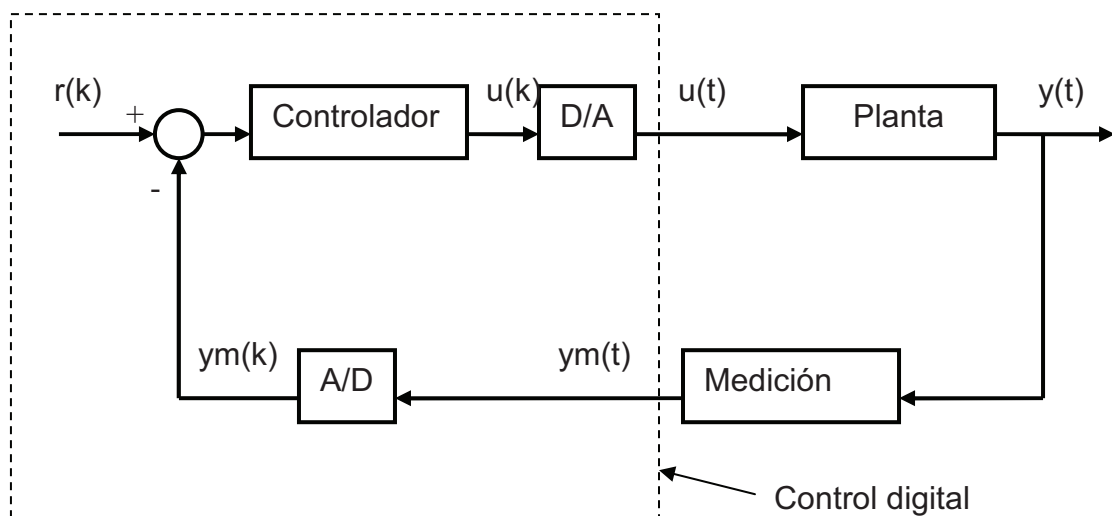


Figura 3.14 Diagrama de bloques de un sistema de control digital.

El sistema de control (figura 3.14) indica que la señal de la variable controlada es acondicionada y luego digitalizada para que el controlador realice la resta en forma digital para generar la señal de error como dato digital, y con el valor de la referencia se la introduce en forma digital.

La señal de control es transformada a una señal analógica para el control de la planta.

Otro tipo de sistema de control digital es la digitalización de la señal de error para que el controlador digital realice la acción de control, pero este método no se toma en cuenta en este proyecto.

Los tipos de control digital que se utilizan son:

- Control PID en base a microcontrolador.
- Control PID en base a computador personal.
- Redes de adelanto y atraso en base a computador personal.

3.3.1 CONTROL PID EN BASE A MICROCONTROLADOR.

3.3.1.1 Discretización del control PID.

Para realizar el control digital se utiliza varios métodos de discretización de la función de transferencia del tipo de control para que posteriormente, forme parte del programa del microcontrolador.

Para ingresar la función de transferencia del control PID, se la representa en forma de una ecuación en diferencias, para llegar a la ecuación hay que partir de la función de transferencia del control PID (figura 3.5).

$$G_{CPID}(s) = \frac{U_{PID}(s)}{E(s)}$$

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

Para discretizar el control PID, el método más comúnmente utilizado es aplicar en la parte integral del PID el método de TUSTIN y para la parte derivativa el método rectangular hacia atrás.

Se realiza el reemplazo de la parte integral con la siguiente expresión:

$$s = \frac{2(z-1)}{T(z+1)}, \text{ método TUSTIN.}$$

Para la parte derivativa se realiza el reemplazo con la siguiente expresión:

$$s = \frac{z-1}{Tz}, \text{ método rectangular hacia atrás.}$$

$$\frac{U_{CPID}(z)}{E(z)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \frac{2(z-1)}{T(z+1)}} + T_d \frac{z-1}{Tz} \right)$$

Resolviendo la expresión se tiene:

$$\frac{U_{CPID}(z)}{E(z)} = K_p \left(1 + \frac{T(1+z^{-1})}{2T_i(1-z^{-1})} + \frac{T_d}{T} (1-z^{-1}) \right)$$

$$\frac{U_{CPID}(z)}{E(z)} = K_p \left(1 - \frac{T(1-z^{-1})}{2T_i(1-z^{-1})} + \frac{2T}{2T_i(1-z^{-1})} + \frac{T_d}{T} (1-z^{-1}) \right)$$

$$\frac{U_{CPID}(z)}{E(z)} = K_p \left(1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{T}{T_i(1-z^{-1})} + \frac{T_d}{T} (1-z^{-1}) \right)$$

Para obtener la ley de control en dominio del tiempo discreto, se utiliza un método de control discreto en la cual no interviene el periodo (T) para incluirlo al microcontrolador al que se llama control incremental, el cual parte de las siguientes definiciones. [5]

- Control proporcional. Se tiene la siguiente ley de control con su función de transferencia en dominio de z.

$$u[k] = K_p e[k]$$

$$G(z) = K_p$$

- Control integral. Su ley de control y su función de transferencia en el dominio de z es la siguiente.

$$u[k] - u[k-1] = K_i e[k]$$

$$G(z) = \frac{K_i}{1 - z^{-1}}$$

- Control derivativo. Presenta la siguiente ley de control y su función de transferencia en dominio de z

$$u[k] = K_d (e[k] - e[k-1])$$

$$G(z) = K_d (1 - z^{-1})$$

Aplicando el método denominado control incremental, la función de transferencia del control PID en dominio de (z) se la puede simplificar de la siguiente forma:

$$\frac{U_{CPID}(z)}{E(z)} = \left(K_p + \frac{K_i}{(1 - z^{-1})} + K_d (1 - z^{-1}) \right)$$

En donde:

$$K_p = K - \frac{K_i}{2} \text{ Constante proporcional.}$$

$$K_i = \frac{KT}{T_i} \text{ Constante Integral.}$$

$$K_d = \frac{KT}{T_d} \text{ Constante derivativa.}$$

$$U_{CPID}(z) = \left(\frac{K_p(1-z^{-1}) + K_i + K_d(1-z^{-1})^2}{(1-z^{-1})} \right) E(z)$$

$$(1-z^{-1})U_{CPID}(z) = (K_p(1-z^{-1}) + K_i + K_d(1-z^{-1})^2)E(z)$$

$$(1-z^{-1})U_{CPID}(z) = (K_d z^{-2} - (K_p + 2K_d)z^{-1} + (K_p + K_i + K_d))E(z)$$

Aplicando la transformada inversa se tiene la ley de control expresada en la siguiente ecuación en diferencias:

$$u[k] - u[k-1] = K_d e[k-2] - (K_p + 2K_d)e[k-1] + (K_p + K_i + K_d)e[k]$$

3.3.1.2 Implementación de la ley de control.

De acuerdo con el diagrama de bloques del sistema de control con el controlador digital figura 3.14, la lectura de la variable controlada de la planta (Y_m) realiza la digitalización a un valor numérico (conversión análogo - digital).

El valor de referencia (r) se calibra directamente en forma digital, teniendo otra manera para ingreso de esta variable.

La señal de error se genera restando la variable medida y la referencia en forma digital, y con este valor numérico se aplica la ley de control obtenida por medio de la discretización.

El valor numérico de la variable de control ($u[k]$), realiza la conversión digital-analógica que sirve como la señal de control para la planta.

En vista de los periféricos que se deben implementar para el control digital, se utiliza un microcontrolador que cumpla con las exigencias del sistema de control.

Se escoge el microcontrolador PIC16F877A del fabricante MICROCHIP cuyas características más importantes son las siguientes:

- Frecuencia de operación: $DC - 20MHz$
- Memoria de programa: $8K$ de palabras de 14 bits
- Memoria de datos: $368Bytes$
- Memoria EEPROM: $256Bytes$
- Puertos: A ($6bits$), B ($8bits$), C ($8bits$), D ($8bits$), E ($3bits$)
- Timers: 3
- Módulos de comparación y captura, PWM: 2
- Interrupciones: 15
- Conversor A/D: 8 canales de 10bits
- Comparadores análogos: 2
- Set de instrucciones: 35 RISC
- 40 pines
- Polarización 5V

El microcontrolador seleccionado es el encargado de ejecutar la ecuación en diferencias del control PID además de realizar todas las funciones del controlador, como el sistema de selección del control y la visualización de los parámetros del

controlador, que se detalla en el diagrama estructural del numeral 3.4 de este proyecto.

La señal de la variable medida (Y_m) se la acondiciona para llegar al nivel de voltaje que maneja el microcontrolador (niveles TTL). Se digitaliza a esta señal por medio del conversor A/D del microcontrolador por el canal (AN0). La resolución de la conversión es de 8bits.

Para el ingreso del valor de la referencia y de los valores de las constantes del control PID se utiliza un teclado matricial cuya conexión se encuentra en la figura 3.32.

Con la señal digitalizada de la variable medida y el valor de la referencia se calcula el error, este valor puede ser negativo y el microcontrolador no maneja punto flotante, por lo que al microcontrolador se le incluye una rutina de identificación de números negativos para tener control en todo el rango de acción de la ecuación en diferencias.

La ecuación en diferencias toma los valores del error en estados anteriores, $e[k]$, $e[k-1]$, $e[k-2]$. El microcontrolador debe actualizar estos valores incluyendo el signo.

Con los valores de las constantes se introduce la ecuación como programa del microcontrolador.

El resultado de la ecuación en diferencias $u[k]$ es un valor numérico que se encuentra limitado por el número de bits utilizado. A este resultado se realiza la conversión de digital a analógica, utilizando la técnica PWM ya que el microcontrolador tiene la capacidad de generar esta onda.

El valor de la conversión es el voltaje medio de la señal generada. $V_{UPID} = V_{m_{PWM}}$.

$$V_{UPID} = V_{CC} \frac{ta}{T}$$

Donde:

V_{CC} : Voltaje de polarización del microcontrolador

ta : Tiempo en alto de la señal PWM.

T : Periodo de la señal PWM.

En el microcontrolador el tiempo en alto se representa por un número de 10bits. Para el controlador se toma una resolución de 8 bits.

La señal de control tiene como valor máximo 5V, por lo que se la filtra y se amplifica al valor de 10V para tener un rango de voltaje estandarizado para el controlador.

La frecuencia de trabajo del PWM es de 5000Hz, con este valor de frecuencia se diseña un filtro de segundo orden pasa bajos para tener sólo la componente de continua de la señal.

La señal PWM se genera por medio de registros que maneja el microcontrolador. El pin que genera la señal PWM es el RC2.

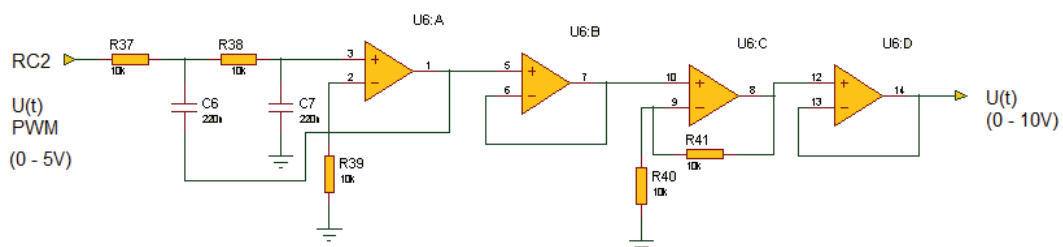


Figura 3.15 Circuito acondicionador de la señal de control PWM.

El circuito de acondicionamiento de la figura 3.15 presenta el siguiente diseño:

Sea la frecuencia de corte:

$$f_c = 500\text{Hz}$$

Calculando el valor de resistencia mediante la siguiente fórmula: [3]

$$f_c = \frac{0.9548}{2\pi CR}$$

Sea $C = 100\text{nF}$

$$R = \frac{0.9548}{2\pi * 100\text{nF} * 500\text{Hz}}$$

$$R = 3038\Omega$$

Entonces el valor de resistencia del filtro es: $R = 3300\text{K}\Omega$

$$R37 = R38 = 3.3\text{K}\Omega$$

$$C6 = C7 = 100\text{nF}$$

La ganancia del filtro de la figura 3.15 es de 1.

La siguiente etapa es de amplificación. Para lo cual se usa un amplificador no inversor cuya función de transferencia es:

$$G_2 = \frac{R41}{R40} + 1$$

$$G_2 = 2 = \frac{R41}{R40} + 1$$

$$R40 = R41$$

Sea: $R40 = 10K\Omega$

A la salida del amplificador se coloca un seguidor de voltaje para tener ganancia de corriente para el controlador digital.

A continuación se encuentra el diagrama de flujo del control PID digital que maneja el microcontrolador (figura 3.16)

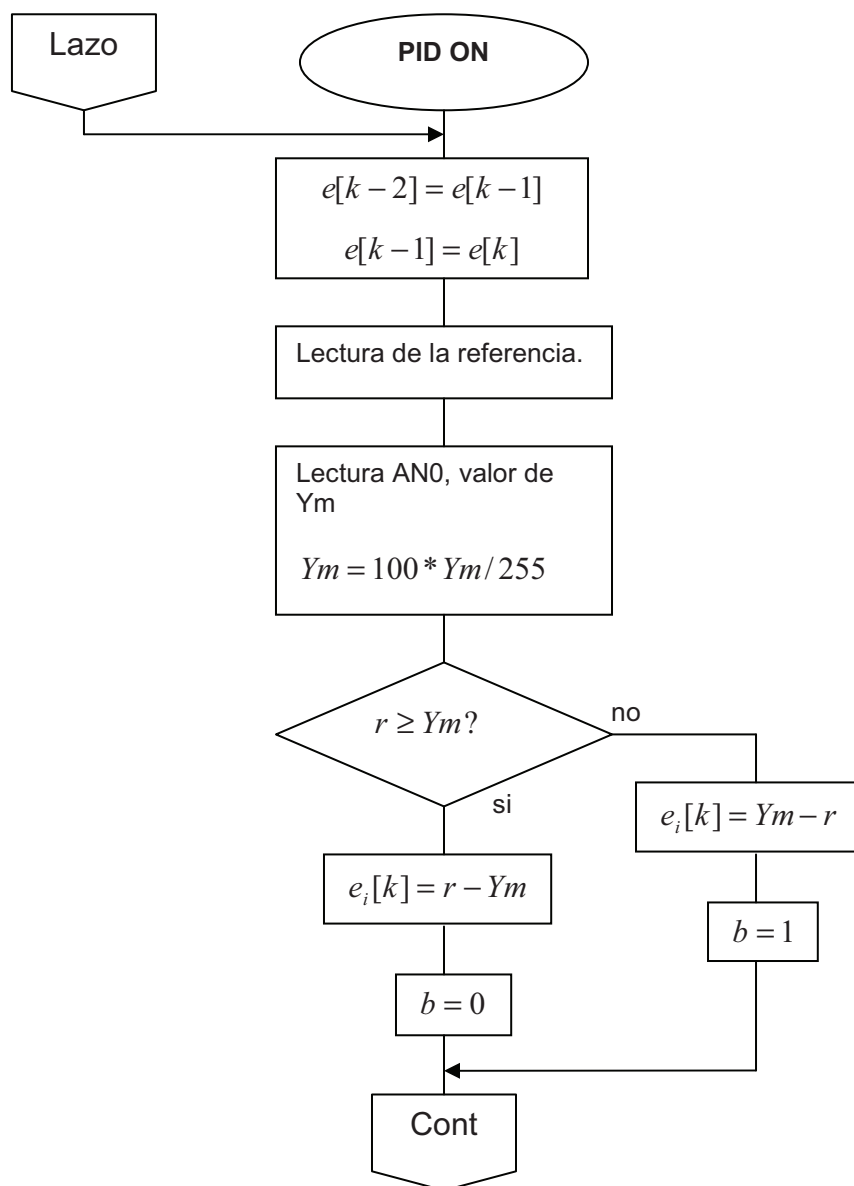


Figura 3.16 Diagrama de flujo del control PID microcontrolador (parte1).

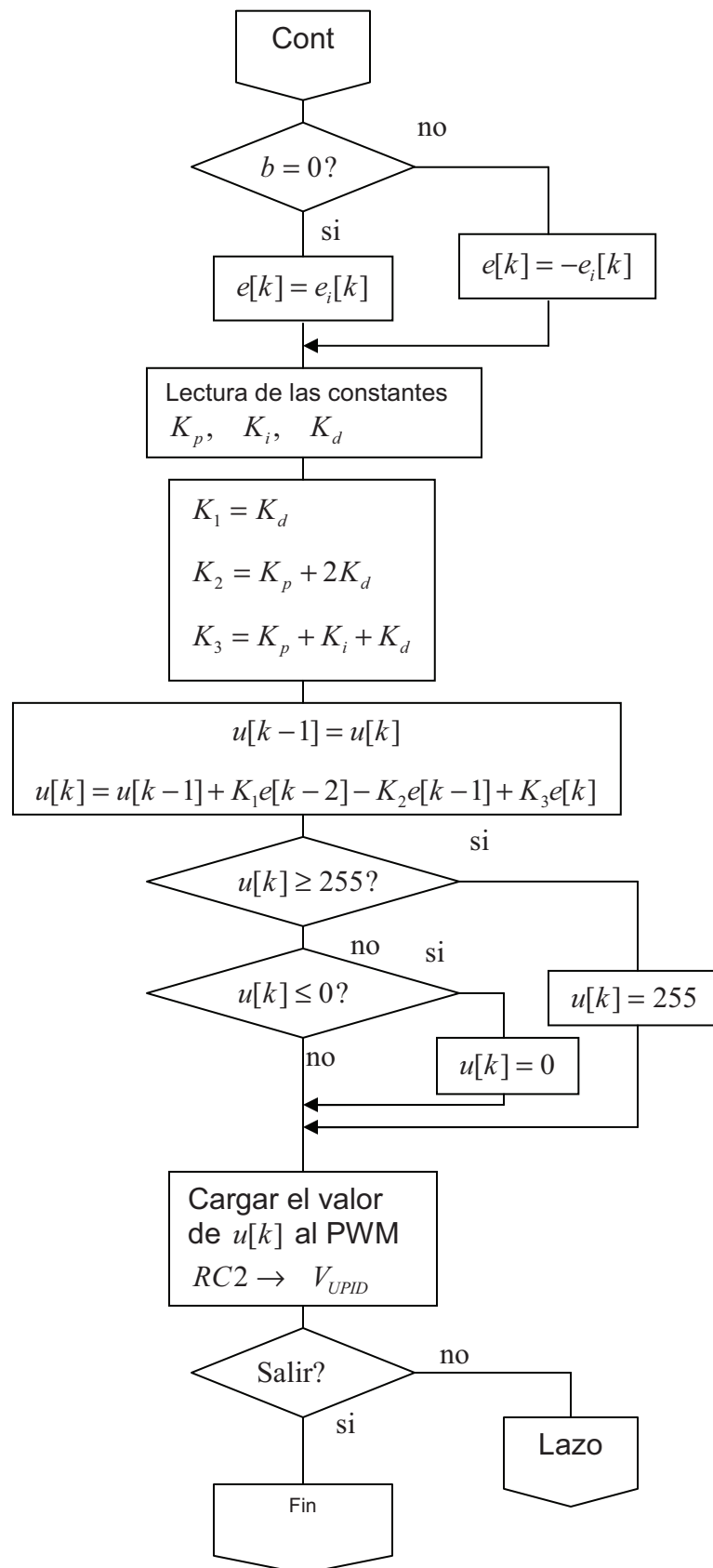


Figura 3.17 Diagrama de flujo del control PID microcontrolador (parte 2).

3.3.2 CONTROL PID EN BASE A COMPUTADOR.

3.3.2.1 Discretización del control PID.

Para el control PID por computador, la ley de control se obtiene a partir de la función de transferencia del control PID en dominio de s.

Se realiza la discretización de la función de transferencia utilizando el mismo método para el caso del control con microcontrolador, se obtiene la siguiente función de transferencia en dominio de s:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

La discretización del PID aplica el método Tustin para la parte integral y el rectangular hacia atrás para la parte derivativa se tiene:

$$G_{PID}(z) = K_p + \frac{K_i T_m (z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_d (z-1)}{T_m z}$$

Resolviendo la expresión se obtiene:

$$G_{PID}(z) = \frac{\left(K_p + \frac{K_i T_m}{2} + \frac{K_d}{T_m} \right) z^2 + \left(-K_p + \frac{K_i T_m}{2} - \frac{2K_d}{T_m} \right) z + \frac{K_d}{T_m}}{z(z-1)}$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{\left(K_p + \frac{K_i T_m}{2} + \frac{K_d}{T_m} \right) + \left(-K_p + \frac{K_i T_m}{2} - \frac{2K_d}{T_m} \right) z^{-1} + \frac{K_d}{T_m} z^{-2}}{(1-z^{-1})}$$

Entonces la ley de control para el control PID digital con computador es:

$$u[k] = u[k-1] + \left(K_p + \frac{K_i T_m}{2} + \frac{K_d}{T_m} \right) e[k] + \left(-K_p + \frac{K_i T_m}{2} - \frac{2K_d}{T_m} \right) e[k-1] + \frac{K_d}{T_m} e[k-2]$$

3.3.2.2 Implementación de la ley de control.

Para implementar la ley de control se utiliza el programa LabVIEW 8.6.

El valor de la referencia se ingresa dentro del mismo programa con un rango comprendido entre (0 y 10) y el valor de la variable medida (Y_m) se adquiere por medio de la tarjeta de adquisición de datos NI USB - 6008 cuyas características a tomar en cuenta son las siguientes:

- 8 canales analógicos configurables AI.
- 2 canales analógicos configurables de salida de datos AO.
- Configuración diferencial de los canales analógicos de 12 bits de resolución.
- Tarjeta de adquisición por puerto USB.
- Puerto digital bidireccional de 12 canales DIO.
- Configuración de la tarjeta a través del LabVIEW DAQmx.

La adquisición de la variable medida (Y_m) se realiza utilizando el canal (AI 0) de la DAQ, se configura a este canal para recibir la señal con niveles de voltaje comprendidos entre (0 y 10V).

Las constantes del control PID se ingresan dentro del mismo programa y la calibración de los parámetros se realiza en tiempo real.

La salida de la señal de control utiliza el canal (AO 0), el mismo que se configura con nivel de voltaje comprendido entre (0 – 5V). Dentro del programa de control por software se programan limitadores de voltaje hacia la tarjeta con el fin de no exceder los niveles de voltaje definidos para el funcionamiento del controlador.

La figura 3.18 muestra el panel frontal del control PID el mismo que permite la visualización de los parámetros ingresados como el valor de referencia, el valor

de la variable medida, y la forma de la respuesta de la variable medida proveniente de la planta.

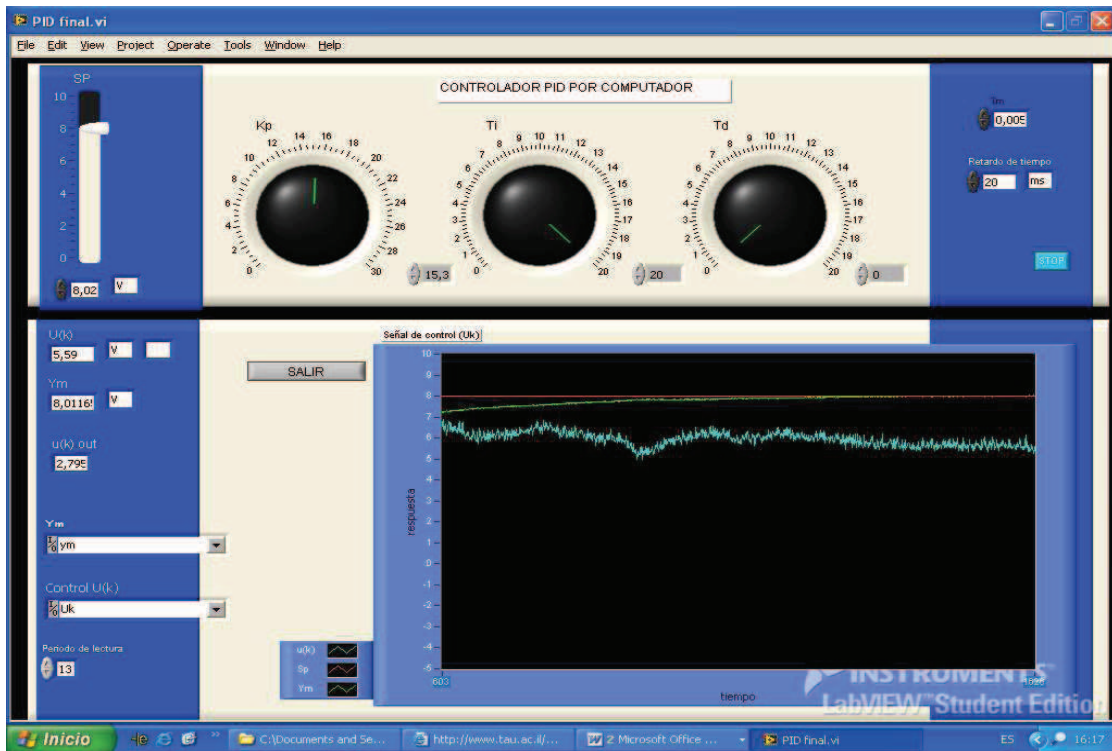


Figura 3.18 Panel frontal del control PID por computador.

La interfaz gráfica, permite el fácil ingreso de los parámetros de ajuste del control PID, además se incluyen dos subrutinas adicionales que permiten mejorar el control para la visualización de la respuesta de la planta, dependiendo si ésta es rápida o lenta evitando el continuo funcionamiento del control.

El diagrama de bloques de la figura 3.19 muestra el diagrama de flujo del programa de control que maneja el computador para el control PID mostrado en la figura 3.20.

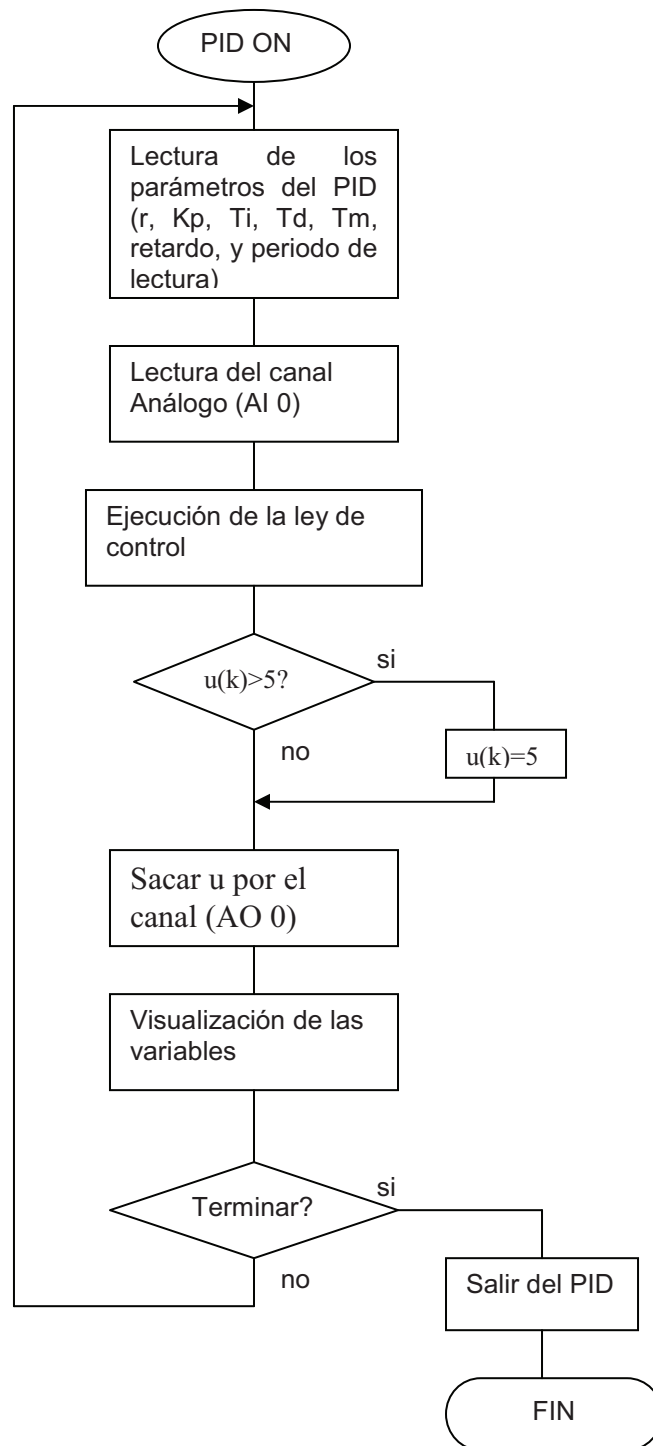


Figura 3.19 Diagrama de flujo del control PID computacional.

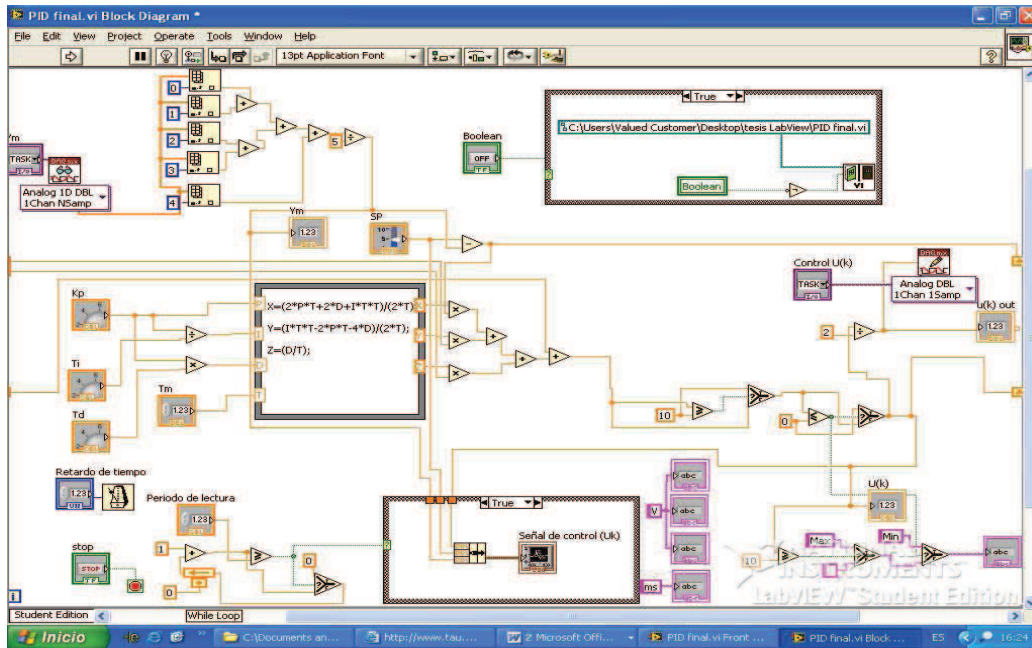


Figura 3.20 Diagrama de bloques control PID.

3.3.3 REDES DE ADELANTO Y ATRASO EN BASE A COMPUTADOR.

3.3.3.1 Discretización del control Redes.

La discretización de las redes de adelanto atraso se realiza a partir de la función de transferencia en función de s .

$$G_c(s) = K \frac{(s + a)}{(s + b)}$$

Para este controlador la discretización se realiza utilizando el método, 'zoh' (Retenedor de orden cero), cuya expresión es la siguiente:

$$G(z)_{zoh} = \frac{z-1}{z} \mathcal{Z} \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\}_z$$

$$G(z)_{zoh} = \frac{z-1}{z} \mathcal{Z} \left\{ \frac{K(s+a)}{s(s+b)} \right\}_z$$

$$G(z)_{zoh} = \frac{K(z-1)}{z} \mathcal{Z} \left\{ \frac{W}{s+b} + \frac{Y}{s} \right\}_z$$

Se determina los valores de W y Y por sistemas de ecuaciones:

$$G(z)_{zoh} = \frac{K(z-1)}{z} \mathcal{Z} \left\{ \frac{1 - \frac{a}{b}}{s+b} + \frac{\frac{a}{b}}{s} \right\}_z$$

Por medio de tablas se realiza la transformada de z obteniendo la siguiente expresión:

$$G(z)_{zoh} = \frac{K(z-1)}{z} \left\{ \frac{\left(1 - \frac{a}{b}\right)z}{z - e^{-bT}} + \frac{\frac{a}{b}z}{z-1} \right\}$$

Se desarrolla la expresión y se llega a la función de transferencia del compensador en el dominio de z.

$$G_{CREDES}(z) = \frac{K \left(z - \left(1 - \frac{a}{b} + \frac{a}{b} e^{-bt}\right) \right)}{z - e^{-bt}}$$

$$G_{CREDES}(z) = \frac{K \left(1 - \left(1 - \frac{a}{b} + \frac{a}{b} e^{-bt}\right) z^{-1} \right)}{1 - e^{-bt} z^{-1}}$$

Entonces la ley de control para el control por redes es:

$$u[k] = e^{-bt} u[k-1] + Ke[k] + K \left(\frac{a}{b} - \frac{a}{b} e^{-bt} - 1 \right) e[k-1]$$

Para determinar los valores de los parámetros del compensador aplicado a una planta se recurre a varios métodos; en el caso del módulo de temperatura se recurre a la compensación por lugar Geométrico de las raíces.

Con ayuda del Matlab se obtiene el Lugar Geométrico del prototipo de temperatura. A partir de los siguientes comandos:

```
>> Gpl=tf([19.76],[1 240 1.5])
```

Transfer function:

19.76

s² + 240 s + 1.5

```
>> rlocus(series(Gpl,0.1))
```

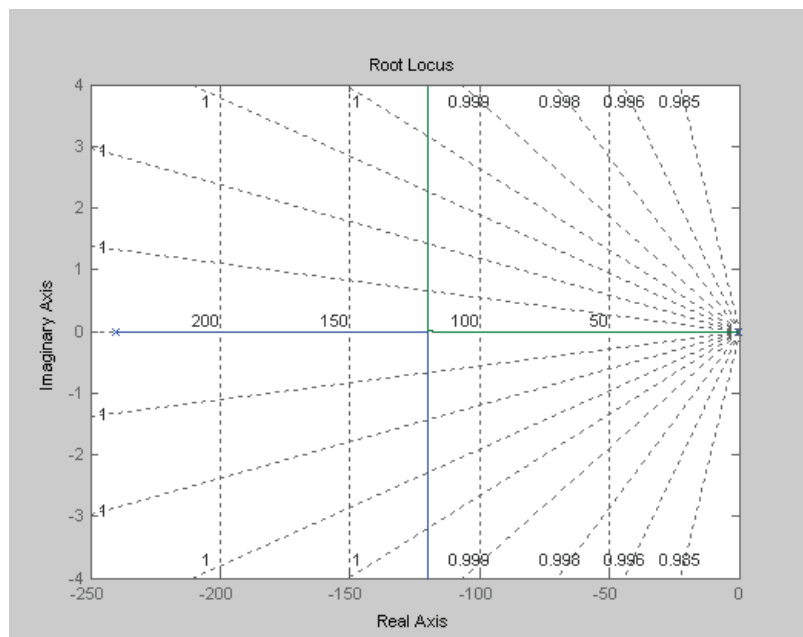


Figura 3.21 LGR de la planta.

El diseño del controlador se determina a partir de los polos deseados.

$$P_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2}$$

$$Mp = 5\%$$

$$t_s = 170s$$

Donde:

$$\tau = \frac{1}{\xi\omega_n}$$

$$Mp = e^{\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

Resolviendo la expresión del máximo sobre pico se determina el valor de ξ :

$$\xi = 0.6986$$

Resolviendo la expresión de la constante de tiempo se determina el valor de ω_n

$$\omega_n = 0.0337$$

$$P_{1,2} = -0.02353 \pm j0.02411$$

Condición de ángulo $\angle GH(s)|_s = -180$

$$\angle GH(s)|_{s=-0.02353+j0.02411}$$

$$\angle \frac{1.976}{(s+240)(s+0.00625)} \Big|_{s=-0.02353+j0.02411}$$

$$-\angle(s+240)|_{s=-0.02353+j0.02411} - \angle(s+0.00625)|_{s=-0.02353+j0.02411} + \theta_A = -180$$

Resolviendo la expresión:

$$\theta_A = -54.38$$

Se asume el valor del cero del compensador: $a = 1$, y se realiza la compensación con el ángulo θ_A .

$$\angle(s+1)\Big|_{s=-0.02353+j0.02411} - \angle(s+b)\Big|_{s=-0.02353+j0.02411} = -54.38$$

Resolviendo la expresión:

$$b = 0.04$$

Condición de módulo: $|GH(s)| = 1$

$$\frac{K|s+1||1.976|}{|s+0.04||s+240||s+0.00625|} = 1: \text{ Evaluado en el polo deseado:}$$

$$K = 0.107$$

$$G_{CREDES} = \frac{0.107(s+1)}{s+0.04}$$

Por medio del Matlab se realiza la simulación del sistema compensado cuya respuesta se presenta en la figura 3.22.

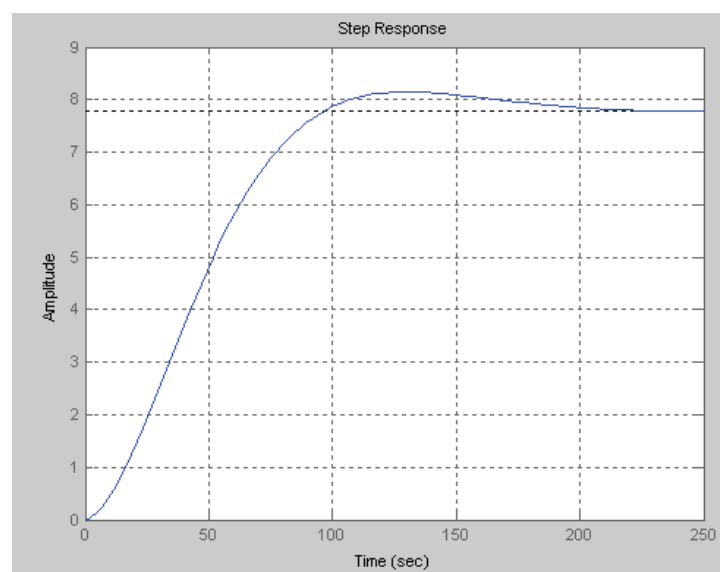


Figura 3.22 Simulación del sistema de control compensado.

$$Mp = 4.58\%$$

$$t_s = 177s$$

$$Ep = 22\%$$

Con los valores de los parámetros del compensador se puede determinar un rango de variación de los mismos para incorporar al programa.

3.3.3.2 Implementación de la ley de control.

De la misma forma de la implementación de la ley de control del PID, en la ley de control por redes se aplica la misma forma de programación y presentación de los parámetros.

La señal de referencia y de los demás parámetros del compensador se ingresan por software. La señal de la variable medida se adquiere por el canal (AI 0) de la DAQ y la señal de salida de control se saca por el canal (AO 0) con limitación de voltaje de control a 5v máximo.

La visualización de los parámetros se puede configurar de la misma manera que para en el caso del control PID incluyendo también un periodo de retardo para la ejecución de la ley de control y la presentación de la respuesta de la planta.

La figura 3.23 y 3.24 presentan el panel frontal y el diagrama de bloques del control por redes respectivamente y el diagrama de flujo que describe el funcionamiento del controlador se muestra en la figura 3.25.

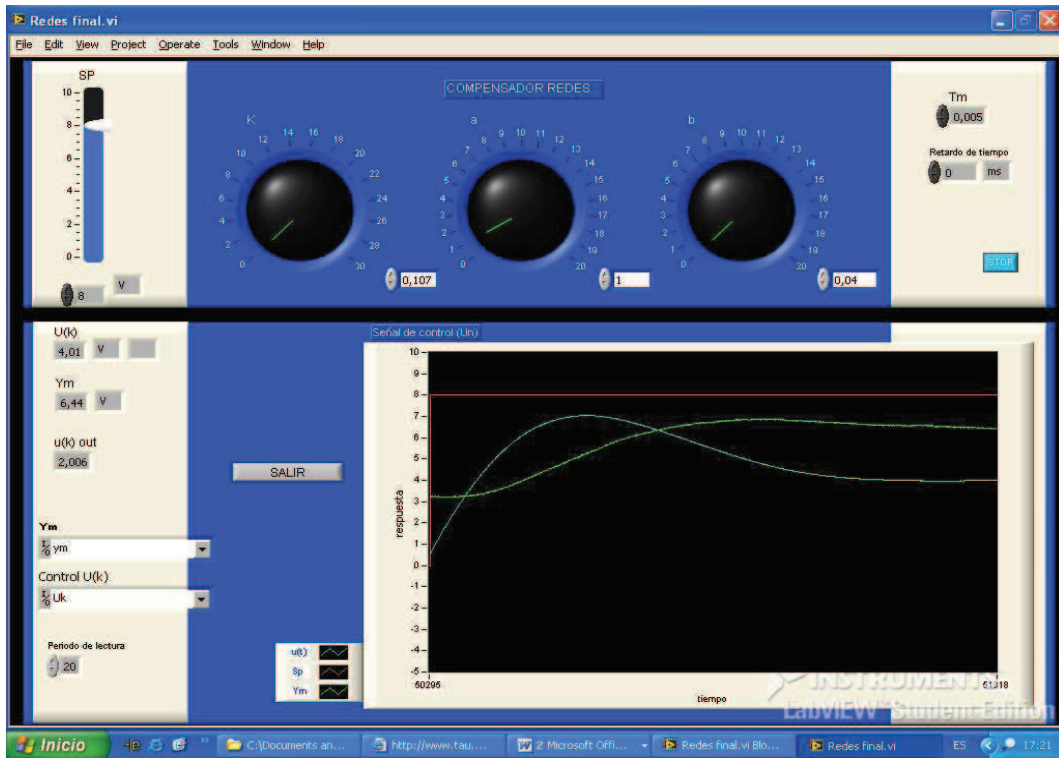


Figura 3.23 Panel frontal del control por redes.

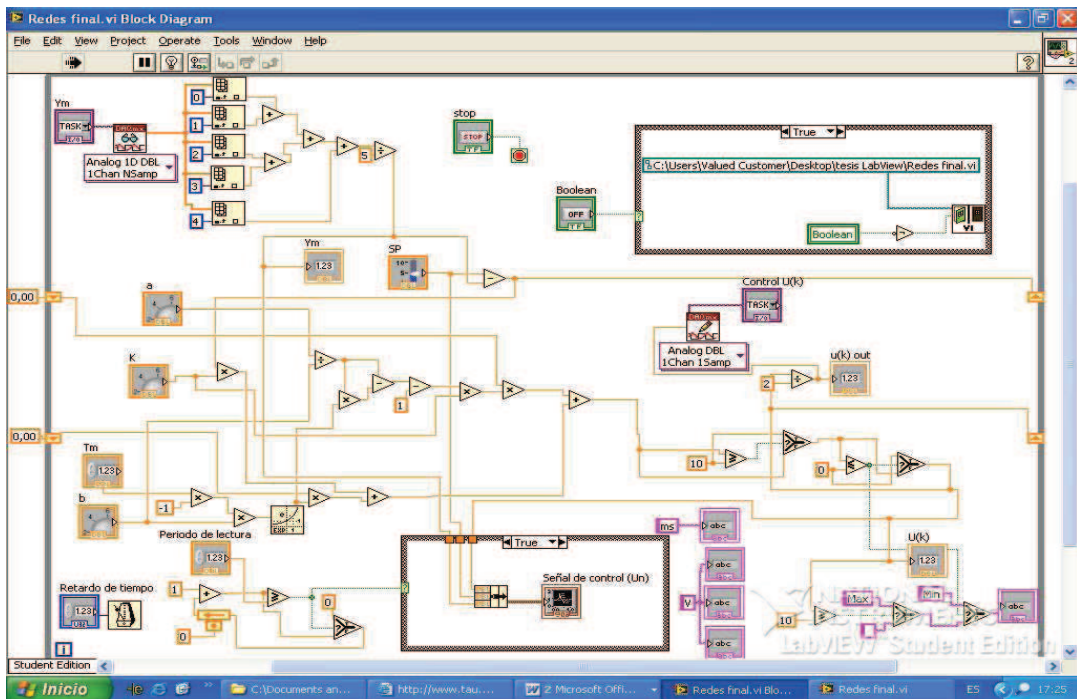


Figura 3.24 Diagrama de bloques control por redes.

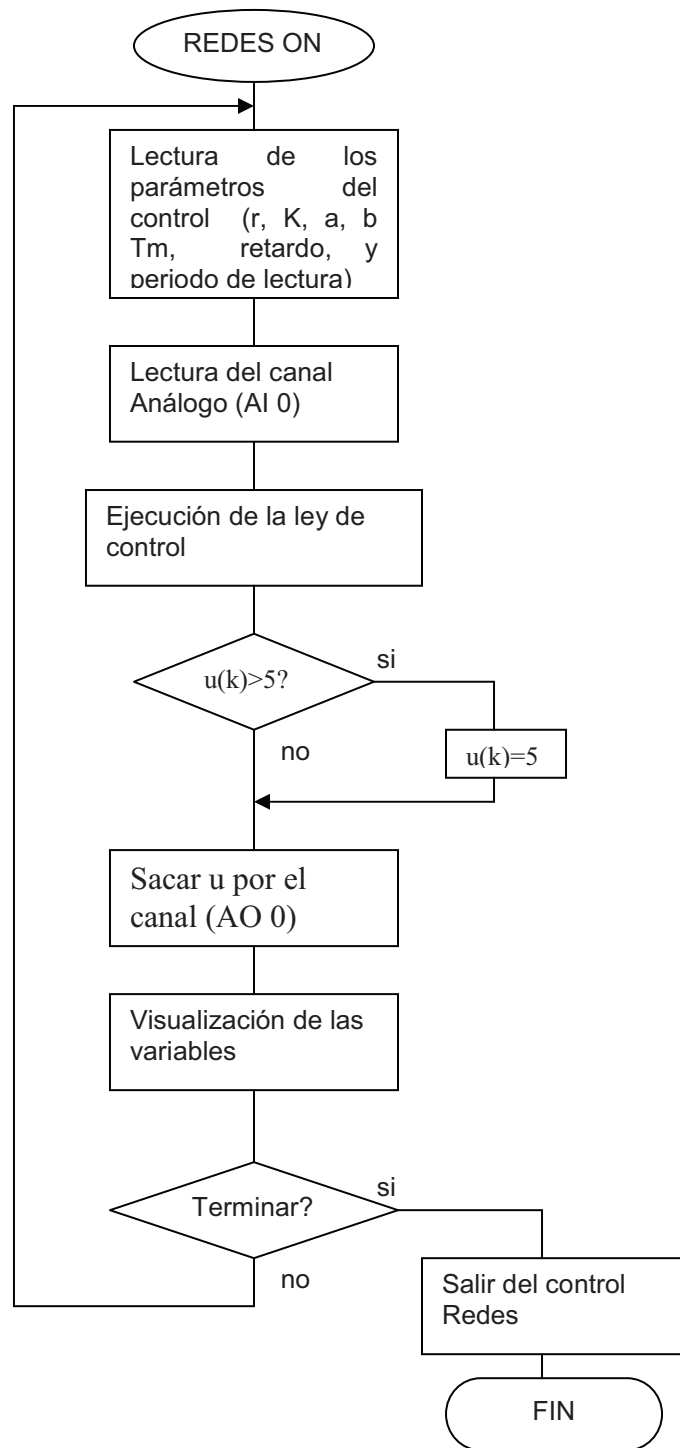


Figura 3.25 Diagrama de flujo del control por redes.

3.4 DISEÑO ESTRUCTURAL.

En esta parte del proyecto se describe en forma detallada la estructura del controlador incluyendo los circuitos involucrados para la visualización de las variables, ingreso de la referencia, acceso a los tipos de control implementados y el sistema microprocesado del controlador.

Para todo el sistema microprocesado se utiliza el microcontrolador con el cual se realiza el control PID digital (PIC16F877A).

3.4.1 ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE LOS CONTROLADORES ANÁLOGOS.

Partiendo del diagrama de bloques del controlador de la figura 3.1 para la visualización de las variables de los controladores se realiza primero el acondicionamiento a los valores permitidos por el microcontrolador de (0 - 5V).

Los dos tipos de control análogos involucrados tienen en común la misma entrada del valor de referencia, en el diseño de estos dos controladores los niveles de voltaje que representa esta variable son de (0 – 10V) figura 3.3.

El acondicionamiento de la referencia es un divisor de voltaje con una ganancia de 0.5.

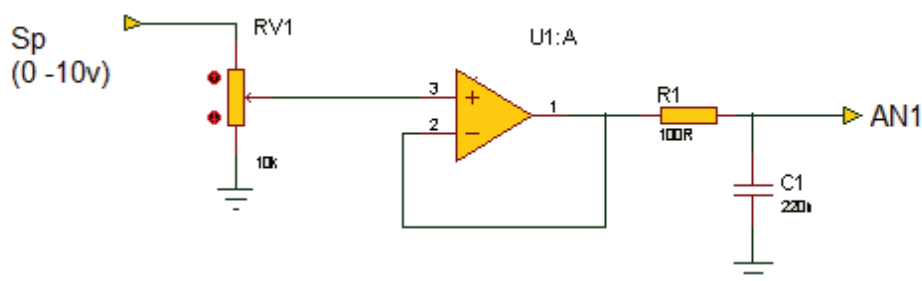


Figura 3.26 Circuito de acondicionamiento de la referencia.

Con la señal acondicionada se realiza la lectura por un canal del conversor AD (AN1) del microcontrolador.

Adicionalmente se coloca un filtro pasa bajos de primer orden a la entrada analógica del microcontrolador.

Existen otras variables a tomar en cuenta que deben ser acondicionadas para ser visualizadas pero que son individuales por cada tipo de control. A continuación se detallan las variables visualizadas para cada tipo de control análogo.

3.4.1.1 Control en Lazo Cerrado.

En el control en lazo cerrado la señal a tomar en cuenta es la señal de error.

La señal de error tiene un rango de funcionamiento de $V_E : (-10V, 10V)$, con este rango de funcionamiento existe la posibilidad de que la señal de error sea negativa cuando la señal de acondicionamiento de la variable controlada sea mayor al del voltaje de referencia.

Para estos casos de voltaje negativo se coloca un diodo zener a la salida del circuito acondicionador, figura 3.27, limitando el voltaje a los valores positivos de la señal de control.

La ganancia del circuito de acondicionamiento es de 0.5 para llegar a los niveles que maneja el conversor AD del microcontrolador.

La lectura del valor de voltaje acondicionado se realiza por medio del canal AN6 del conversor AD del microcontrolador.

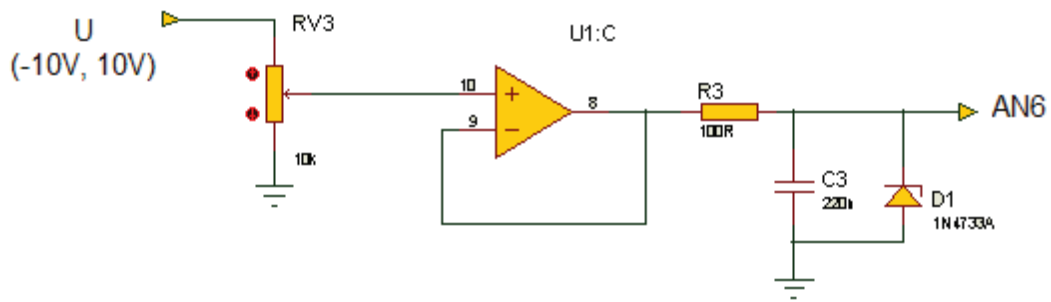


Figura 3.27 Circuito de acondicionamiento de voltaje de control.

3.4.1.2 Control PID Análogo.

En el control PID análogo las señales que deben ser visualizadas son la señal de control del PID y los valores de las constantes del controlador.

Para la señal de control (U) el circuito de acondicionamiento es un circuito reductor de voltaje a los niveles que maneje el microcontrolador.

La señal de voltaje del control PID tiene un rango comprendido entre $V_{uPID} : (0, 10V)$, la ganancia del circuito de acondicionamiento es de 0.5, al cual se le coloca un filtro pasa bajos para la lectura del canal análogo AN3 del microcontrolador.

La figura 3.28, indica el circuito de acondicionamiento de la señal de control del PID análogo para la lectura del microcontrolador y su respectiva visualización. Adicionalmente se controla a este voltaje, como se encuentra detallado en la realización del programa de control del microcontrolador.

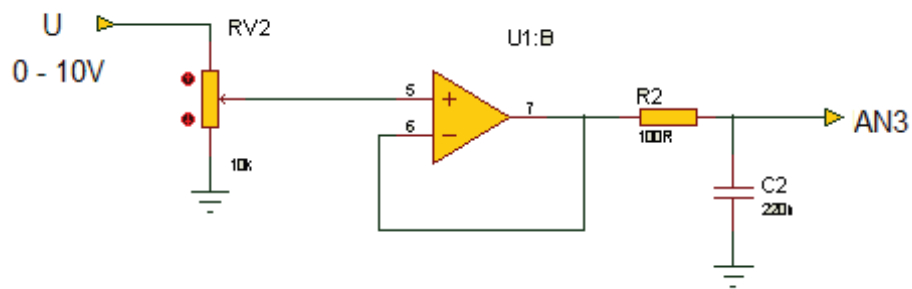


Figura 3.28 Acondicionamiento del voltaje de control del PID análogo.

La visualización de los valores de las constantes del controlador es un factor importante para la calibración del controlador y el funcionamiento del sistema de control.

Los valores de las constantes del control PID son valores provenientes de las impedancias de los dispositivos que componen el controlador.

En el caso de la constante proporcional, su valor es el valor de la ganancia del amplificador de la figura 3.10a.

En el caso de la constante integral, su valor es el valor del producto entre la resistencia y la capacitancia de la figura 3.10b y que genera la constante de tiempo por medio del amplificador operacional.

El valor de la constante derivativa es el producto entre la resistencia del potenciómetro y la capacitancia (C4) de la figura 3.10c, generando la constante de tiempo derivativa por medio del amplificador operacional.

El acceso a estos valores de las constantes del controlador es complicado realizarlo en forma directa. Entonces, para determinar estos valores se utiliza métodos indirectos pero que presentan errores mínimos.

El acondicionamiento de estas tres constantes es el mismo, se opta por el uso de potenciómetros dobles, los cuales se utilizan para sistemas de audio.

Los valores de resistencia de los potenciómetros son acorde a los valores dimensionados anteriormente del controlador.

Para las tres constantes, su valor depende del valor de resistencia del potenciómetro multiplicado por una constante, ya sea resistencia en el caso de la constante proporcional ó capacitancia para el caso de las constantes integral o derivativa.

$$K_p = K_1 * R_p$$

$$T_i = K_2 * R_i$$

$$T_d = K_3 * R_d$$

Con la ayuda de los potenciómetros dobles se realiza doble acción. Los potenciómetros dobles son eléctricamente aislados, por lo que al segundo potenciómetro se le puede acondicionar para obtener el voltaje que representa al valor de la constante.

A la salida de las señales de voltaje se coloca un circuito seguidor de voltaje para acoplar impedancias ya que el valor de resistencia de los potenciómetros es elevado para hacer una lectura directa.

La figura 3.29 muestra el circuito de acondicionamiento de las constantes del controlador donde se puede apreciar el funcionamiento de los potenciómetros.

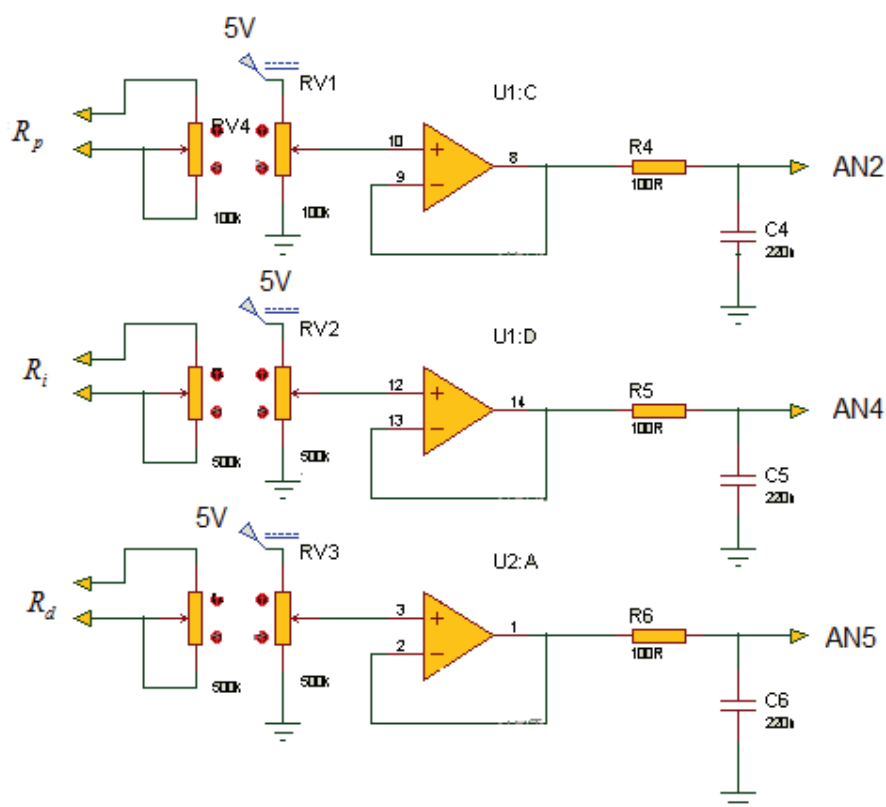


Figura 3.29 Circuito de acondicionamiento de las constantes del control PID análogo.

Los voltaje acondicionados con su respectivo filtro pasa bajos de la constante proporcional, integral y derivativa van a los canales AN2, AN4, y AN5 del microcontrolador respectivamente.

3.4.2 ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE LA PLANTA.

La variable medida (Y_m) es la señal que proviene de la planta. Los controladores análogos requieren el valor de la variable medida (Y_m) en voltaje de $V_{Y_m} : (0-10v)$.

Con esta variable a más de realizar la visualización de la misma, también se realiza el control digital en base a microcontrolador.

El rango de voltaje para la lectura en el microcontrolador se reduce al valor $V_{YmuC} \rightarrow (0-5V)$ utilizando un divisor de voltaje.

La figura 3.30 muestra el circuito de acondicionamiento para realizar el monitoreo del voltaje de la señal medida de la planta y también se utiliza el control digital en base al microcontrolador.

Adicionalmente se coloca un filtro pasa bajos de primer orden para disminuir el efecto de ruido de la señal.

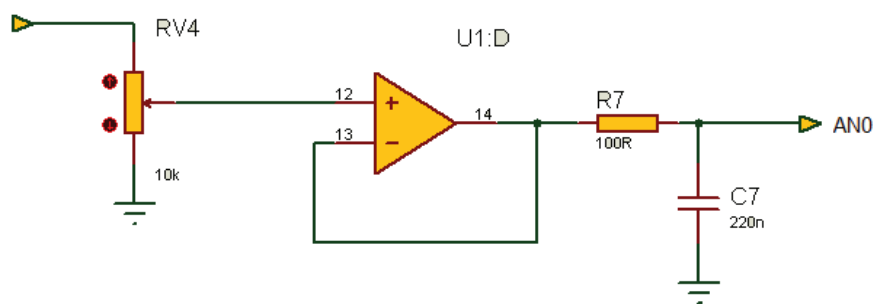


Figura 3.30 Circuito de acondicionamiento de la variable medida de la planta.

La señal de voltaje acondicionado se la introduce en el canal (AN0) del microcontrolador.

3.4.3 INTERFAZ GRAFICA DEL CONTROLADOR.

De acuerdo con el diagrama de bloques del controlador de la figura 3.1, se requiere de un sistema de ingreso de datos para el controlador digital y visualización de las variables que intervienen en todo el sistema.

3.4.3.1 Sistema de ingreso de datos.

Para tener un controlador que tenga la facilidad de seleccionar el tipo de control que se necesite e ingresar los valores de los parámetros del controlador digital, se realiza el diseño de un circuito que cumpla con este fin, para esto se opta por un teclado matricial con su respectivo circuito de decodificación.

La decodificación de teclado se puede realizar dentro del microcontrolador que realiza el control PID y la lectura de las señales del controlador, pero este sistema puede disminuir el rendimiento del funcionamiento de control PID digital. Por lo cual se utiliza un circuito decodificador externo para obtener un dato numérico y evitar la decodificación dentro del microcontrolador principal.

El circuito integrado que maneja la decodificación de teclado matricial es el 74C922, cuyo funcionamiento se describe de la siguiente forma.

El dato de la tecla presionada se representa en un número de 4 bits que va desde el 0 hasta el 15. Cada vez que se presiona una tecla el integrado genera una señal de aviso que indica que se presionó una tecla e indica el valor numérico respectivo de la tecla presionada.

Este circuito integrado es demasiado caro por lo que se recurre al uso de un microcontrolador que tenga incluido el algoritmo de decodificación de teclado.

El microcontrolador utilizado es el PIC16F628A y el diagrama de flujo para la decodificación de teclado se indica en la figura 3.31.

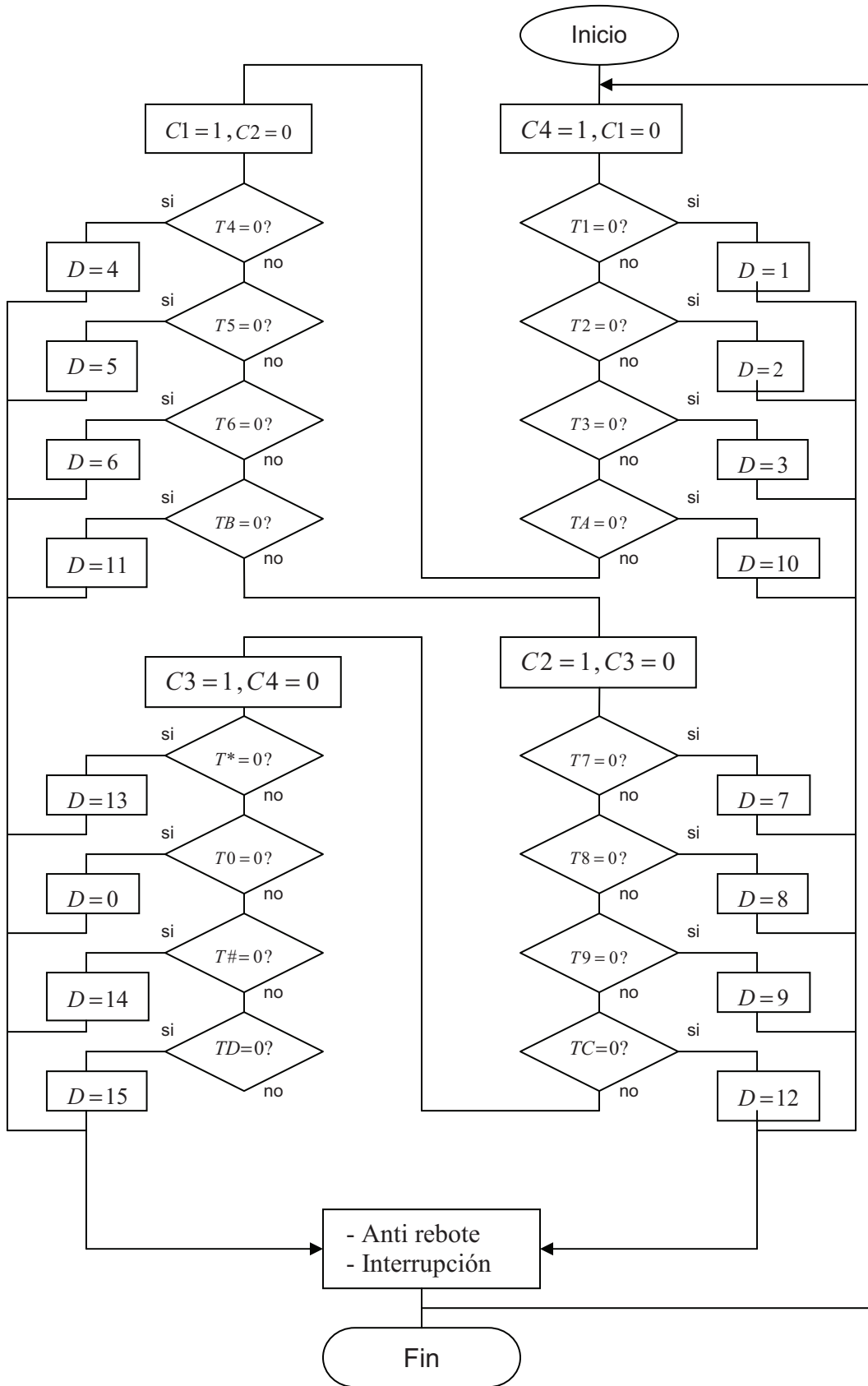


Figura 3.31 Diagrama de flujo del decodificador de teclado.

Con el circuito decodificador figura 3.32, el ingreso de los datos utiliza el puerto D del microcontrolador principal y la señal de interrupción se coloca en el pin (RB0).

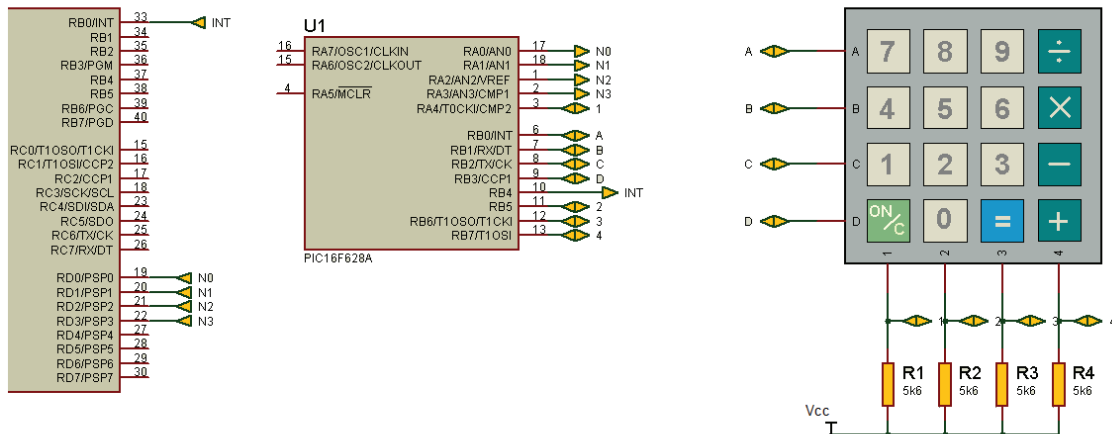


Figura 3.32 Circuito decodificador de teclado con microcontrolador.

3.4.3.2 Sistema de visualización de datos.

Para la visualización de las variables ingresadas al microcontrolador principal se utiliza un display de cristal líquido (LCD) de 2x16, el mismo que tiene las siguientes características:

- Voltaje de polarización $V_{cc} = 5V$.
- Consumo menor de 5mA.
- Dispone de 16 matrices de 5x8.
- Selección de funcionamiento de 8bits ó 4bits para datos.
- Tres pines de control del display R/W, E, RS.
- Set de instrucciones predefinido.
- Ajuste de contraste del display.
- Back Light opcional.
- ROM, que tiene predefinido 240 caracteres diferentes representados en matrices de 5x7.

- RAM, para generar 8 diferentes tipo de caracteres por el usuario.

| Código | Car. | Código | Car. | Código | Car. | Código | Car. | Código | Car. | Código | Car. |
|--------|---------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| \$20 | espacio | \$30 | 0 | \$40 | | \$50 | P | \$60 | ' | \$70 | p |
| \$21 | ! | \$31 | 1 | \$41 | A | \$51 | Q | \$61 | a | \$71 | q |
| \$22 | '' | \$32 | 2 | \$42 | B | \$52 | R | \$62 | b | \$72 | r |
| \$23 | # | \$33 | 3 | \$43 | C | \$53 | S | \$63 | c | \$73 | s |
| \$24 | \$ | \$34 | 4 | \$44 | D | \$54 | T | \$64 | d | \$74 | t |
| \$25 | % | \$35 | 5 | \$45 | E | \$55 | U | \$65 | e | \$75 | u |
| \$26 | & | \$36 | 6 | \$46 | F | \$56 | V | \$66 | f | \$76 | v |
| \$27 | ' | \$37 | 7 | \$47 | G | \$57 | W | \$67 | g | \$77 | w |
| \$28 | (| \$38 | 8 | \$48 | H | \$58 | X | \$68 | h | \$78 | x |
| \$29 |) | \$39 | 9 | \$49 | I | \$59 | Y | \$69 | i | \$79 | y |
| \$2A | * | \$3A | : | \$4A | J | \$5A | Z | \$6A | j | \$7A | z |
| \$2B | + | \$3B | : | \$4B | K | \$5B | [| \$6B | k | \$7B | { |
| \$2C | , | \$3C | < | \$4C | L | \$5C | | \$6C | l | \$7C | |
| \$2D | - | \$3D | = | \$4D | M | \$5D |] | \$6D | m | \$7D | } |
| \$2E | . | \$3E | > | \$4E | N | \$5E | ^ | \$6E | n | \$7E | → |
| \$2F | / | \$3F | ? | \$4F | O | \$5F | _ | \$6F | o | \$7F | ← |

Tabla 3.2 Código asociado a cada carácter imprimible por el display.

Todos los códigos están en hexadecimal. No se han representado los caracteres correspondientes a los códigos desde el \$80 hasta el \$FF, que corresponden a símbolos extraños. Los códigos comprendidos entre el \$0 y el \$7 están reservados para que el usuario los defina.

Para el funcionamiento del display se requiere su inicialización por medio de rutinas preestablecidas por el fabricante, el programa utilizado Microcode tiene las librerías del manejo de este display por lo que no se requiere la inicialización u otras rutinas específicas para el display.

La figura 3.33 muestra el diagrama circuital de la conexión del display LCD con el microcontrolador.

En la conexión se utiliza el puerto B del microcontrolador, con la siguiente distribución:

Datos: D4, D5, D6 y D7 con los pines RB4, RB5, RB6 y RB7 respectivamente.

Control: R/W, RS y E con GND, RB2 y RB3 respectivamente.

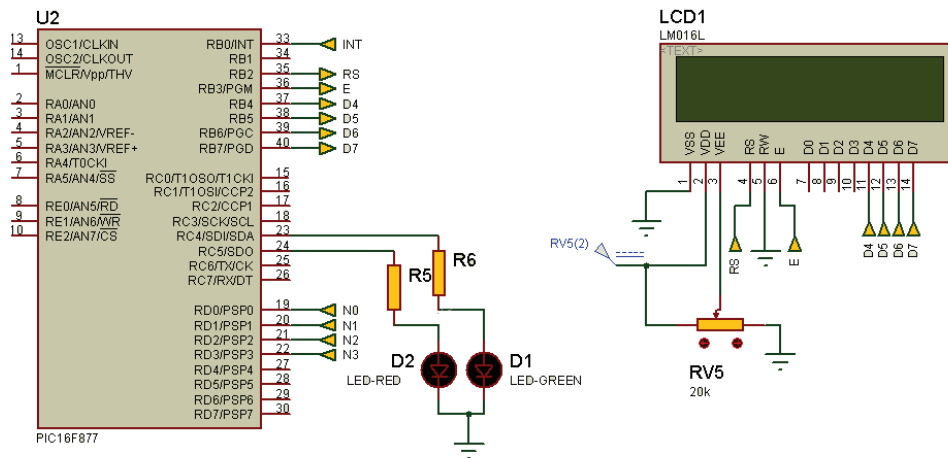


Figura 3.33 Diagrama lógico del visualizador.

3.4.4 CIRCUITO SELECTOR DE LA SEÑAL DE CONTROL.

El circuito de selección permite escoger el tipo de control requerido por el usuario sin modificar la conexión de la planta con el controlador.

El diagrama de bloques del controlador (figura 3.1) indica la forma de conexión del circuito de selección. Las señales provenientes de: control en lazo cerrado, control PID análogo, control PID con el microcontrolador, linealizador de la variable de control y control por computadora; presentan cuatro fuentes diferentes de las que provienen las señales de control.

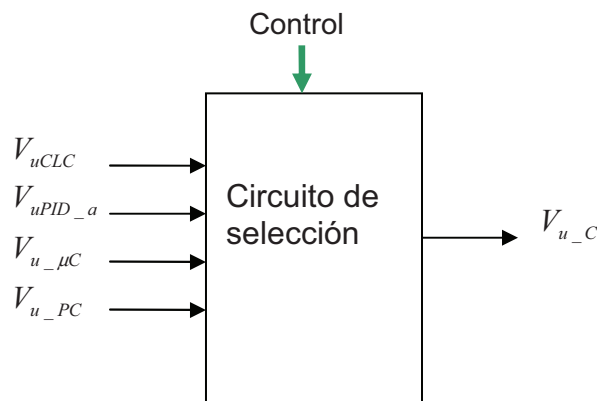


Figura 3.34 Diagrama de bloques del circuito de selección del controlador.

El rango de funcionamiento para todos los tipos de control es el mismo $V_{u_c} : (0-10V)$, para el circuito multiplexor de señales analógicas se utiliza relés conectados en cascada y cada uno de ellos controlados por el microcontrolador principal, permitiendo la selección del tipo de control escogido por medio del teclado matricial.

A continuación se muestra el diagrama circuital del selector del tipo de controlador.

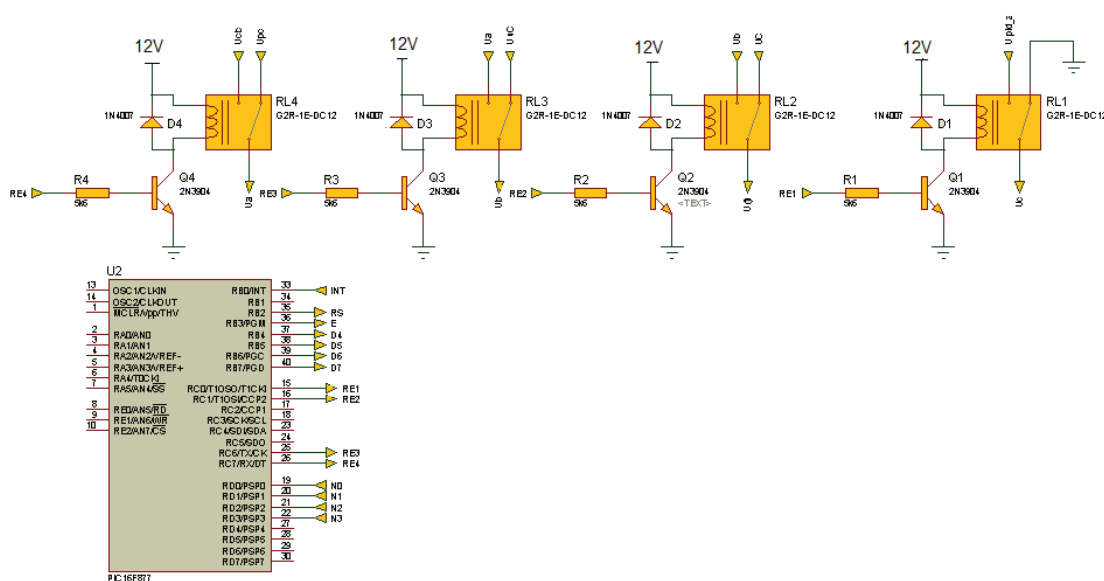


Figura 3.35 Diagrama circuital del selector de tipo de control.

3.4.5 ACONDICIONADOR DE NIVELES DE VOLTAJE DE LA SEÑAL DE CONTROL.

La señal de control $U_c(t)$ maneja un rango de voltaje de funcionamiento de $V_{u_c} : (0-10V)$ para todos los tipos de control. No en todos los prototipos de planta requieren este rango de funcionamiento, especialmente cuando se necesitan señales de voltaje de control negativos ($V_{u_c} < 0$).

En este proyecto se toma los dos rangos de funcionamiento del voltaje del controlador:

El rango normalizado de voltaje V_{uC} : $(0-10V)$ y un rango que incluye voltajes negativos del voltaje de control V_{uC2} : $(-10V-10V)$.

Este voltaje se obtiene utilizando dos etapas: la primera, se resta el voltaje de control para obtener los valores negativos y la segunda, la amplificación de este voltaje a los niveles previamente establecidos.

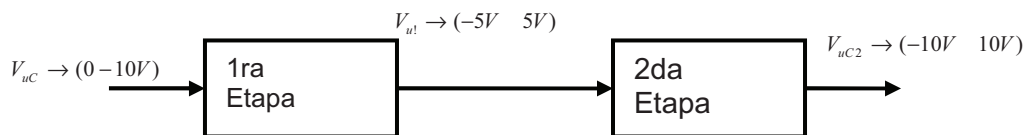


Figura 3.36 Diagrama de bloques del acondicionador de la señal de control.

En la primera etapa se utiliza un circuito diferencial colocando como voltaje negativo al voltaje de alimentación $V_{CC} = 5V$ con el voltaje de control.

La ganancia de la primera etapa es 1, con la cual los valores de las resistencias del circuito diferencial son:

$$V_{u1} = \frac{R_f}{R_a}(V_{uC} - 5V)$$

De acuerdo con el circuito de la figura 3.37 el valor de las resistencias para cumplir con esta condición son del mismo valor:

$$R_{42} = R_{43} = R_{44} = R_{45} = R$$

Donde:

$$R = 20K\Omega$$

En la segunda etapa se realiza la amplificación del voltaje, se utiliza un circuito amplificador no inversor que tenga una ganancia de 2.

$$G_2 = 2 = 1 + \frac{R46}{R47}$$

Despejando la ecuación se tiene: $R46 = R47$

Se escoge como valor de resistencia de: $R46 = 20K\Omega$

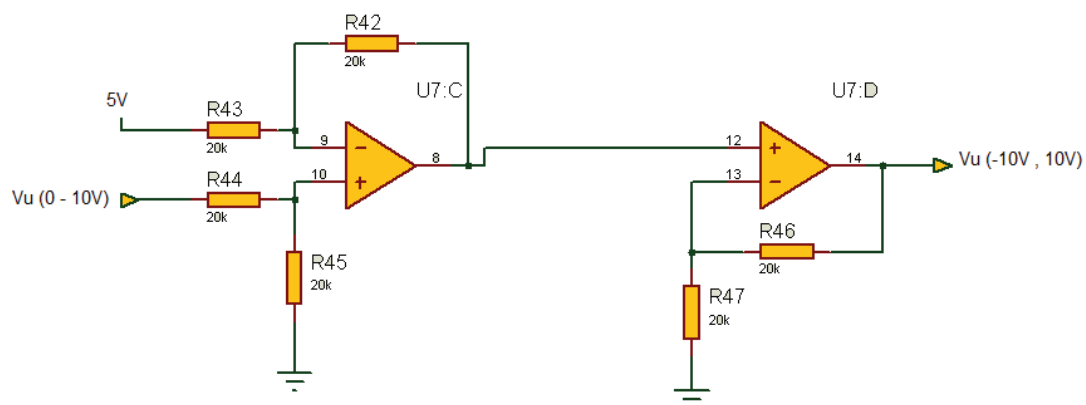


Figura 3.37 Circuito acondicionador de voltaje de la señal de control.

3.4.6 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.

Tanto el módulo de temperatura como el controlador requieren de una fuente de alimentación que cumpla con la demanda de los dos módulos, para lo cual se toma en cuenta los niveles de voltaje requeridos:

$$V(+)=12V$$

$$V(-)=-12V$$

$$V_{cc} = 5V$$

Tomando en cuenta la cantidad de circuitos de control, señalización, visualización y otros, la demanda de corriente es alta.

Se escoge como la fuente de alimentación a una fuente switching utilizadas en los computadores de escritorio que presenta las siguientes características:

- Marca: ALTEK
- Alimentación: $V_{AC} = (110 - 120V)$ ó $V_{AC} = (220 - 240V)$ $f = 60Hz$
- Potencia nominal: 600W
- Niveles de voltaje.

$$V(+)=12V \quad I_{\max} = 15A$$

$$V(-)=12V \quad I_{\max} = 0.8A$$

$$V_{cc} = 5V \quad I_{\max} = 28A$$

$$V_{ee} = -5V \quad I_{\max} = 0.5A$$

$$V = 3.3V \quad I_{\max} = 35A$$

- Dimensiones de la carcasa. (15cm x 11cm x 8.5cm)

3.4.7 DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROLADOR.

Con el diseño del sistema microprocesado del controlador, ahora se presenta el diagrama de flujo que representa el funcionamiento al que se rige el manejo de los periféricos y el HMI del controlador.

Las figuras desde la 3.38 a la 3.43 describen la lógica de funcionamiento del microcontrolador en base a los diagramas de flujo indicados.

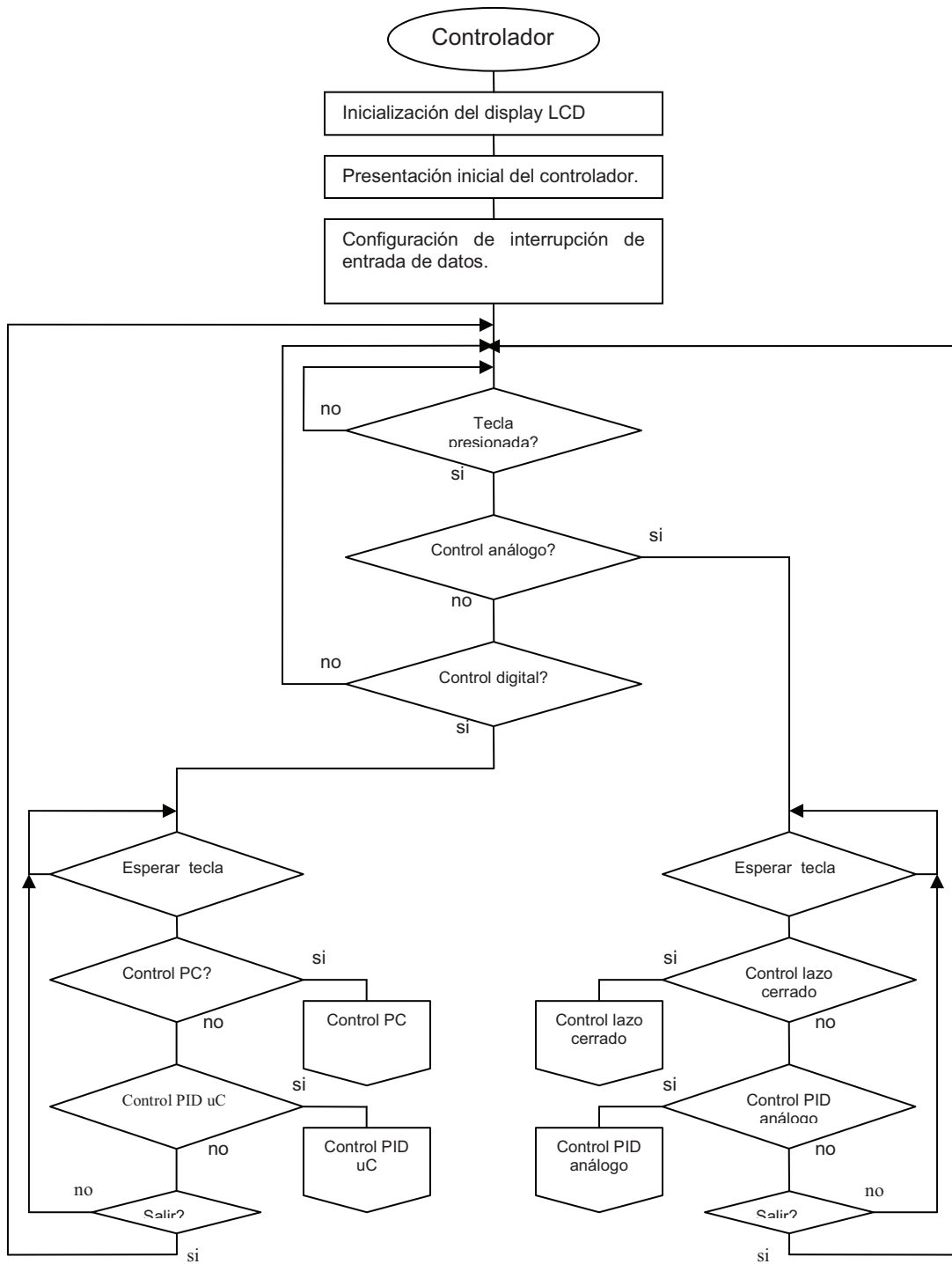


Figura 3.38 Diagrama de flujo del HMI del controlador (parte 1).

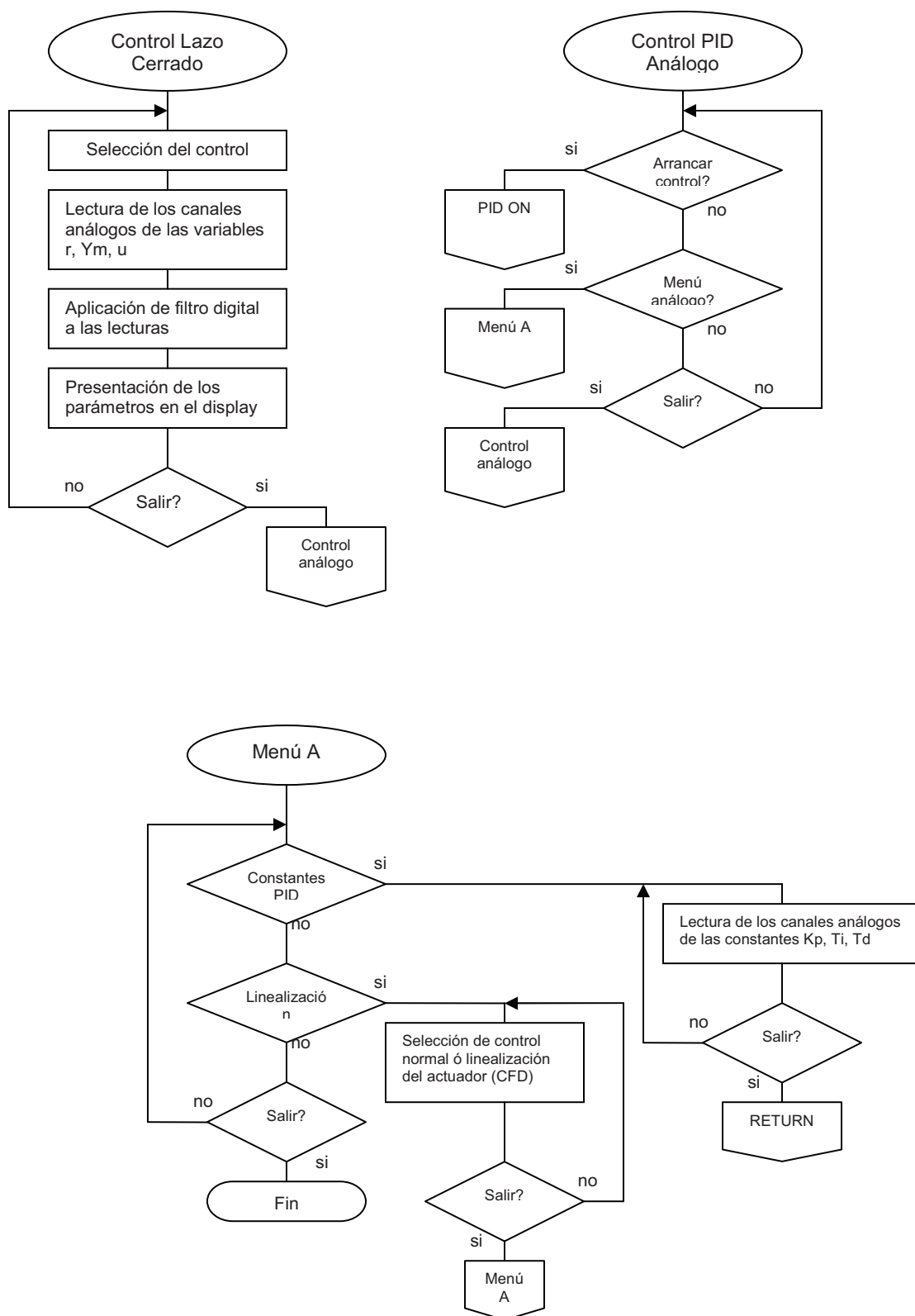


Figura 3.39 Diagrama de flujo del HMI del controlador (parte 2).

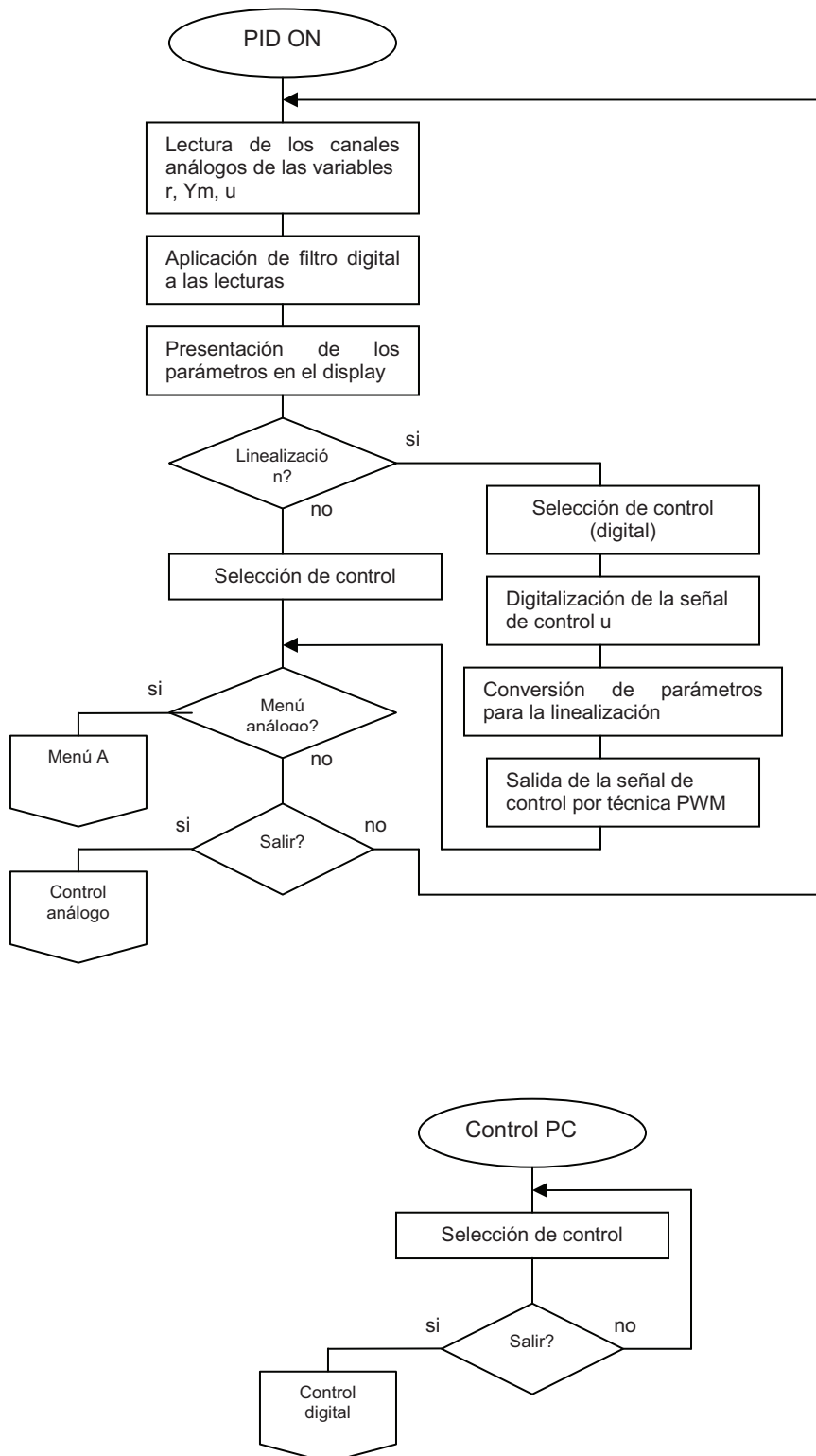


Figura 3.40 Diagrama de flujo del HMI del controlador (parte 3).

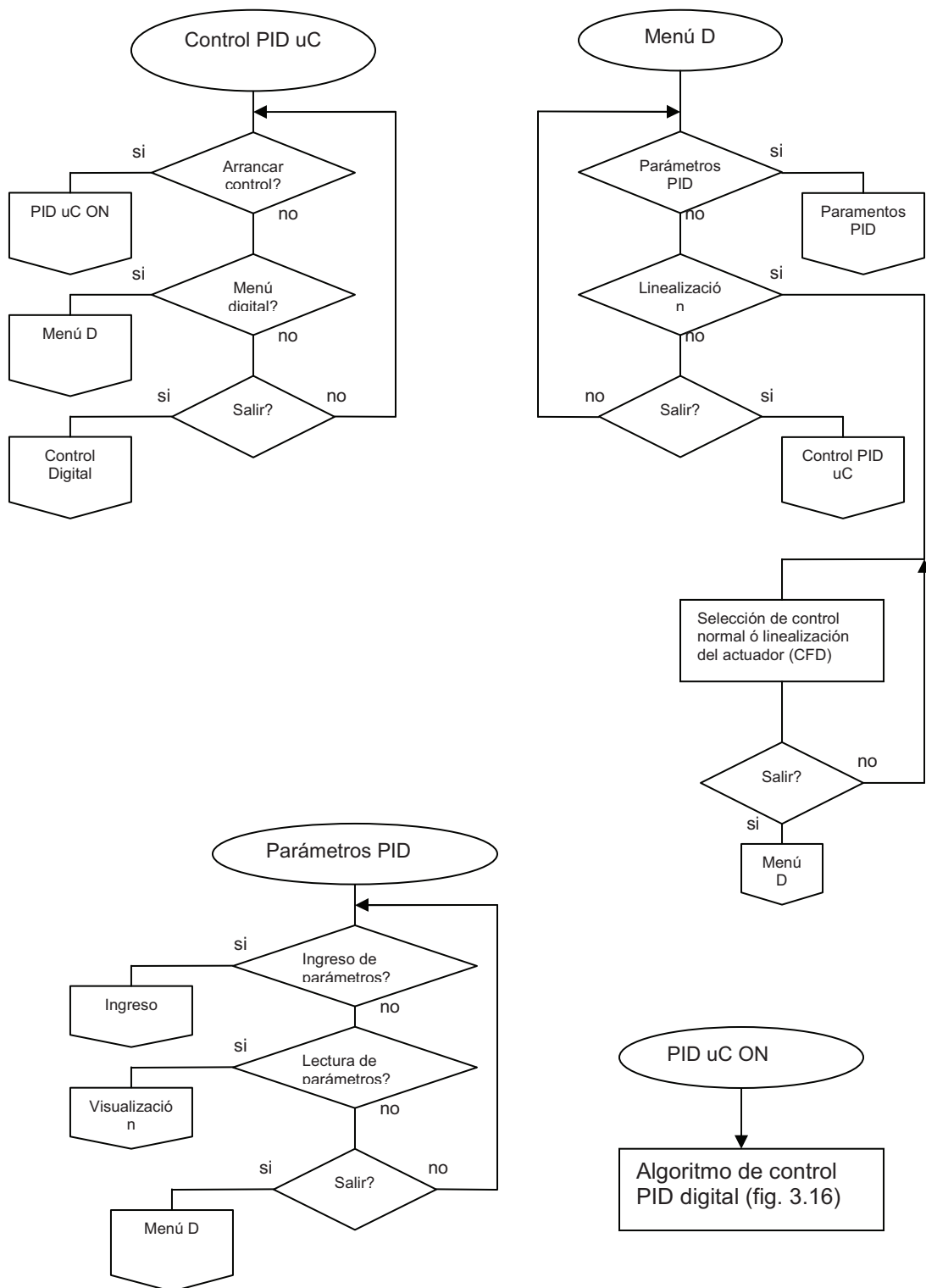


Figura 3.41 Diagrama de flujo del HMI del controlador (parte 4).

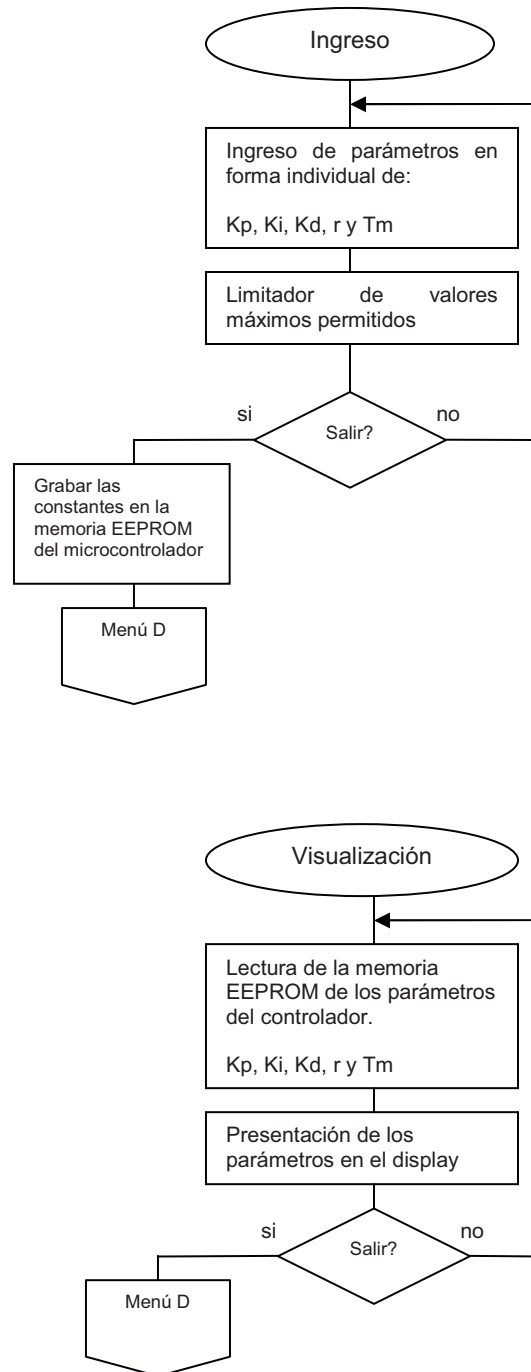


Figura 3.42 Diagrama de flujo del HMI del controlador (parte 5).

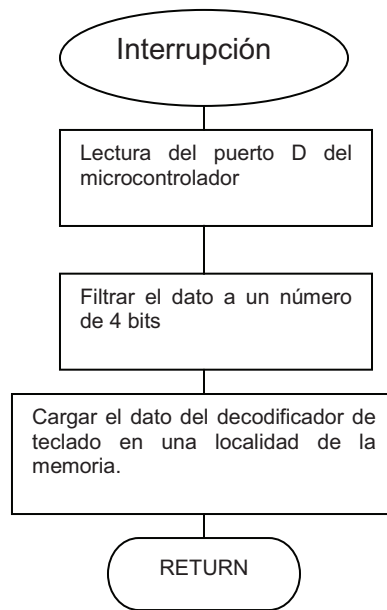


Figura 3.43 Diagrama de flujo del HMI del controlador (parte 6).

El diagrama de flujo para el manejo del microcontrolador se divide en 13 diagramas que representan las subrutinas para la coordinación de los tipos de control seleccionado y acciones adicionales para los controles PID tanto el analógico como el digital.

A continuación se describe el funcionamiento del diagrama de flujo a partir de cada subrutina que la compone:

3.4.7.1 Inicialización y presentación.

La figura 3.38 es el diagrama de flujo que representa la inicialización y la selección del tipo de control.

Primero se configura la velocidad del cristal utilizado $f_{CLK} = 20MHz$. También se realiza la inicialización del display LCD con la configuración de comunicación de 4bits utilizando el puerto B del microcontrolador principal (figura 3.38).

Después de la configuración del display se asigna etiquetas a las localidades de la memoria RAM para el manejo de todo el programa. Luego se llama a una rutina para el manejo del display realizando la presentación inicial mostrada en la figura 3.44.

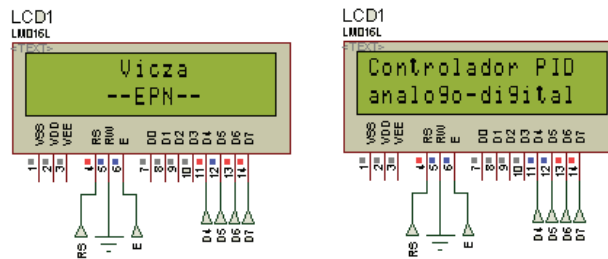


Figura 3.44 Presentación inicial.

La presentación se divide en dos etapas, cada una tiene un tiempo de duración de 2 segundos y medio cada presentación.

La presentación indica el inicio del funcionamiento del controlador; a continuación se habilita la interrupción externa del microcontrolador (RB0) para la detección de entrada de datos a través del decodificador de teclado controlado por el otro microcontrolador.

El display presenta la selección del tipo de control (figura 3.45) permitiendo la selección del control analógico ó control digital. Adicionalmente presenta las teclas que deben ser presionadas para elegir el tipo de control.

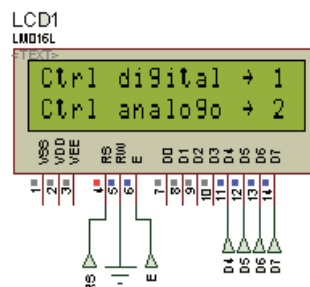


Figura 3.45 Selección del control.

Si se presiona otra tecla que no pertenece a las indicadas, el controlador simplemente no realiza ninguna acción.

Nota: esta rutina se cumple para todos los casos de selección.

Presionando la tecla (1) el microcontrolador ejecuta la rutina para acceder al menú de selección del tipo de control: si el control hace el computador personal, ó realiza el control PID el microcontrolador.

Presionando la tecla (2) el microcontrolador ejecuta la rutina para acceder a otro menú de selección del control en lazo cerrado ó el control PID análogo.

La figura 3.46 muestra el menú de selección si se escoge el control análogo (a), o si se escoge el control digital (b).

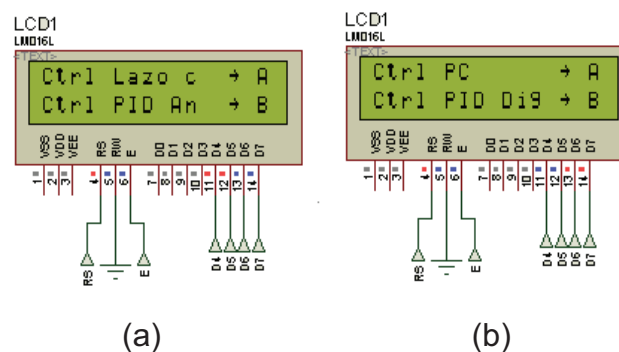


Figura 3.46 Menú de selección de tipo de control.

3.4.7.2 Control en Lazo Cerrado.

Presionando la tecla (A) se ejecuta el control en lazo cerrado, en este caso se configura el puerto D para controlar los relés, figura 3.35, de tal manera que la señal de control $u(t)$ sea la del control en lazo cerrado. Además en el microcontrolador se configura al conversor AD con los registros ADCON0 y el ADCON1, para leer el valor de referencia (AN1) de los canales análogos de la variable controlada de la planta (AN0) y el valor de la señal de control, del control

en lazo cerrado (AN6) y se almacenan en tres localidades de la memoria RAM del microcontrolador; se utiliza la técnica de barrido de los canales análogos para medir las señales correspondientes.

Antes de presentar el valor de las señales en el display en el programa se ejecuta una subrutina cuyo fin es realizar un filtro haciendo la lectura de 10 veces cada canal para realizar una actualización del nuevo dato leído.

La presentación de cada señal se muestra en la figura 3.47. Para poder salir del control se presiona la tecla (*) e inmediatamente la señal de control $u(t)$ se coloca a cero voltios; esta condición es similar para los demás tipos de control.

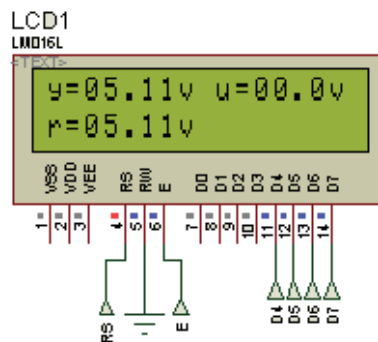


Figura 3.47 Presentación del control en lazo cerrado.

3.4.7.3 Control PID análogo.

En la selección del control PID análogo se presiona la tecla (B), en esa acción se reproduce una presentación de la selección para arrancar el control ó ir a un menú de este control, figura 3.49 (a).

Para acceder al menú se presiona la tecla (D), el microcontrolador ejecuta una rutina en la cual presenta la selección de que acción realizar, figura 3.49 (d). Se puede acceder a las siguientes configuraciones para el control PID análogo.

Presionando la tecla (1) se ejecuta el programa reproducido por el diagrama de flujo (figura 3.40), inmediatamente se configura los canales AN2, AN3 y AN5 de las señales acondicionadas de las constantes K_p , T_i y T_d del controlador PID análogo, respectivamente.

Se aplica un filtro similar al anterior para las señales de las constantes del controlador. Luego se presenta en el display y se actualizan las señales permitiendo una variación instantánea para la calibración del controlador.

Para salir de esta rutina se presiona la tecla (*) retornando al menú anterior.

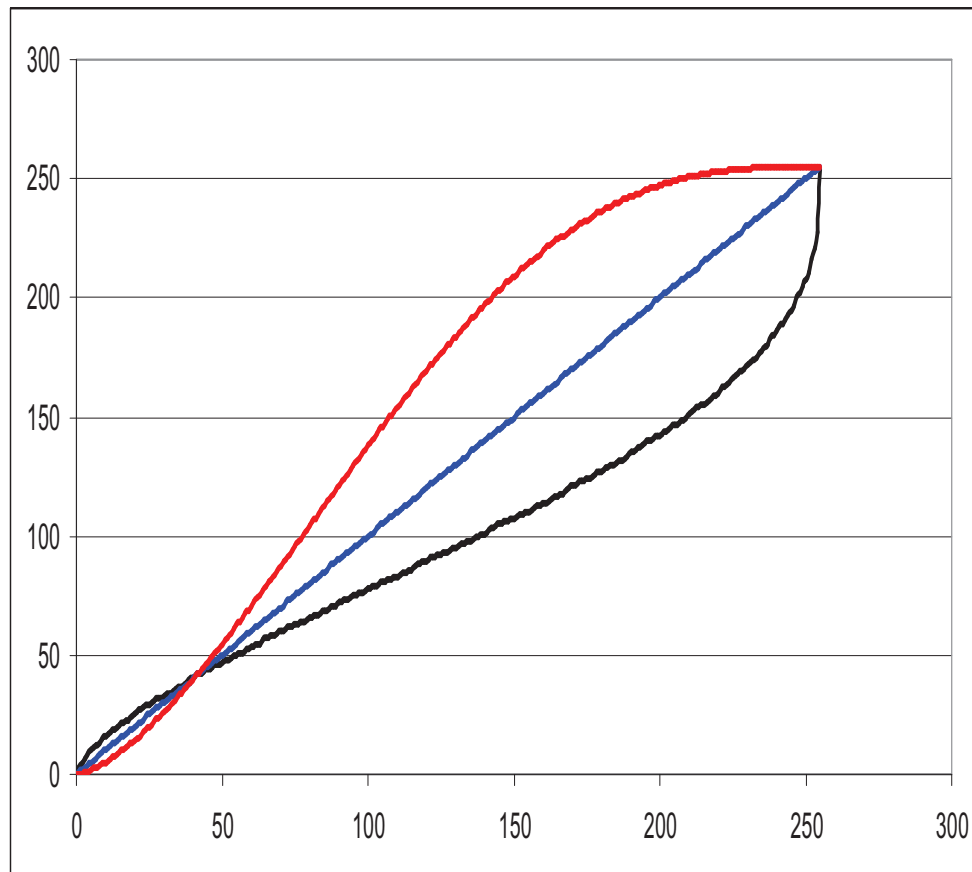
Otro parámetro configurable del controlador PID análogo es la linealización del sistema de control.

En el manejo de los convertidores estáticos se tiene la característica de switcheo de los elementos de estado sólido como los transistores o los tiristores. El control de fase directo el voltaje RMS tiene característica no lineal en todo el rango.

En el programa del microcontrolador se encuentra incluida una tabla con los valores correspondientes a la función inversa del control de fase directo para lograr la linealización con este tipo de convertidor.

En la figura 3.49 (e) el display presenta dos tipos de señales de control para el control PID análogo.

Presionando la tecla correspondiente a la señal de control que se desea el programa se encarga de poner una bandera de aviso para la selección del tipo de señal de control cuando el control entre en funcionamiento.



Leyenda:

- Relación entre el voltaje RMS por control de fase directo en función del ángulo de disparo.
- Función inversa del voltaje RMS por control de fase directo.
- Función resultante.

Figura 3.48 Funciones de no linealidad del control de fase directo.

Aplicando la función inversa se logra contrarrestar el efecto no lineal del convertidor, para que la señal de control del controlador PID análogo sea lineal al voltaje RMS para el elemento final de control.

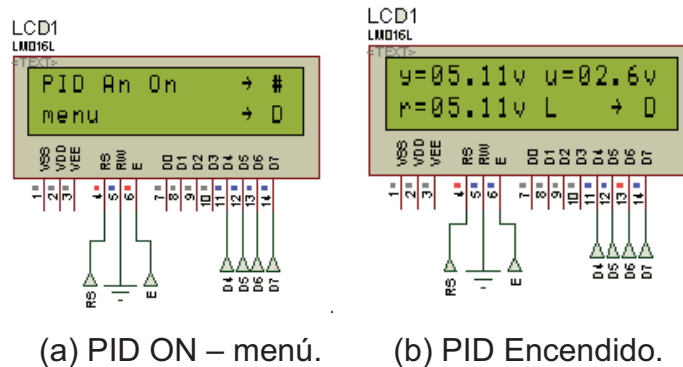
En el control PID análogo, con la orden de encendido con la tecla (#), se chequea el tipo de señal de control que se seleccionó en el menú. En el caso que no se haya seleccionado, por default se encuentra activada la señal de control para la linealización del convertidor de fase directo.

En el caso que se encuentre configurado para control simple, el microcontrolador controla el circuito de selección para que la señal análoga del control PID sea enviada hacia la salida del controlador. También se configura el conversor AD con los canales que contienen la señal de referencia, la señal de la variable controlada y la señal de control del controlador PID análogo (AN3); todas las señales son filtradas por software y mostradas en el display.

Caso contrario que se encuentre con el control para sistema no lineal, control de fase directo, el display indica el tipo de la señal de control seleccionada, realiza las mismas funciones que en caso del control simple, en el caso de la configuración de la señal de referencia, la de la variable controlada y la señal del control PID, pero el circuito de selección está configurado de otra forma, de tal manera que la señal de control sea obtenida a partir del pin RC2 del microcontrolador, debido a que la señal del controlador PID se la digitaliza y se le transforma por medio de la tabla que contiene la función inversa del control de fase directo. Los valores de la tabla se cargan como tiempo en alto de la señal PWM que genera el microcontrolador que posteriormente, son filtradas para obtener la señal de control análogo.

Para los dos casos se puede acceder al menú sin necesidad de apagar el controlador para realizar calibraciones de las constantes del control.

La figura 3.49 (b) presenta las variables que muestra el display cuando el control se encuentre encendido.



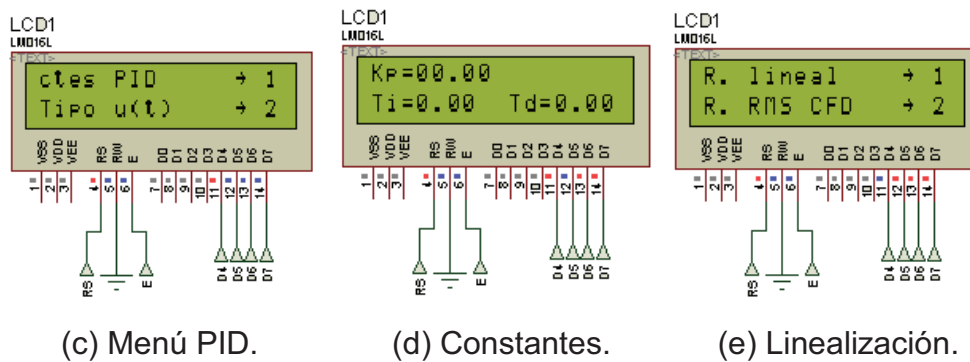


Figura 3.49 Presentación del control PID análogo.

Para salir del control PID análogo se presiona la tecla (*).

3.4.7.4 Control PC.

En el control vía computador se escoge primero la opción de control digital. El programa presenta la selección del tipo de control digital presionando la tecla (A). El microcontrolador controla al circuito de selección para que tome el mando el computador con el tipo de control generado por él, el controlador no realiza ninguna acción adicional a más de presentar en el display el control vía computador.

Para salir del control computacional se presiona la tecla (*).

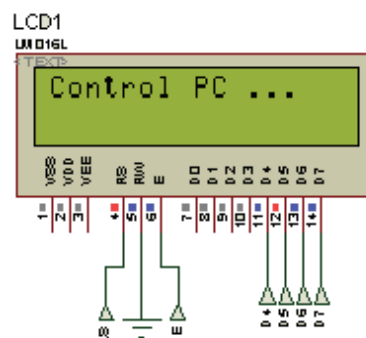


Figura 3.50 Presentación del control computacional.

3.4.7.5 Control PID digital.

La opción B de la selección del tipo de control digital, en el diagrama de flujo, direcciona hacia la rutina para el control PID digital con el microcontrolador; primero el programa ejecuta una subrutina para presentar la opción de encender el controlador ó caso contrario ir al menú de este tipo de control.

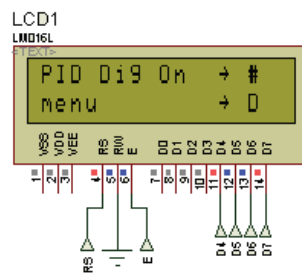


Figura 3.51 PID ON – menú.

Presionando la tecla (D) el microcontrolador ejecuta una subrutina para la selección de acceso a la configuración de las constantes del control y la selección de control lineal o compensación a la no linealidad del control de fase directo.

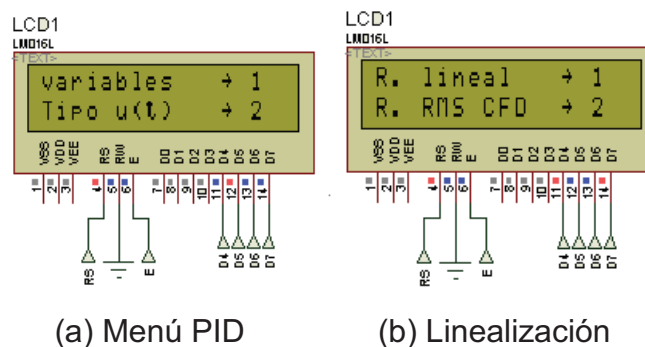
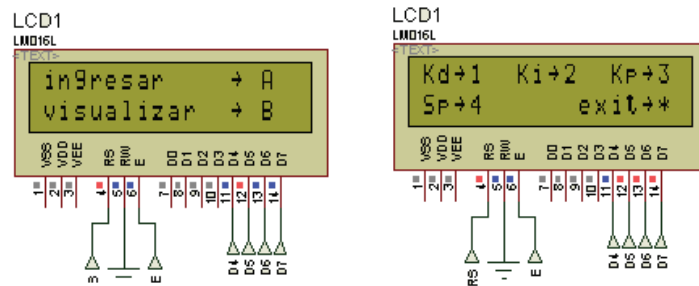


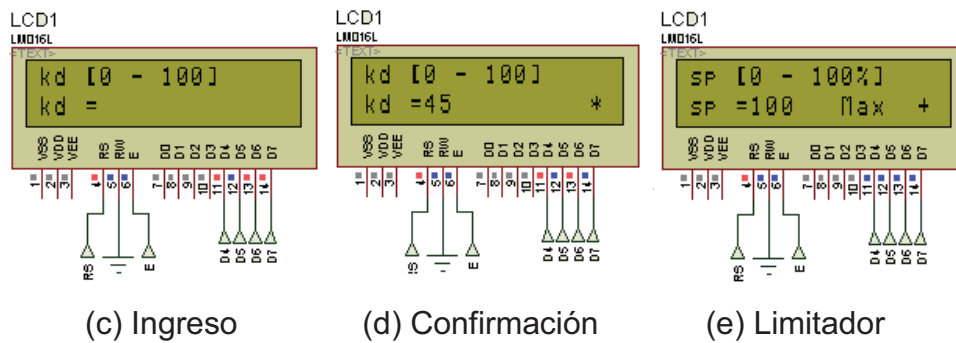
Figura 3.52 Presentación del menú del controlador digital.

En el caso de la selección del tipo de señal $U(t)$, el microcontrolador ejecuta la misma rutina que para el caso del control PID análogo.

Dentro del menú, sí se selecciona la opción de configuración de variables tecla (1), el programa incluye opciones como: ingreso y visualización de los parámetros, y la opción de retornar hacia el menú anterior con la tecla (*).



(a) Ingreso – visualización (b) Selección parámetro.



(c) Ingreso

(d) Confirmación

(e) Limitador

Figura 3.53 Menú del control PID digital.

Presionando la tecla (A) se permite el ingreso de los parámetros del control PID, el microcontrolador presenta la forma de ingreso de los parámetros, figura 3.53 (b). Después se configura las teclas que realizan la selección de que constante se quiere ingresar.

Si se presiona una de las teclas indicadas en el display, el microcontrolador ejecuta la rutina de ingreso del parámetro del control. (Las rutinas son idénticas para cada parámetro).

La figura 3.53 (c) muestra la presentación para el ingreso de Kd del control PID digital. El microcontrolador se pone en estado de espera por programa hasta que

se presione la tecla (D), el microcontrolador presenta el carácter (*) y procede a hacer el ingreso, figura 3.53 (d).

En la presentación, el programa incorpora un limitador para un valor máximo del parámetro seleccionado, evitando que el usuario ingrese un valor mayor indicado en el display.

En caso de ingreso del parámetro de forma errónea, el programa permite borrar antes de realizar el ingreso, presionando la tecla (*).

Para cada dígito ingresado, el microcontrolador lo almacena dentro de la memoria RAM interna. Con los datos ingresados, el microcontrolador se pone en estado de espera por confirmar el ingreso o borrar para ingresar otro dato.

Para confirmar el ingreso de datos se presiona la tecla (D), inmediatamente se presenta en el display un carácter de confirmación (+) y almacena el dato dentro de una localidad de la memoria EEPROM interna del microcontrolador para posterior uso, figura 3.53 (e).

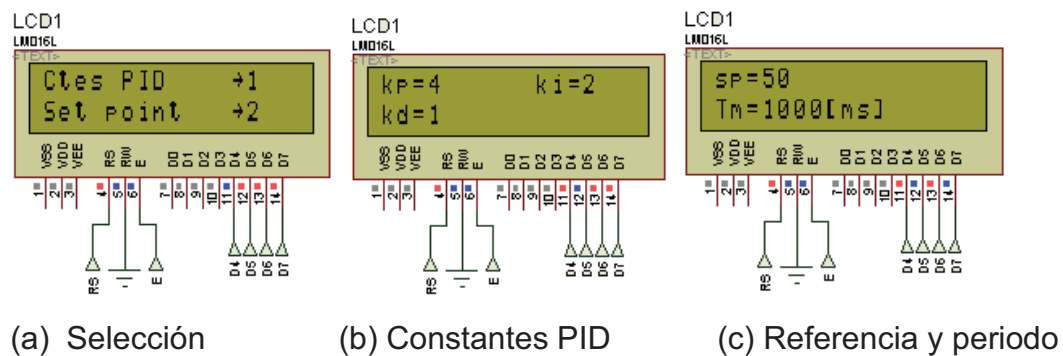


Figura 3.54 Visualización de parámetros.

Para la visualización de los parámetros del control PID tecla (B), el microcontrolador ejecuta una rutina que permite la presentación en el display de la selección para visualizar las constantes del PID o el valor de la referencia y del periodo de ejecución de la ley de control.

Presionando la tecla (1), el microcontrolador lee los valores de los parámetros que se ubican en la memoria EEPROM y los carga en la memoria RAM para posteriormente mostrarlos en el display, figura 3.54 (b).

El mismo algoritmo se ejecuta para el caso de la selección del valor de referencia.

Cuando se utiliza por primera vez el controlador, cuando se programa al microcontrolador, se debe ingresar los parámetros antes de iniciar el control PID digital.

PID digital encendido.

En el menú del controlador PID digital, para encender la acción de control, se presiona la tecla (#) mostrada en el display.

El diagrama de flujo del PID digital se muestra en las figuras 3.16 y 3.17 cuya explicación del diagrama se encuentra dentro de la implementación de la ley de control (página 102).

Adicionalmente el programa ejecuta la selección del tipo de señal $U(t)$, la lineal o la linealización para el control de fase directo.

De igual manera que para el control PID análogo, el control PID digital permite acceder a realizar cambios de los parámetros del control a través de la tecla (D), figura 3.55.

El periodo de ejecución de la ley de control incorporada, permite disminuir la velocidad de la ejecución del programa, evitando variaciones rápidas de la señal de control para el caso de que se utilice plantas que tengan respuesta lenta como en el caso del módulo de temperatura.

Este periodo tiene un valor máximo de ejecución de 5s de espera con una resolución de 10ms cuyo ingreso es similar al de las constantes del PID.

El microcontrolador con el circuito de selección envía la señal del microcontrolador para la salida del controlador.

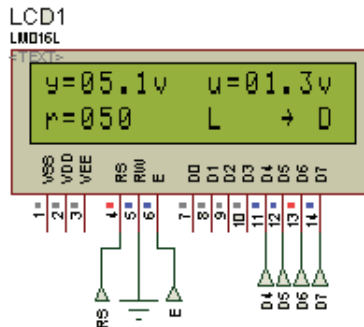


Figura 3.55 PID encendido.

3.4.7.6 Interrupción.

Dentro del diagrama de flujo el manejo de la interrupción tiene como propósito el ingreso de los datos enviados por el decodificador de teclado.

La interrupción se realiza por medio del cambio de estado del pin RB0, y la lectura del dato se realiza por cuatro bits del puerto D del microcontrolador.

Para tener una lectura correcta del dato, se incorpora una rutina que funciona de la siguiente manera:

Primero el microcontrolador al momento de generar la interrupción lee el puerto D guardando el dato en una localidad de la memoria RAM. A este dato se encera los valores más significativos del valor obteniendo el valor real ingresado.

En el CD adjunto se encuentra el programa de control para el microcontrolador principal para el manejo de todo el sistema microprocesado del controlador.

3.4.8 HMI DEL CONTROLADOR POR PC.

El diseño de la interfaz gráfica para el monitoreo de las señales del controlador, permite realizar un análisis de las repuestas de las señales provenientes del controlador cuando el tipo de control seleccionado sea diferente al control por computador.

Las señales generadas por el sistema de control que se consideran para monitoreo son las siguientes:

Señal de referencia (r) de los controladores análogos.

Señal de la variable medida (Y_m) proveniente de la planta.

Señal de control (u) de los controladores análogos y digital con microcontrolador.

Por diseño las tres variables consideradas tienen el mismo rango de voltaje (0 – 10V). La señal que se adquiere de la variable medida se configura en el mismo canal de la tarjeta de adquisición de datos que en el caso del control por computador (AI 0). La señal de referencia se la configura por el canal (AI 1) y la señal de control por el canal (AI 2).

El programa que realiza el monitoreo de las variables anteriormente mencionadas, se aplica para todos los tipos de control y la visualización se realiza en tiempo real.

La visualización de las variables se realiza dentro de un mismo gráfico permitiendo tener mejor apreciación de la respuesta de la planta y de la señal de control.

La resolución del gráfico que maneja LabVIEW es de 1024 pasos, por lo que grafica la misma cantidad de puntos antes de que la pantalla comience a desplazarse y perder información.

Dependiendo del tipo de planta y de la respuesta que presente el sistema de control que se utiliza, para la obtención de la respuesta en estado transitorio y estable, al programa se incluye una rutina de retardo para el muestreo de la adquisición de datos de las señales monitoreadas.

Además la utilización del visualizador de variables presenta una guía del cual la señal es la indicada por medio de un selector que permite distinguir cual variable se encuentra visualizada.

El valor de la referencia por lo general es un valor constante. La forma de presentación es de forma diferente a las demás señales monitoreadas.

El diagrama de flujo de la figura 3.57 representa el funcionamiento del programa que realiza el monitoreo de las señales que envía el controlador y la planta.

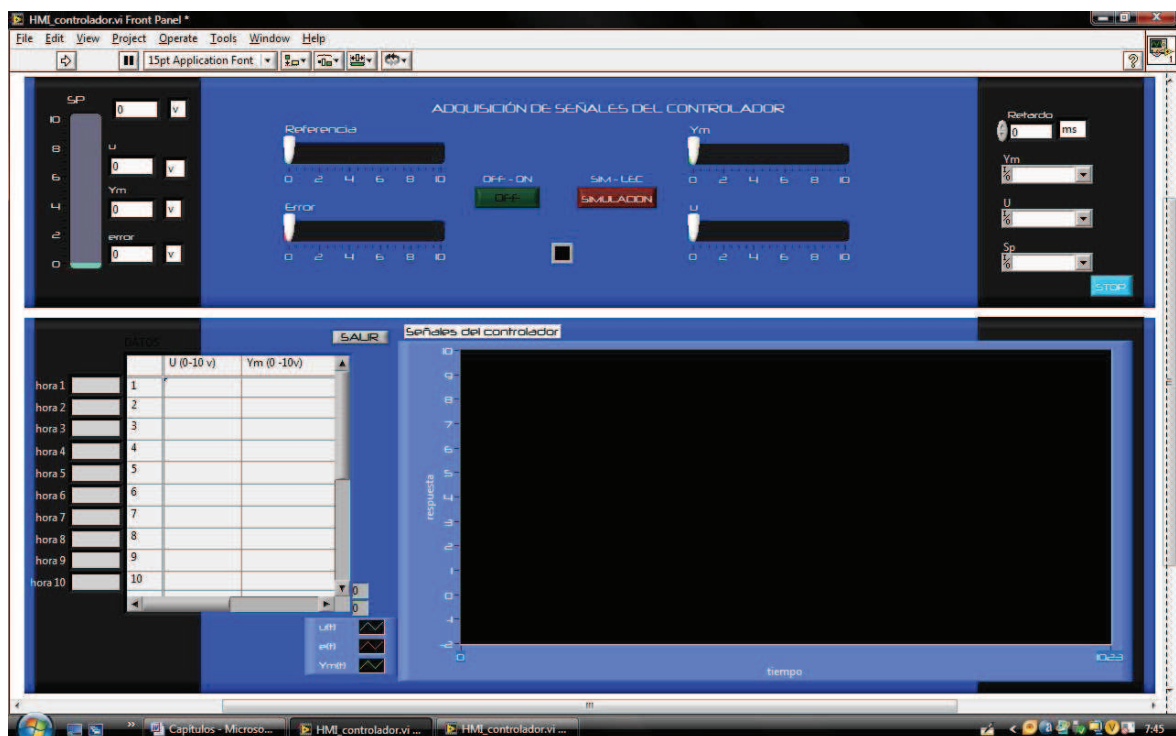


Figura 3.56 Panel frontal del visualizador de variables del sistema de control.

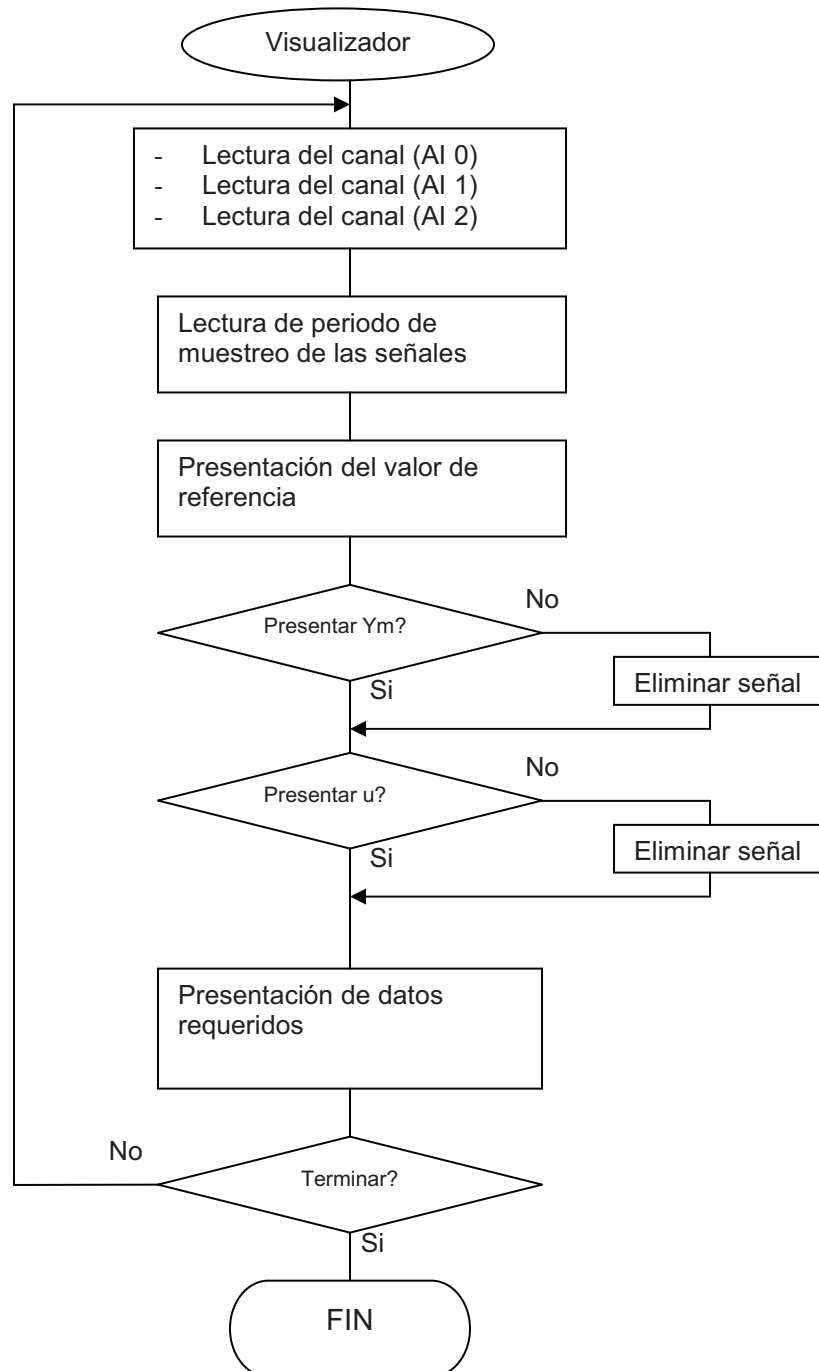


Figura 3.57 diagrama de flujo del visualizador de variables del sistema de control.

3.5 CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR.

3.5.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS TARJETAS.

Para el diseño y construcción de las tarjetas del controlador, se opta por el programa para ruteo de circuitos impresos, EAGLE 4.11.

Todos los circuitos del controlador están distribuidos en cinco tarjetas, en dos de las cuales se encuentra la gran mayoría de la circuitería del controlador.

Los circuitos se distribuyen en las siguientes tarjetas:

- Tarjeta 6 (control PID análogo).
- Tarjeta 7 (control PID digital).
- Tarjeta 8 (potenciómetros de las constantes del control PID análogo).
- Tarjeta 9 (Control en lazo cerrado).
- Tarjeta 10 (Puertos).

La tarjeta 6 contiene los siguientes circuitos: acondicionador de corriente del transmisor, circuito generador de la señal de error análogo, control PID análogo, filtro pasa bajos de los controladores digitales y circuito selector del tipo de control.

La tarjeta 7 contiene los siguientes circuitos: acondicionador de las constantes del controlador PID análogo, acondicionador de la señal de referencia y de la señal de control del controlador PID análogo, circuito decodificador de teclado, controlador digital, visualizador de variables (Display LCD).

La Tarjeta 8 contiene los potenciómetros de control de las constantes del controlador PID análogo.

La tarjeta 9 contiene el control en lazo cerrado análogo y el circuito selector del control en lazo cerrado con el controlador digital computacional.

La tarjeta 10 contiene dos puertos, uno para realizar el control para el módulo de temperatura u otra planta que tenga este puerto y el otro para realizar el control y visualización para el computador u otro tipo de controlador externo.

Todas las tarjetas interactúan entre sí, pero la tarjeta 7 realiza el control de todos los circuitos que compone el controlador, tanto la selección del tipo de control como la visualización de las variables de cada controlador excepto el control computacional.

La tarjeta 6 es la única tarjeta que se encuentra ruteada a doble lado en el caso del controlador, con el fin de disminuir el tamaño de la baquelita a un tamaño estándar y tener las mismas dimensiones de la tarjeta 7.

El circuito esquemático y el ruteado de las tarjetas del controlador se encuentran en el anexo C.

3.5.2 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS CIRCUITOS.

El módulo del controlador se muestra en la Figura 3.58. Su construcción es íntegramente metálica con dimensiones específicas con el fin de que la distribución de la circuitería, de los elementos de control y señalización externos sean lo más ordenado posible. Además la figura 3.58 también muestra las perforaciones de la caja para los elementos de señalización y de control exterior anteriormente mencionados.

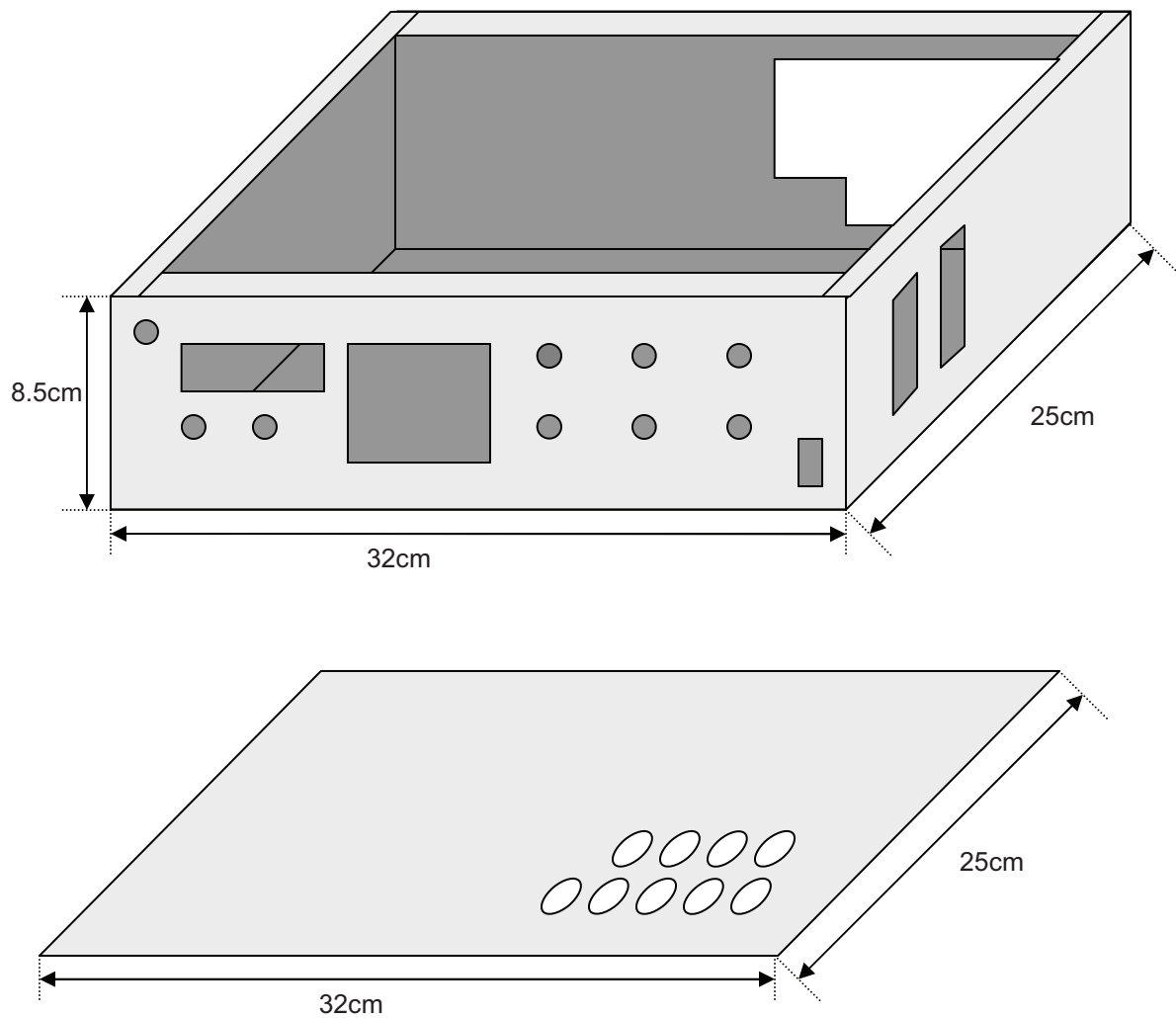


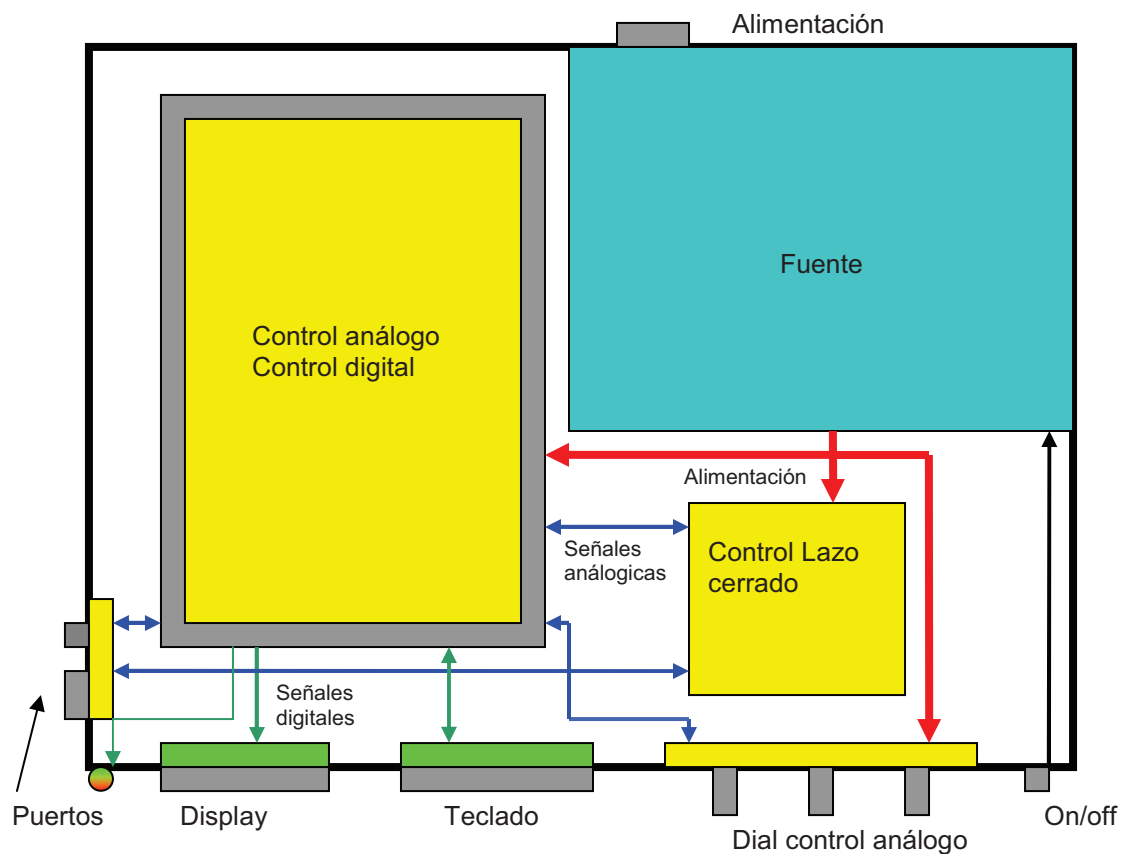
Figura 3.58. Dimensiones de la caja del controlador.

El ensamblaje de la caja es realizada por suela en la parte inferior la tapa es sellada por medio de tornillos.

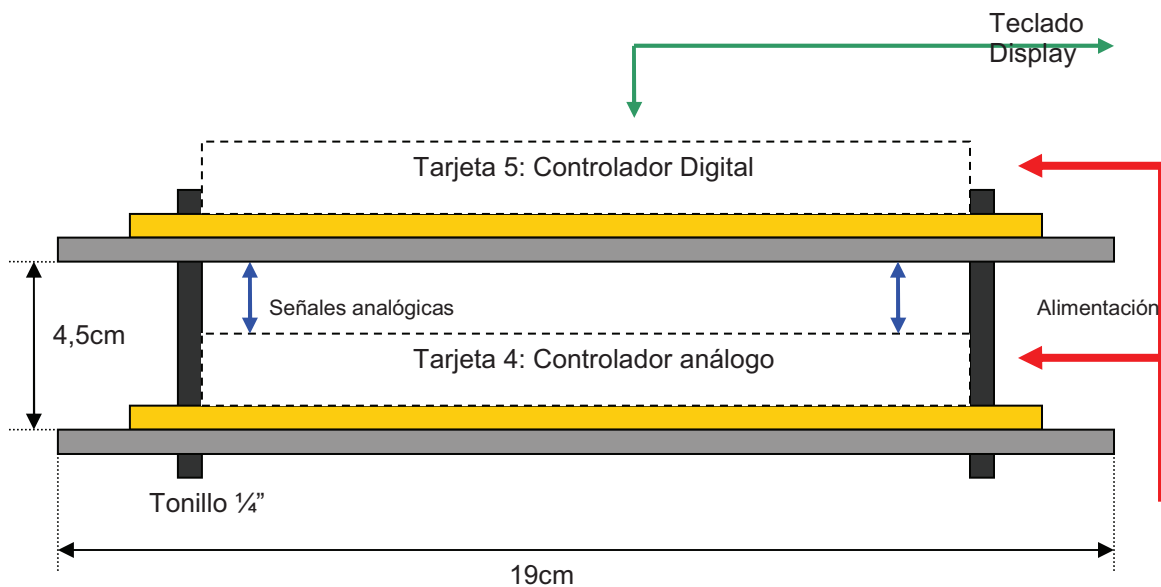
Las perforaciones circulares se realizaron con un taladro cuyo tamaño de broca depende de las medidas de los elementos externos y para las rectangulares se realizaron con un cincel y limadora para el acabado.

Adicionalmente la caja tiene perforaciones para los sujetadores de las tarjetas y de la fuente, en la parte inferior y posterior respectivamente.

La distribución de las tarjetas, de la fuente y de los elementos de señalización dentro de la caja del controlador se muestran en la figura 3.59.



(a) Vista superior.



(b) Vista lateral

Figura 3.59 Distribución de los circuitos.

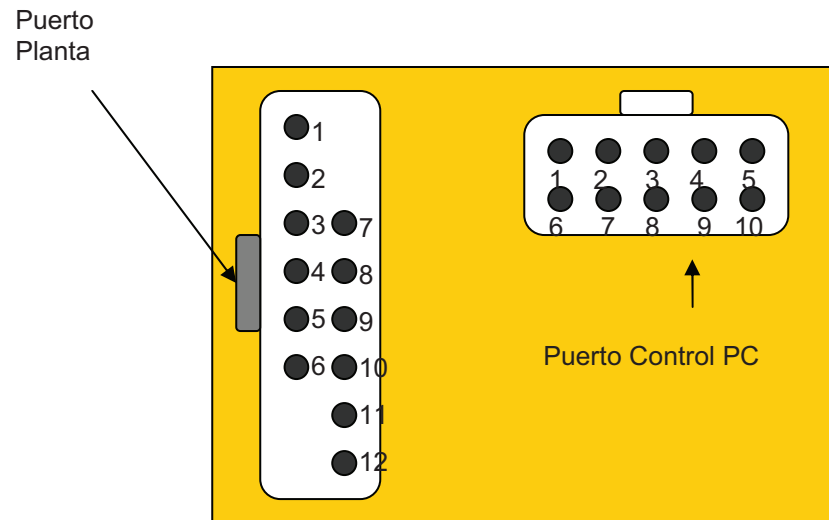


Figura 3.60 Puertos de señales del controlador.

La figura 3.60 indica la función de cada puerto y la distribución de pines se describe a continuación.

Puerto Planta:

- Polarización 12V (1,2)
- Polarización -12V (3,7)
- Polarización 5V (4,8)
- GND (11,12)
- Salida de voltaje de la señal de control V_{Uc} (5,9)
- Entrada de corriente de la variable medida I_{Ym} (6,10)

Puerto Control PC:

- GND (5,10)
- Salida de voltaje de la referencia analoga $V_{Sp_{an}}$ (8)
- Salida de voltaje de la variable medida V_{Ym} (6)
- Salida de voltaje de la señal de control V_{Uc} (7)

- Entrada de voltaje de la señal de control externa PC V_{UcPC} (1)
- Polarización 5V (3)
- No conexión (2,4,9)

La distribución de los elementos de señalización y de control externos del controlador que se muestran en la figura 3.61 se colocan en las perforaciones de la caja del módulo.

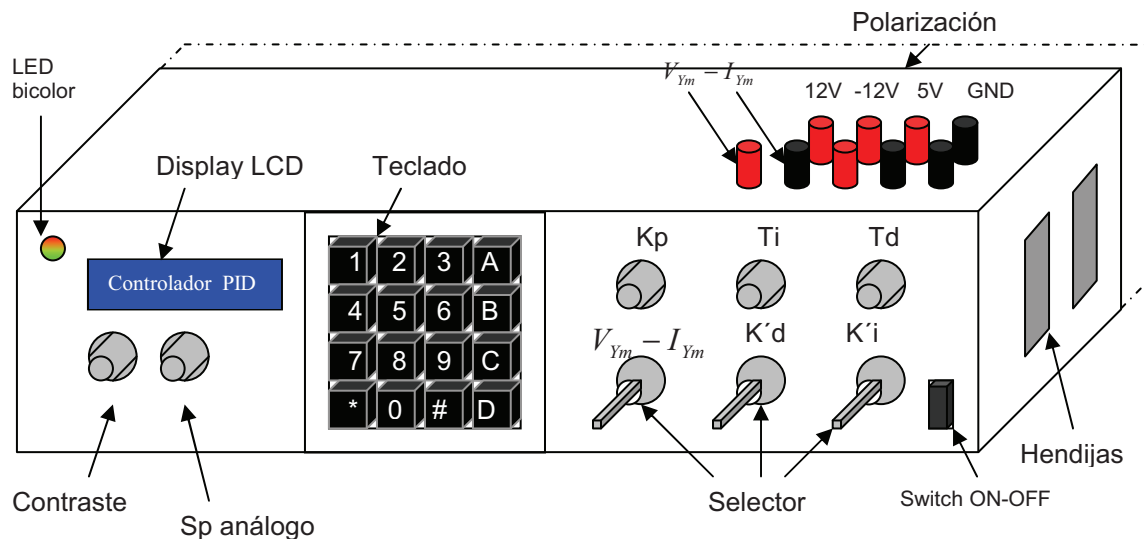


Figura 3.61 Distribución de los elementos de señalización.

Cada elemento externo del controlador se describe a continuación:

- **Led Bicolor.** Indica para todo tipo de control si el controlador está encendido o apagado.
- **Display LCD.** Muestra todas las variables de todos los tipos de control y también las variables controladas y las medidas de la planta.
- **Teclado.** Permite la selección del tipo de control, el ingreso de las constantes del control digital y también el ingreso de la referencia.
- **Contraste.** Potenciómetro que maneja el contraste del Display LCD.

- **Sp Análogo.** Potenciómetro que maneja el valor de la referencia del control PID análogo y del control en lazo cerrado.
- **Kp, Ti, Td.** Potenciómetros que controlan el valor de las constantes del controlador PID análogo.
- **Switch ON-OFF.** Controla el encendido y apagado de la fuente del controlador.
- **Selector $V_{Ym} - I_{Ym}$.** Permite la selección entre voltaje (0-10v) o corriente (4 – 20mA) de la variable medida de la planta para ser controlada.
- **Selector K'i.** Permite la selección de 0.1 o 1 de ganancia para la parte integral del controlador PID análogo.
- **Selector K'd.** Permite la selección de 1 o 10 de ganancia para la parte derivativa del controlador PID análogo.
- **Polarización.** Son salidas de voltaje provenientes de la fuente del controlador para la alimentación.

En el anexo A se encuentran fotografías del controlador de la estructura interna y su diseño exterior.

3.6 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL CONTROLADOR.

Para el análisis económico del controlador se realiza el presupuesto del controlador.

El presupuesto del controlador incluye los precios individuales de los dispositivos utilizados y de los materiales, sin tomar en cuenta el costo de la mano de obra, las

herramientas, los programas utilizados para la programación de los microcontroladores, ni el ruteo de los circuitos u otro rubro adicional.

El costo del controlador, se divide en dos etapas que se detallan a continuación:

3.6.1 COSTOS DE LAS TARJETAS.

Los costos que representan las tarjetas del controlador son representados en los valores correspondientes los dispositivos y materiales que las conforman. El análisis se realiza en forma individual para cada tarjeta.

Los precios de los elementos de cada tarjeta incluido IVA y el costo de cada tarjeta se describen a continuación:

| Tarjeta 6 (Control PID Análogo) | | | | |
|---|----------------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Baquelita doble lado (10x20cm) | 1 | \$ 1,98 | \$ 1,98 |
| 2 | Cloruro Férrico | 4 | \$ 0,30 | \$ 1,20 |
| 3 | Acetato A4 | 4 | \$ 0,20 | \$ 0,80 |
| 4 | Impresión Ruteo | 8 | \$ 0,05 | \$ 0,40 |
| 5 | Bornera 3P 5mm | 2 | \$ 0,25 | \$ 0,50 |
| 6 | Bornera 2P 5mm | 2 | \$ 0,30 | \$ 0,60 |
| 7 | TL084 O-AMP | 7 | \$ 0,68 | \$ 4,76 |
| 8 | Zócalo 14P | 7 | \$ 0,07 | \$ 0,49 |
| 9 | Espadín doble 80P | 1 | \$ 1,60 | \$ 1,60 |
| 10 | Condensador 2.2uF 200v Cerámicos | 4 | \$ 0,65 | \$ 2,60 |
| 11 | Relé 12v 5P | 2 | \$ 0,65 | \$ 1,30 |
| 12 | Transistor 3904 | 2 | \$ 0,08 | \$ 0,16 |
| 13 | Diodo 1N4007 | 2 | \$ 0,05 | \$ 0,10 |
| 14 | Diodo Zener 10v | 3 | \$ 0,10 | \$ 0,30 |
| 15 | Resistencia 1/4w | 44 | \$ 0,01 | \$ 0,44 |

| | | | | |
|----|---------------------------|---|---------------|----------|
| 16 | Potenciómetro Precisión P | 3 | \$ 0,78 | \$ 2,34 |
| 17 | Potenciómetro Precisión G | 1 | \$ 0,80 | \$ 0,80 |
| 18 | Condensador 220nF | 3 | \$ 0,05 | \$ 0,15 |
| 19 | Conector Baquelita 2P | 3 | \$ 0,23 | \$ 0,69 |
| 20 | Conector Baquelita 3P | 6 | \$ 0,33 | \$ 1,98 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 23,19 |

Tabla 3.3 Costos de la tarjeta 6.

| Tarjeta 7 (Control PID Digital) | | | | |
|---|----------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Baquelita 1 lado (10x20cm) | 1 | \$ 0,70 | \$ 0,70 |
| 2 | Cloruro Férrico | 2 | \$ 0,30 | \$ 0,60 |
| 3 | Acetato A4 | 2 | \$ 0,20 | \$ 0,40 |
| 4 | Impresión Ruteo | 4 | \$ 0,05 | \$ 0,20 |
| 5 | Bornera 2P 5mm | 2 | \$ 0,25 | \$ 0,50 |
| 6 | TL084 O-AMP | 2 | \$ 0,68 | \$ 1,36 |
| 7 | Zócalo 14P | 2 | \$ 0,07 | \$ 0,14 |
| 8 | Espadín simple 40P | 1 | \$ 0,60 | \$ 0,60 |
| 9 | Relé 12v 5P | 1 | \$ 0,65 | \$ 0,65 |
| 10 | Transistor 3904 | 1 | \$ 0,08 | \$ 0,08 |
| 11 | Diodo 1N4007 | 1 | \$ 0,05 | \$ 0,05 |
| 12 | Diodo Zener 5.1v | 1 | \$ 0,10 | \$ 0,10 |
| 13 | Condensador 220nF | 7 | \$ 0,05 | \$ 0,35 |
| 14 | Condensador 22pF | 2 | \$ 0,05 | \$ 0,10 |
| 15 | Cristal 20MHz | 1 | \$ 0,30 | \$ 0,30 |
| 16 | PIC 16F628A | 1 | \$ 3,75 | \$ 3,75 |
| 17 | Zócalo 18P | 1 | \$ 0,08 | \$ 0,08 |
| 18 | PIC 16F877A | 1 | \$ 7,00 | \$ 7,00 |
| 19 | Zócalo 40P | 1 | \$ 0,20 | \$ 0,20 |

| | | | | |
|----|---------------------------|----|---------------|----------|
| 20 | Potenciómetro Precisión P | 3 | \$ 0,78 | \$ 2,34 |
| 21 | Conector Baquelita 2P | 1 | \$ 0,23 | \$ 0,23 |
| 22 | Conector Baquelita 3P | 6 | \$ 0,33 | \$ 1,98 |
| 23 | Resistencias 1/4w | 15 | \$ 0,01 | \$ 0,15 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 21,86 |

Tabla 3.4 Costos de la tarjeta 7.

| Tarjeta 8 (Control en lazo cerrado) | | | | |
|---|---------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Baquelita 1 lado | 1 | \$ 0,70 | \$ 0,70 |
| 2 | Cloruro Férrico | 1 | \$ 0,30 | \$ 0,30 |
| 3 | Acetato A4 | 1 | \$ 0,20 | \$ 0,20 |
| 4 | Impresión | 2 | \$ 0,05 | \$ 0,10 |
| 5 | TL084 O-AMP | 1 | \$ 0,68 | \$ 0,68 |
| 6 | Zócalo 14P | 1 | \$ 0,07 | \$ 0,07 |
| 7 | Relé 12v 5P | 1 | \$ 0,65 | \$ 0,65 |
| 8 | Diodo 1N4007 | 1 | \$ 0,05 | \$ 0,05 |
| 9 | Transistor 3904 | 1 | \$ 0,08 | \$ 0,08 |
| 10 | Condensador 220nF | 1 | \$ 0,05 | \$ 0,05 |
| 11 | Conector Baquelita 4P | 3 | \$ 0,39 | \$ 1,17 |
| 12 | Diodo Zener 5.1v | 1 | \$ 0,10 | \$ 0,10 |
| 13 | Potenciómetro Precisión G | 1 | \$ 0,80 | \$ 0,80 |
| 14 | Resistencias 1/4w | 6 | \$ 0,01 | \$ 0,06 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 5,01 |

Tabla 3.5 Costos de la tarjeta 8.

| Tarjeta 9 (Constantes PID análogo) | | | | |
|--|--------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Baquelita 1 lado | 1 | \$ 0,35 | \$ 0,35 |
| 2 | Cloruro Férrico | 1 | \$ 0,30 | \$ 0,30 |
| 3 | Acetato A4 | 1 | \$ 0,20 | \$ 0,20 |
| 4 | Impresión | 2 | \$ 0,05 | \$ 0,10 |
| 5 | Potenciómetro Doble 100K | 1 | \$ 0,70 | \$ 0,70 |
| 6 | Potenciómetro Doble 500K | 2 | \$ 0,70 | \$ 1,40 |
| 7 | Conector Baquelita 2P | 4 | \$ 0,23 | \$ 0,92 |
| 8 | Conector Baquelita 3P | 1 | \$ 0,33 | \$ 0,33 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 4,30 |

Tabla 3.6 Costos de la tarjeta 9.

| Tarjeta 10 (Puerto Controlador) | | | | |
|--|--------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Baquelita 1 lado | 1 | \$ 0,35 | \$ 0,35 |
| 2 | Cloruro Férrico | 1 | \$ 0,30 | \$ 0,30 |
| 3 | Acetato A4 | 1 | \$ 0,20 | \$ 0,20 |
| 4 | Impresión | 2 | \$ 0,05 | \$ 0,10 |
| 5 | Espadín Doble 80P | 0 | \$ 1,60 | \$ 0,00 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 0,95 |

Tabla 3.7 Costos de la tarjeta 10.

3.6.2 COSTOS DEL MÓDULO.

Los costos del módulo incluyen los dispositivos externos, cables, fuente del controlador, la carcasa, entre otros. La tabla 3.8 describe detalladamente el costo de los dispositivos y los demás componentes de controlador.

| Dispositivos externos | | | | |
|------------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Display LCD 2X16 | 1 | \$ 6,80 | \$ 6,80 |
| 2 | Teclado Matricial | 1 | \$ 8,90 | \$ 8,90 |
| 3 | Potenciómetros | 2 | \$ 0,25 | \$ 0,50 |
| 4 | Led Bicolor alta | 1 | \$ 0,25 | \$ 0,25 |
| 5 | Fuente Switching | 1 | \$ 17,00 | \$ 17,00 |
| 6 | Conector Banana | 12 | \$ 0,08 | \$ 0,96 |
| 7 | Perillas | 5 | \$ 0,10 | \$ 0,50 |
| 8 | Interruptor | 1 | \$ 0,25 | \$ 0,25 |
| 9 | Selector 2 posiciones | 3 | \$ 0,25 | \$ 0,75 |
| 10 | Bus 40P + conectores | 1 | \$ 1,60 | \$ 1,60 |
| 11 | Bus 16P | 1 | \$ 0,80 | \$ 0,80 |
| 12 | Conector Bus 16P | 2 | \$ 0,55 | \$ 1,10 |
| 13 | Cable Telefónico | 1 | \$ 0,50 | \$ 0,50 |
| 14 | Cable Multifilar | 1 | \$ 1,00 | \$ 1,00 |
| 15 | Tornillos 1/8" | 20 | \$ 0,03 | \$ 0,60 |
| 16 | Tuercas 1/8" | 40 | \$ 0,01 | \$ 0,40 |
| 17 | Tornillos 5/16" | 4 | \$ 0,07 | \$ 0,28 |
| 18 | Tuercas 5/16" | 16 | \$ 0,02 | \$ 0,24 |
| 19 | Carcasa Metálica | 1 | \$ 45,00 | \$ 45,00 |
| 20 | Conectores Tipo pala | 8 | \$ 0,15 | \$ 1,20 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 88,63 |

Tabla 3.8 Costos de los dispositivos externos.

3.6.3 COSTOS ADICIONALES.

Los costos adicionales incluyen los materiales que se utilizan para soldar y limpieza de las tarjetas y otros materiales que sirven para el ensamblaje de las carcasas de los módulos.

| Adicionales | | | | |
|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|---------------------|
| ITEM | DESCRIPCIÓN RUBRO | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
| 1 | Esponja metálica | 1 | \$ 0,25 | \$ 0,25 |
| 2 | Thinner | 1 | \$ 1,50 | \$ 1,50 |
| 3 | Pomada de soldar | 1 | \$ 2,00 | \$ 2,00 |
| 4 | Estaño | 1 | \$ 2,00 | \$ 2,00 |
| 5 | Cinta aislante (Tape) | 1 | \$ 1,00 | \$ 1,00 |
| 6 | Silicón | 1 | \$ 0,50 | \$ 0,50 |
| 7 | Acrílico | 1 | \$ 2,00 | \$ 2,00 |
| | | | | |
| | | | TOTAL: | \$ 9,25 |
| | | | | |
| | | COSTO DEL CONTROLADOR: | | \$ 153,19 |

Tabla 3.9 Costos adicionales.

La tabla 3.9 muestra el inventario de todos los elementos adicionales, cantidad y costo total incluyendo el costo total del módulo que representa al controlador.

Tiempo de diseño y construcción del controlador: 80 días.

Los controladores comerciales en la actualidad son utilizados para un control específico. También los tipos de control que incorporan los controladores es el control PID digital utilizando para todos los casos entradas y salidas análogas estandarizadas como en el caso de los PLC's.

El PLC Siemens Simatic s7300 tiene cuatro entradas y dos salidas análogas estándar de 0-10V y 4 – 20mA, con resolución de 8 bits de los canales análogos, con comunicación RS232 y RS485. Para la programación utiliza el software step 7 ó superior, tiene un costo de \$1000 sin incluir las tarjetas de expansión.

Comparando el costo del PLC Siemens con el controlador, el costo es superior. Por lo que la construcción de un controlador con las prestaciones que ofrece representa una inversión rentable.

CAPÍTULO 4.

4 PRUEBAS DEL PROTOTIPO DE CONTROL DE TEMPERATURA.

Dentro del diseño y construcción tanto del prototipo de planta como del controlador, se procede a realizar pruebas al sistema de control para determinar su comportamiento a cada tipo de control que se implementa a la planta con el objetivo de avalizar el análisis utilizado en el diseño de los controladores.

Además se realizan pruebas de cada circuito de la planta y del controlador. Para todos los circuitos se utilizan como calibradores dos multímetros, FLUKE 47 serie II y LG DM -311, y un osciloscopio TEKTRONIX.

Para la planta se realiza la calibración del actuador, el circuito acondicionador de temperatura, circuito transmisor de señal y los circuitos de acondicionamiento para determinar el voltaje aplicado a la lámpara.

En el caso del voltaje aplicado a la carga la calibración se aplica al voltaje máximo a la lámpara (ángulo de disparo $\alpha = 0^\circ$).

Se realiza la prueba colocando los tres instrumentos al mismo tiempo y en la misma fase obteniendo los siguientes resultados.

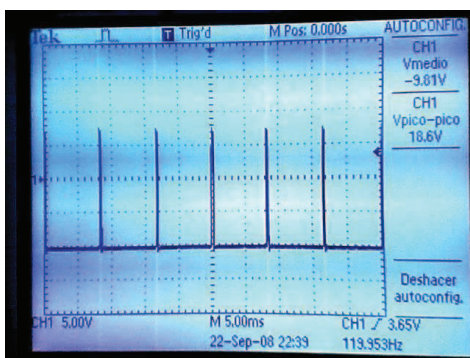
- Lectura con el multímetro FLUKE 47 $V_{RMS} = 119.2V$
- Lectura con el multímetro LG DM-311 $V_{RMS} = 118.9V$
- Lectura con el circuito acondicionador: $V_{RMS} = 119V$

En el circuito de control del actuador se realizan las calibraciones utilizando el osciloscopio TEKTRONIX.

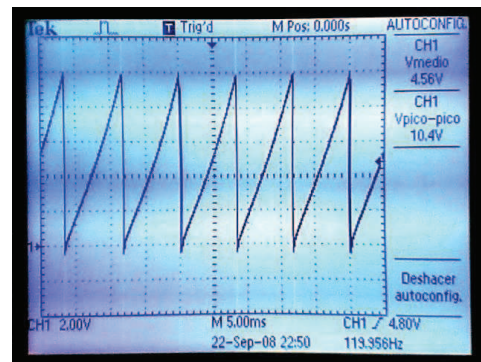
Las pruebas se realizan sobre el circuito generador de la onda diente de sierra, el circuito comparador y se comprueban los resultados del voltaje aplicado a la lámpara.

En el circuito detector de cruce por cero, figura 2.4 se realizan pruebas para obtener el valor de las resistencias R3 y R4 del circuito. La mejor respuesta que se obtuvo es la que se muestra en la figura 4.1 (a), con la cual se llega a los valores de las resistencias.

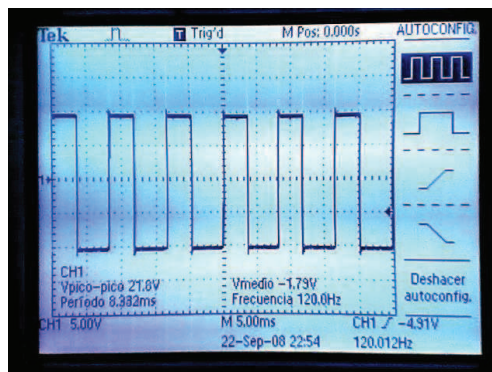
Para tener el rango de voltaje de control del circuito de disparo, se calibra al circuito integrador modificando el valor de la resistencia del potenciómetro hasta eliminar el valor negativo de voltaje de control, figura 2.7; obteniendo la señal que se indica en la figura 4.1 (b).



a. Detector de cruce por cero.



b. Generador de la onda diente de sierra.



c. Señal de control PWM.

Figura 4.1 Formas de onda del circuito de disparo.

El voltaje pico–pico del circuito generador de la onda diente de sierra es de 10.4V, como se observa en la figura 4.1 (b).

En el circuito comparador que genera la señal PWM sincronizada con la red para el circuito de potencia se toma un valor de comparación de 4.3V. En la cual se obtiene la señal que se muestra en la figura 4.1 (c).

En el circuito de potencia básicamente se obtiene la onda generada por el conversor AC – AC, figura 4.2.

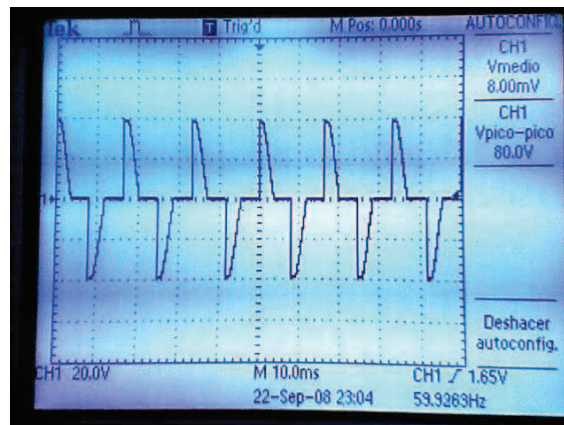


Figura 4.2 Forma de onda del circuito de potencia del actuador.

Para esta prueba se utiliza un transformador de relación $n=2$. La lectura del osciloscopio arroja el resultado mostrado en la figura 4.2 cuando el voltaje de control del actuador es 4.3V.

Además se realizan calibraciones en el circuito acondicionador de temperatura llegando a los valores esperados.

Las pruebas para el microcontrolador que maneja la visualización de las variables de la planta, tienen como objetivo verificar el correcto funcionamiento del sistema microprocesado de la planta con los tipos de control que se implementan.

Para el controlador las pruebas realizadas básicamente se restringen al funcionamiento del sistema.

Primero se realizaron calibraciones para el transductor de señal de corriente a voltaje de la variable medida por parte de la resistencia de carga al valor de 500Ω .

Se analizó el funcionamiento del sistema microprocesado del controlador para el acceso a los tipos de control implementados. Además se realizaron pruebas correspondientes al funcionamiento de los puertos del controlador en todas las variables que intervienen.

Con la calibración de las señales que ingresan a los canales análogos del microcontrolador principal, se realizan las pruebas que comprueban el desempeño del microcontrolador con el programa de control incorporado para todos los posibles desenlaces utilizados, como el ingreso erróneo de datos, la selección del tipo de control, la implementación de la linealización y el control PID.

Realizadas todas las pruebas que comprueban el funcionamiento eficiente de los dos módulos, se procede a realizar las pruebas para el control de la temperatura de la planta utilizando todos los controladores anteriormente diseñados, construidos y probados.

4.1 CONTROL EN LAZO CERRADO.

La realización de la prueba del sistema de control aplicado al módulo de temperatura se encuentra bajo las siguientes condiciones externas:

- Temperatura ambiente $T_{amb} = 22^{\circ}C$
- Velocidad del viento $V_{viento} = 0m/s$
- Voltaje de la red $V_{FN} = 119V$

Se escoge el valor de referencia $r = 9.75V$

El sistema de control se representa en el diagrama de bloques de la figura 4.3:

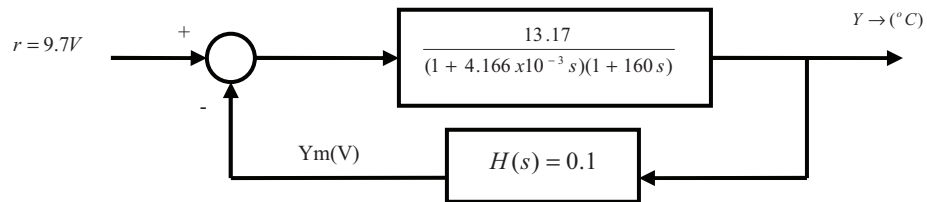
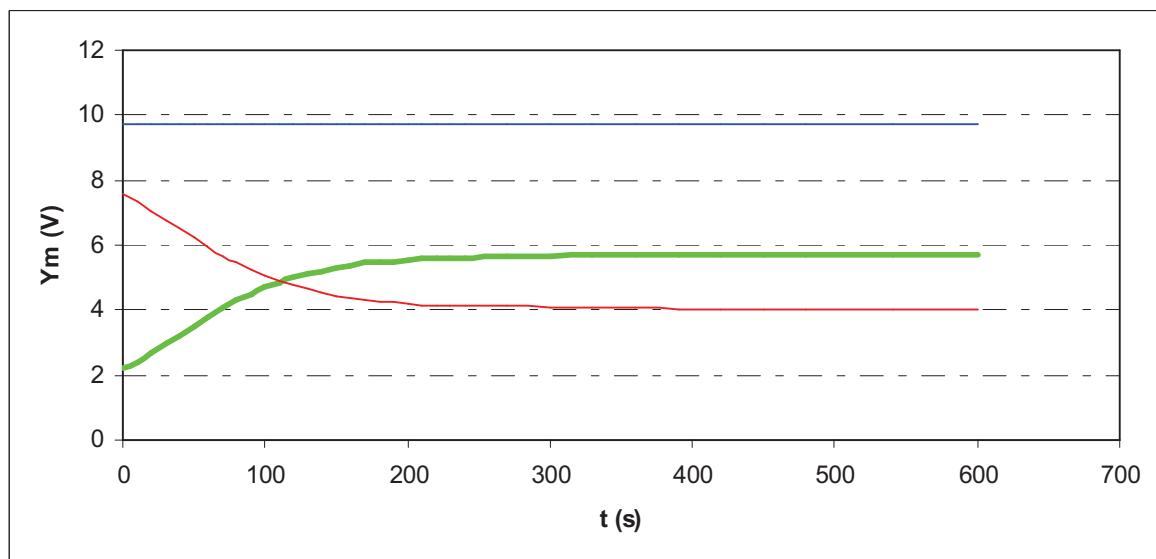


Figura 4.3 Diagrama de bloques del control en lazo cerrado.

Se realiza la acción de control durante 10 minutos donde se obtiene los resultados que se presentan en la figura 4.4:



Leyenda:

- Referencia r. (■)
- Señal de control u. (■)
- Respuesta de la planta Ym. (■)

Figura 4.4 Respuesta de la planta en control en lazo cerrado.

Nota: Como respuesta de la planta se toma la señal de la variable medida.

Los parámetros más relevantes de la respuesta del sistema de control son:

- Referencia: $r = 9.7V$
- Temperatura inicial: $T_{t=0s} = 22^\circ C$
- Tiempo de establecimiento: $t_s = 220s$
- Temperatura en estado estable $T_{t=\infty} = 57.3^\circ C$
- Máximo sobre pico $Mp = 0\%$
- Error de posición $E = 41.2\%$
- La señal de control en estado estable es de $u_{t=\infty} = 3.8V$

4.2 CONTROL PID ANÁLOGO.

Para el control PID análogo se utiliza el control PID sin compensación y el control con compensación a la no linealidad del actuador de la planta.

Las pruebas para los dos tipos de control se realizan bajo las mismas condiciones externas al sistema de control:

- Temperatura ambiente $T_{amb} = 20^\circ C$
- Velocidad del viento $V_{viento} = 0m / s$
- Voltaje de la red $V_{FN} = 116V$
- Voltaje de referencia $r = 7V$

4.2.1 CONTROL SIN COMPENSACIÓN.

En el caso sin compensación, el microcontrolador realiza la selección para tener acceso a la señal de control directamente del PID análogo.

La primera prueba trata de obtener la mejor respuesta de la planta. Se parte desde los valores de las constantes de control que se obtienen a partir del modelo de Ziegler – Nichols.

Con las calibraciones respectivas por simulación se llega a los siguientes valores de las constantes del controlador.

$$K_p = 15$$

$$T_i = 22$$

$$T_d = 0$$

El diagrama de bloques del sistema de control es el siguiente:

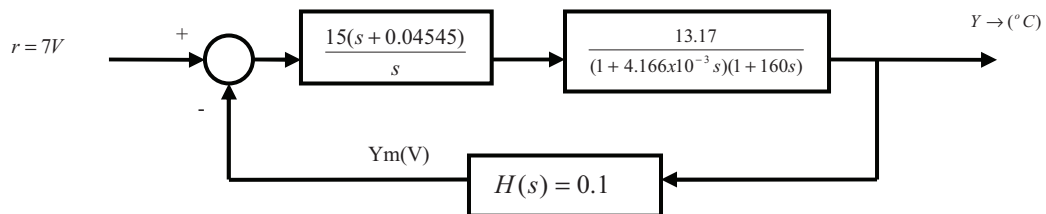
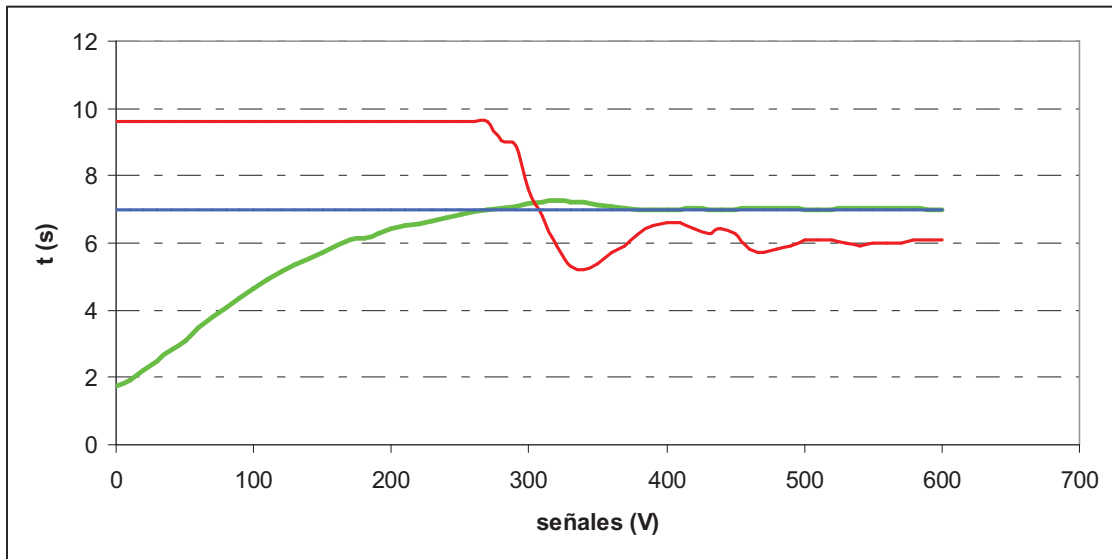


Figura 4.5 Diagrama de bloques del control PID análogo sin compensación de no linealidad.

La acción de control se realiza durante 10 minutos en la que se obtienen los siguientes resultados que se indican en la figura 4.6:



Leyenda:

- Referencia. (■)
- Señal de control. (■)
- Respuesta de la planta Y_m . (■)

Figura 4.6 Respuesta de la planta con el control PID sin compensación de no linealidad.

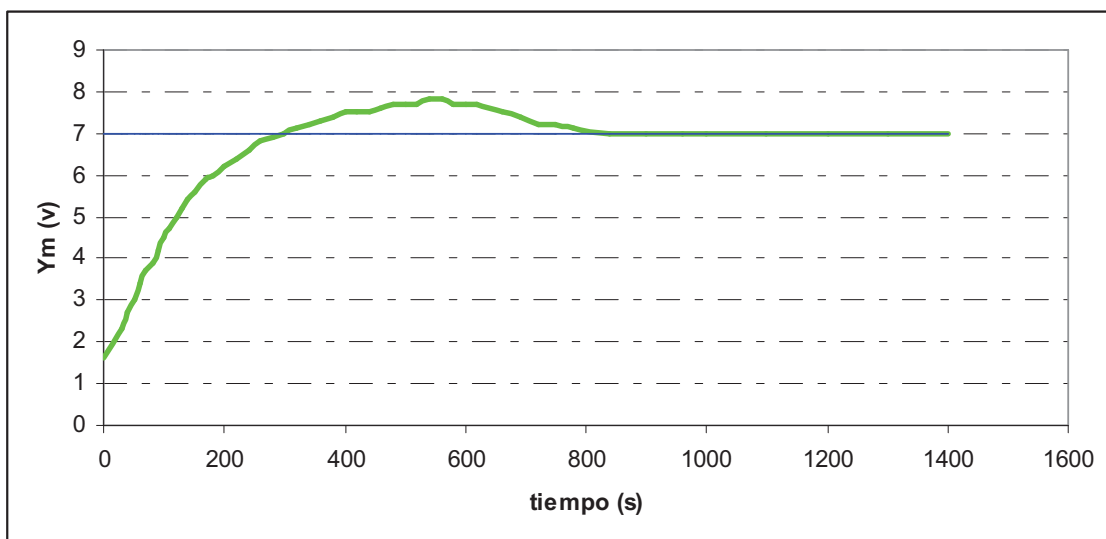
Los parámetros más relevantes de la respuesta del sistema de control son:

- Referencia: $r = 7V$
- Temperatura inicial: $T_{t=0s} = 20^{\circ}C$
- Tiempo de establecimiento: $t_s = 350s$
- Temperatura en estado estable $T_{t=\infty} = 70^{\circ}C$
- Máximo sobre pico $M_p = 3.57\%$
- Error de posición $E = 0\%$
- La señal de control en estado estable es de $u_{t=\infty} = 6.1V$

Nota: para el tiempo de establecimiento se toma el valor de la respuesta con un error del 2% de su valor en estado estable.

Para la segunda prueba se cambia el valor de la constante proporcional $K_p = 1$ y manteniendo los valores de las constantes integral y derivativa $T_i = 22$ y $T_d = 0$.

La acción de control se aplica durante 20 minutos en los cuales se obtienen los siguientes resultados:



Leyenda:

- Referencia. (■)
- Respuesta de la planta Ym (■)

Figura 4.7 Respuesta de la planta con el control PID sin compensación.

Los parámetros más relevantes de la respuesta del sistema de control son:

- Referencia: $r = 7V$
- Temperatura inicial: $T_{t=0s} = 16^{\circ}C$

- Tiempo de establecimiento: $t_s = 700s$
- Temperatura en estado estable $T_{t=\infty} = 70^\circ C$
- Máximo sobre pico $M_p = 11.42\%$
- Error de posición $E = 0\%$
- La señal de control en estado estable es de $u_{t=\infty} = 6.1V$

4.2.2 CONTROL CON COMPENSACIÓN.

En el control PID con compensación de no linealidad, el microcontrolador digitaliza la señal de control y realiza la linealización del control de fase directo para el actuador.

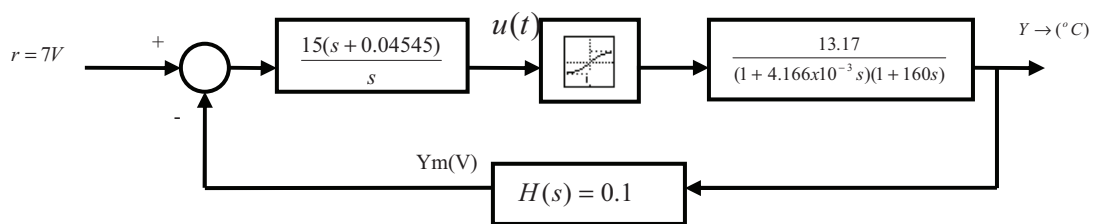
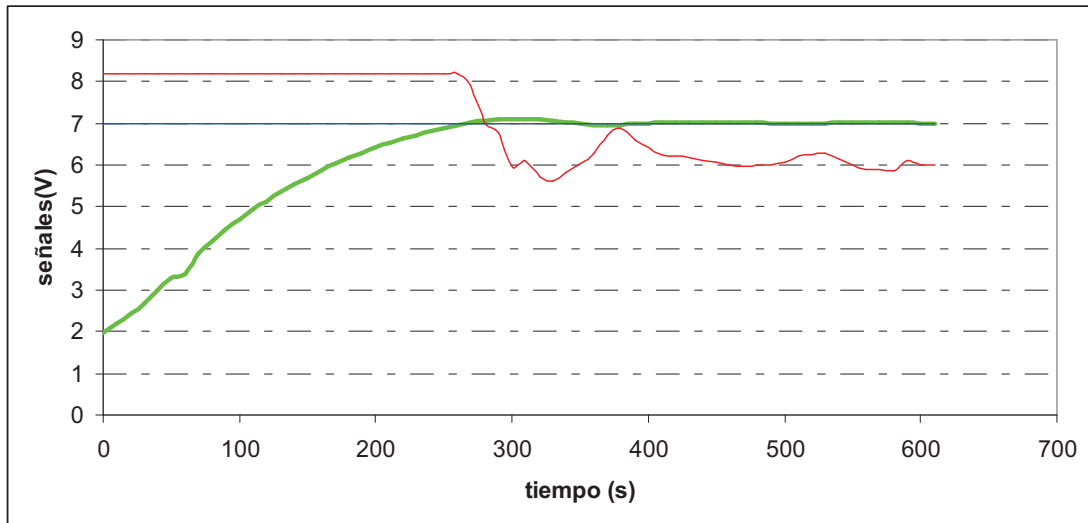


Figura 4.8 Diagrama de bloques del control PID analógico con compensación.

La acción de control se realiza durante 10 minutos en la que se obtienen los siguientes resultados que se indican en la figura 4.9:



Leyenda:

- Referencia. (■)
- Señal de control. (■)
- Respuesta de la planta Y_m . (■)

Figura 4.9 Respuesta de la planta con control PID con compensación.

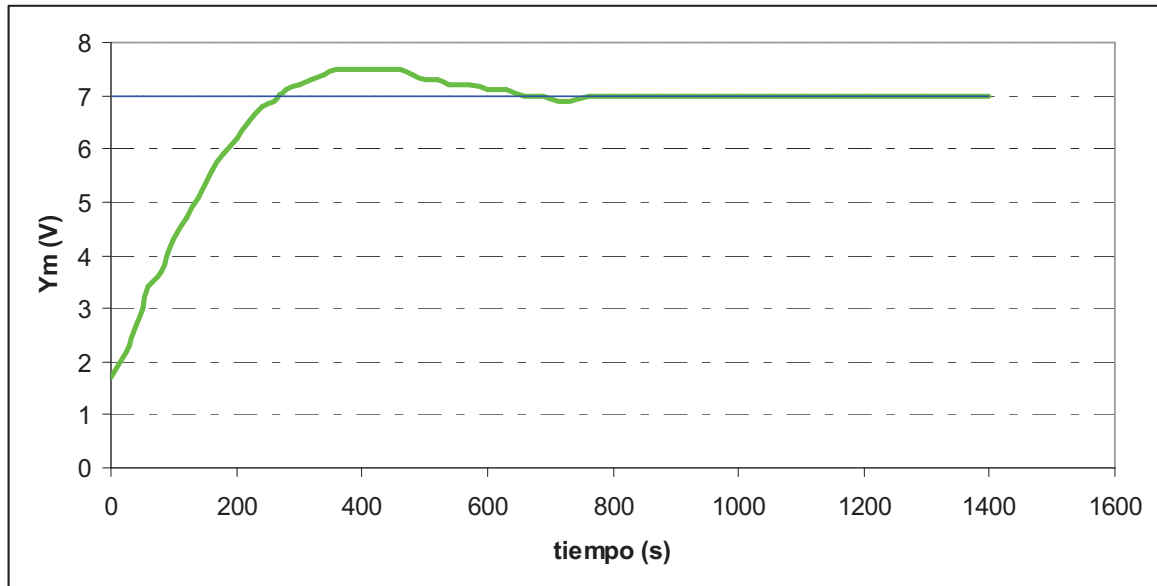
- Referencia: $r = 7V$
- Temperatura inicial: $T_{t=0s} = 20^\circ C$
- Tiempo de establecimiento: $t_s = 250s$
- Temperatura en estado estable $T_{t=\infty} = 70^\circ C$
- Máximo sobre pico $M_p = 1.57\%$
- Error de posición $E = 0\%$

La señal de control en estado estable es de $u_{t=\infty} = 6.09V$

Para la segunda prueba se realiza el mismo cambio de los parámetros del control PID que en el caso de la segunda prueba del control sin compensación.

$$K_p = 1, T_i = 22 \text{ y } T_d = 0.$$

La acción de control se aplica durante 20 minutos cuyos resultados se muestran en la figura 4.10.



Leyenda:

- Referencia. (■)
- Respuesta de la planta Y_m . (■)

Figura 4.10 Respuesta de la planta con control PID con compensación.

- Referencia: $r = 7V$
- Temperatura inicial: $T_{t=0s} = 17^{\circ}C$
- Tiempo de establecimiento: $t_s = 600s$
- Temperatura en estado estable $T_{t=\infty} = 70^{\circ}C$
- Máximo sobre pico $M_p = 7.14\%$
- Error de posición $E = 0\%$
- La señal de control en estado estable es de $u_{t=\infty} = 6.1V$

En ambos casos en la respuesta que se obtiene del sistema de control con la compensación de la señal de control el valor del máximo sobrepico es menor en el caso que se utiliza el compensador para la no linealidad del actuador,

reduciéndose en promedio en un 50% del valor. El tiempo de establecimiento también se reduce de forma significativa para las dos pruebas, mejorando la respuesta en estado transitorio de la planta.

4.3 CONTROL PID DIGITAL CON MICROCONTROLADOR.

En el control PID digital, las pruebas se realizan bajo las mismas condiciones externas para el control sin y con el compensador a la no linealidad del actuador de la planta.

- Temperatura ambiente $T_{amb} = 20^{\circ}C$
- Velocidad del viento $V_{viento} = 0m/s$
- Voltaje de la red $V_{FN} = 116V$
- Voltaje de referencia $r = 7V$

Los valores de las constantes del control se obtienen a partir de simulaciones del sistema de control y de pruebas realizadas con anterioridad.

$$K_p = 10$$

$$K_i = 2$$

$$K_d = 1$$

$$T_m = 3.5[s], \text{ periodo de espera para volver ejecutar la ley de control.}$$

4.3.1 CONTROL SIN COMPENSACIÓN.

En el control PID digital sin compensación de no linealidad del actuador, el valor de la referencia y los valores de las constantes y sin la compensación a la no linealidad del actuador se ingresan por teclado.

El diagrama de bloques del sistema de control es el siguiente:

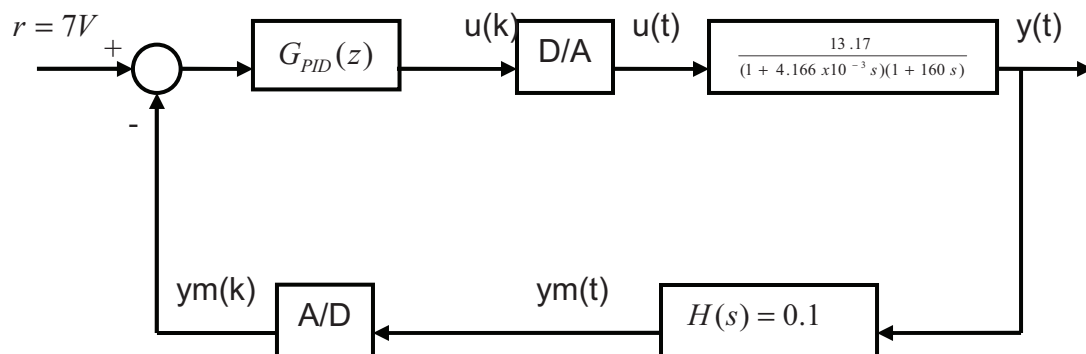
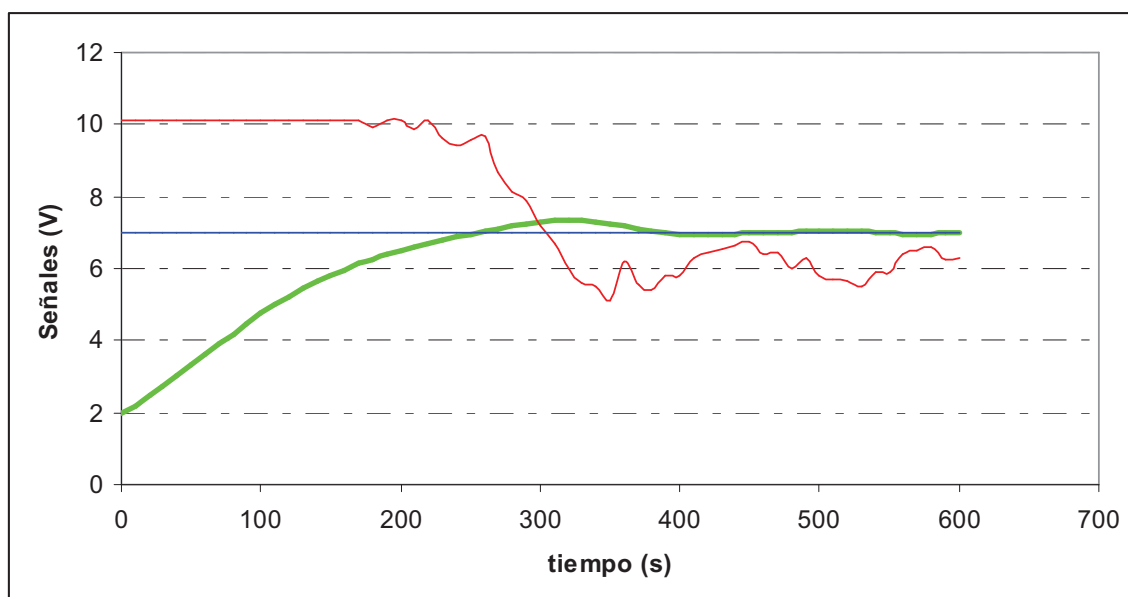


Figura 4.11 Diagrama de bloques del sistema de control PID con microcontrolador.

La acción de control se ejecuta durante 10 minutos obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la figura 4.12:



Leyenda:

- Referencia. (■)
- Señal de control. (■)
- Respuesta de la planta. (■)

Figura 4.12 Respuesta de la planta con control PID digital sin compensación.

Los parámetros más relevantes de la respuesta en estado transitorio y estable son:

- Referencia: $r = 7V$
- Temperatura inicial: $T_{t=0s} = 20^{\circ}C$
- Tiempo de establecimiento: $t_s = 360s$
- Temperatura en estado estable $T_{t=\infty} = 70^{\circ}C$
- Máximo sobre pico $M_p = 5\%$
- Error de posición $E = 0\%$
- La señal de control en estado estable es de $u_{t=\infty} = 6.2V$

4.3.2 CONTROL CON COMPENSACIÓN.

En el control PID digital con compensación a la no linealidad del actuador, el microcontrolador realiza la compensación después de haber ejecutado la ley de control. No se realiza ningún cambio de los valores de las constantes del PID y se realiza el control bajo las mismas condiciones que el control sin compensación.

El diagrama de bloques del sistema de control es el siguiente:

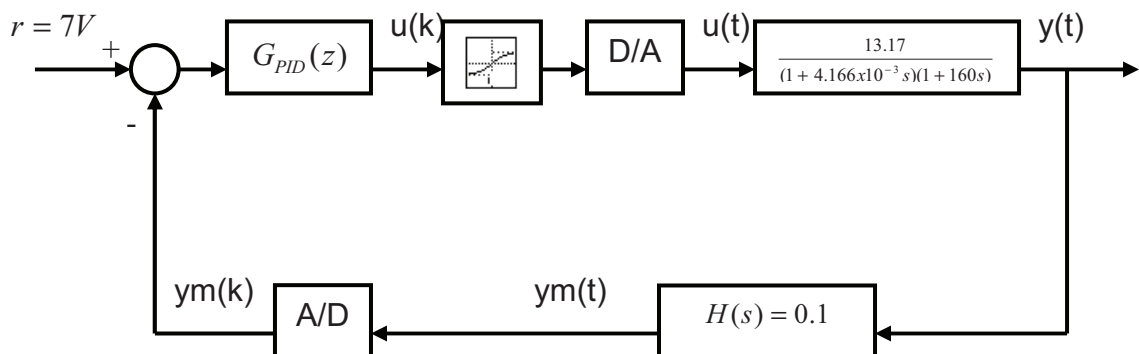
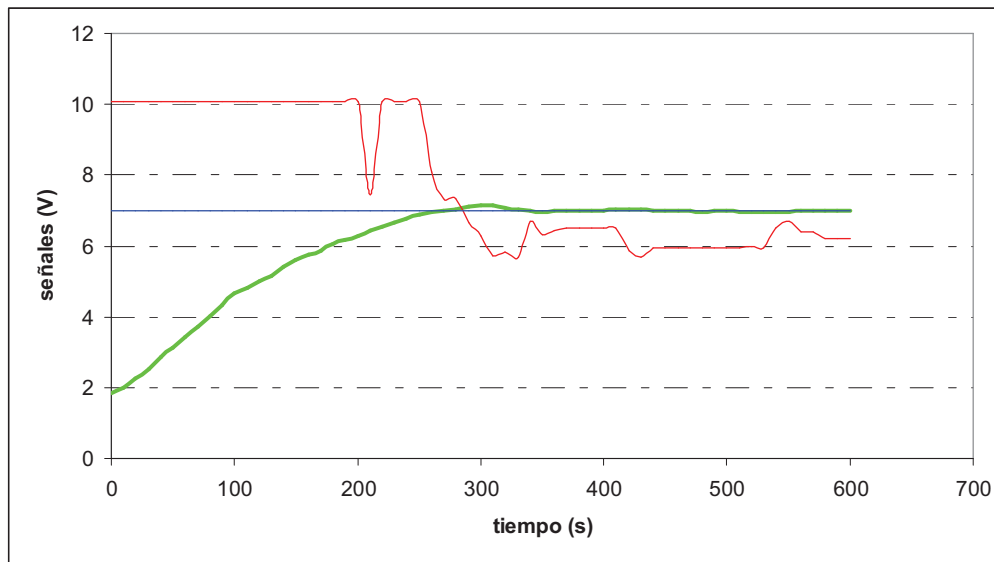


Figura 4.13 Diagrama de bloques del sistema de control PID con microcontrolador con compensación.

La acción de control se ejecuta durante 10 minutos obteniendo los siguientes resultados:



Leyenda:

- Referencia. (■)
- Señal de control. (■)
- Respuesta de la planta. (■)

Figura 4.14 Respuesta de la planta con control PID digital con compensación.

Los parámetros más relevantes de la respuesta en estado transitorio y estable son:

- Referencia: $r = 7V$
- Temperatura inicial: $T_{t=0s} = 20^{\circ}C$
- Tiempo de establecimiento: $t_s = 240s$
- Temperatura en estado estable $T_{t=\infty} = 70^{\circ}C$
- Máximo sobre pico $M_p = 2\%$
- Error de posición $E = 0\%$
- La señal de control en estado estable es de $u_{t=\infty} = 6.2V$

4.4 CONTROL PID DIGITAL POR COMPUTADOR.

Para esta prueba es diferente el ambiente externo para el sistema de control, comparando con las pruebas anteriores. Las condiciones externas son las siguientes:

- Temperatura ambiente $T_{amb} = 28^{\circ}C$
- Velocidad del viento $V_{viento} = 0m/s$
- Voltaje de la red $V_{FN} = 121V$
- Voltaje de referencia $r = 8.02V$

El diagrama de bloques del controlador, figura 4.15 presenta las etapas del sistema de control.

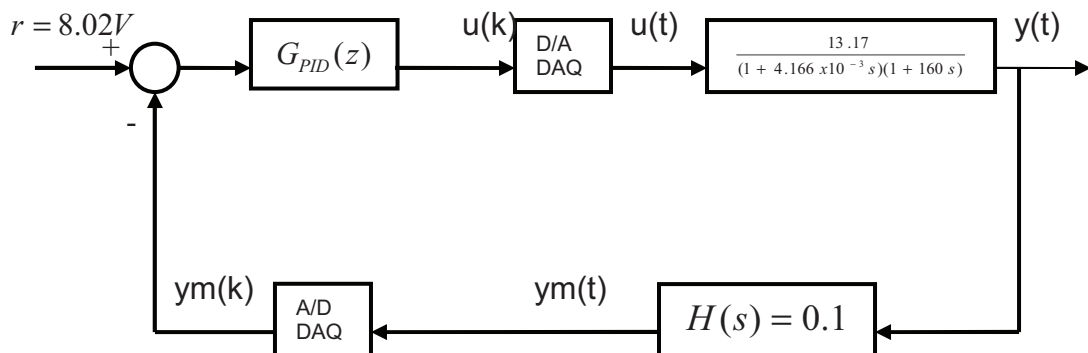
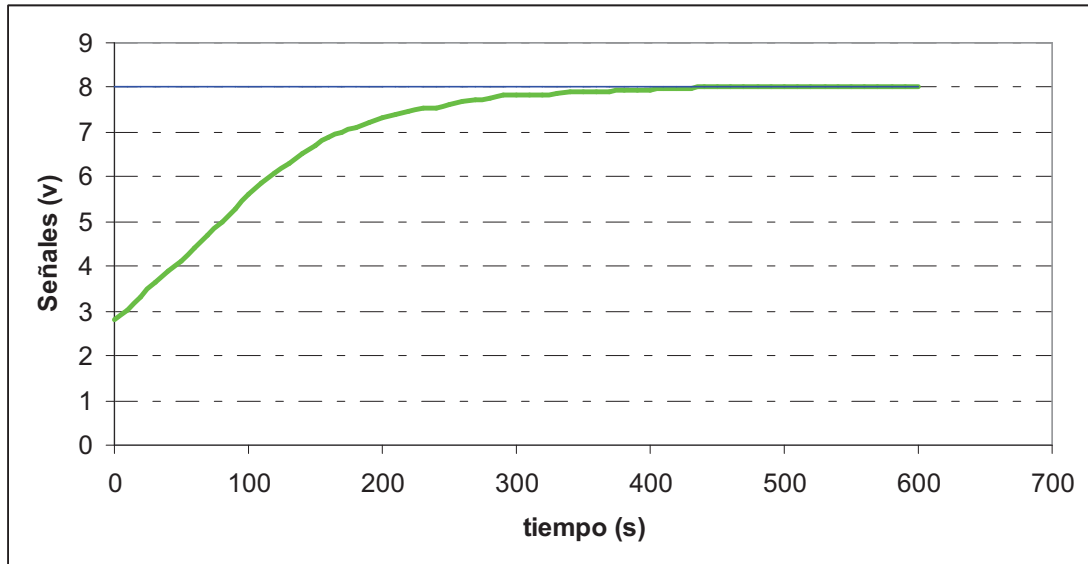


Figura 4.15 Diagrama de bloques del sistema de control PID con computador.

Los valores de las constantes del control PID toman como referencia los valores del control PID análogo y para el periodo de muestreo se toma el valor de $T_m = 0.005s$, con el objetivo de tener mejor aproximación al control PID análogo.

La acción de control se ejecuta durante 10 minutos obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la figura 4.16:



Leyenda:

- Referencia. (■)
- Respuesta de la planta Y_m . (■)

Figura 4.16 Respuesta de la planta con el control PID digital por computador.

Los parámetros más relevantes de la respuesta en estado transitorio y estable son:

- Referencia: $r = 8.02V$
- Temperatura inicial: $T_{t=0s} = 28^{\circ}C$
- Tiempo de establecimiento: $t_s = 300s$
- Temperatura en estado estable $T_{t=\infty} = 80.2^{\circ}C$
- Máximo sobre pico $M_p = 0\%$

- Error de posición $E = 0\%$
- La señal de control en estado estable es de $u_{t=\infty} = 5.4V$

4.5 COMPENSADOR POR REDES.

Esta prueba se realiza bajo condiciones ambientales similares que para el control PID con computador son las siguientes:

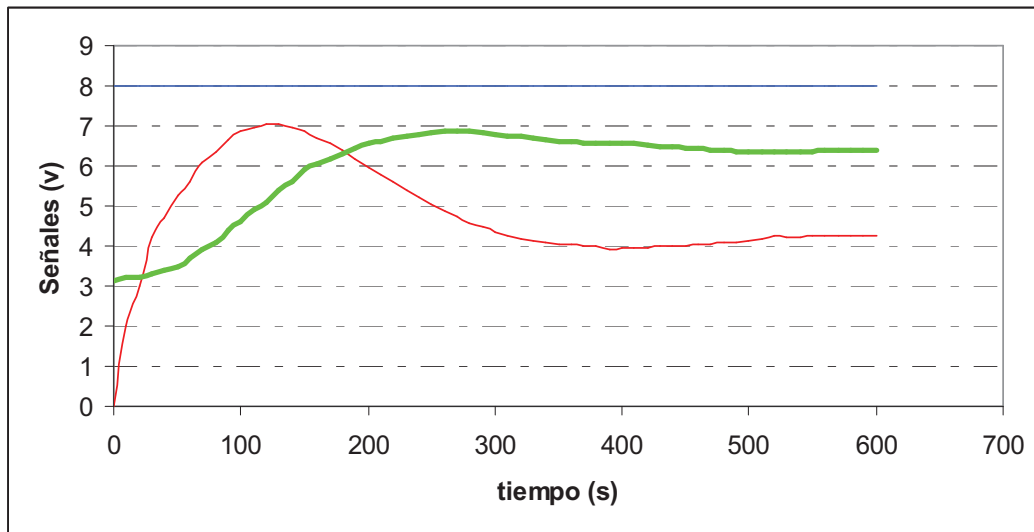
- Temperatura ambiente $T_{amb} = 28^{\circ}C$
- Velocidad del viento $V_{viento} = 0m/s$
- Voltaje de la red $V_{FN} = 120V$
- Voltaje de referencia $r = 8V$

La figura 4.15 presenta el diagrama de bloques del control PID y para control por redes es similar salvo el caso de la función de transferencia del controlador.

Los valores de las constantes del controlador se obtienen a partir del compensador diseñado (inciso 3.3.3.1).

Como valor del periodo de muestreo, se tomó el mismo valor utilizado que para el control PID ($T_m = 0.005s$).

La acción de control se ejecuta durante 10 minutos obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la figura 4.17:



Leyenda:

- Referencia. (■)
- Señal de control. (■)
- Respuesta de la planta. (■)

Figura 4.17 Respuesta de la planta con el compensador por redes digital por computador.

- Referencia: $r = 7V$
- Temperatura inicial: $T_{t=0s} = 31^{\circ}C$
- Tiempo de establecimiento: $t_s = 320s$
- Temperatura en estado estable $T_{t=\infty} = 63.8^{\circ}C$
- Máximo sobre pico $M_p = 7.5\%$
- Error de posición $E = 20.25\%$

La señal de control en estado estable es de $u_{t=\infty} = 4.26V$

Las pruebas realizadas utilizando el control por computador en otro tipo de ambiente externo no afecta la repuesta de la variable medida de la planta manteniendo el error en 0%, sin embargo la señal de control disminuye con

respecto a los demás pruebas realizadas con los otros controles PID implementados a causa de este factor externo.

CAPÍTULO 5.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES.

- Con la realización del circuito visualizador del voltaje RMS aplicado a la lámpara del prototipo de temperatura, se obtiene la respuesta de la planta en estado estable, comprobando la linealidad que existe entre el voltaje RMS y la temperatura de la planta.
- La incorporación del circuito acondicionador y la visualización de las constantes del control PID análogo presenta una gran utilidad al momento de realizar calibraciones del controlador para mejorar la respuesta de la planta.
- Los potenciómetros dobles, permiten realizar el monitoreo de las constantes del controlador PID análogo por medio de un circuito de acondicionamiento muy sencillo obteniendo márgenes de error muy pequeños en la lectura, evitando realizar otro tipo de acondicionamiento y algoritmos de programación complejos de las señales directas de las constantes del controlador y que pueda repercutir en el rendimiento del microcontrolador.
- El sistema microprocesado del controlador permite un fácil acceso a todos los tipos de control que requiera el usuario por software, sin alterar el funcionamiento de los tipos de control tanto análogos como digitales.
- El sistema de linealización implementado para la no linealidad del convertidor AC-AC del circuito de potencia del actuador de la planta, presenta como principal ventaja disminuir considerablemente el sobrepico que genera el sistema de control para el controlador PID análogo y el PID

digital en base a microcontrolador, sin alterar la respuesta en estado estable como se indica en las pruebas realizadas (CAPÍTULO 4).

- El controlador maneja entradas de la variable medida (Y_m) en voltaje con un rango de (0 – 10V) y de corriente con un rango de (4 – 20mA), en el caso de entrada por corriente se debe tomar en cuenta el valor de la resistencia de carga que está incorporada en el controlador, para la polarización del transmisor de corriente para que maneje voltaje superior a 10v, mínimo requerido para realizar la lectura correcta de la variable medida.
- En el diseño de la planta, se implementó el sensor integrado (LM35) que maneja un rango de temperatura de hasta 150°C dependiendo de la serie, con esta información se determinaron los límites de la temperatura máxima del módulo a la de 95°C con una lámpara de 100W al voltaje de la red de 125v.
- Utilizando el método de ZIEGLER – NICHOLS, se encontró de forma rápida y efectiva los valores del controlador PID, confirmados por simulación y su posterior implementación al sistema de control real.
- En el sistema de control se eliminó la parte derivativa del control PID análogo debido a que la planta se la aproxima a una función de transferencia de primer orden por lo no es necesario colocar dos ceros a la función de transferencia del controlador PID.
- Para el diseño del control PID analógico se introdujo tanto para la parte integral, como para la derivativa dos etapas de amplificación que tiene como finalidad aumentar la constante integral y derivativa requerida por plantas que presentan características similares a las del módulo de temperatura, también tener un control más preciso cuando los valores son pequeños requeridos por plantas que tengan respuesta más rápida.

- El control PID incremental, es un tipo de control que simplifica el control PID digital original, permitiendo disminuir la complejidad de la programación para el microcontrolador y obteniendo un funcionamiento excelente incluyendo retardos de tiempo para la repetición de la acción de control.
- En prueba realizada con el módulo de temperatura en lazo abierto, se concluye que para este tipo de planta las condiciones externas alteran su funcionamiento especialmente como la temperatura ambiente, la humedad y el voltaje de la red.
- La configuración de los canales análogos de la tarjeta de adquisición de datos del LabVIEW se la realiza en función a la demanda requerida por software, tanto en niveles de voltaje y en número de muestras.

5.2 RECOMENDACIONES.

- La utilización de los controladores de forma didáctica, permite al estudiante interpretar el funcionamiento de todo el sistema de control, comparar la respuesta real de un sistema de control con cálculos y simulaciones y analizar las limitaciones del mismo.
- Cuando se utilice el controlador se puede contar la fuente de este módulo, ya que se puede tener acceso fácil, y la potencia que maneja permite soportar dispositivos de alta demanda de corriente a excepción de la fuente de (-12v).
- Con la entrada de la variable medida, se debe tomar en cuenta que tipo de señal es, ya sea de voltaje o de corriente conectando a la entrada correcta y eligiendo por medio del selector.

- La alimentación de la planta es necesario conectar a una red eléctrica que brinde estabilidad de voltaje especialmente en la forma, evitando los armónicos que desestabilizan al circuito de potencia cuando maneja bajos voltajes.
- Al momento de utilizar otro tipo de planta diferente a la diseñada en este proyecto, se deben tomar en cuenta todos los rangos de voltaje que maneja el controlador tanto en entrada y en salida de las señales y si utilizan actuadores que tengan no linealidad, se puede recurrir a circuitos compensadores externos para mejorar la respuesta especialmente en estado transitorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- **DORSEY**, John. SISTEMAS DE CONTROL CONTÍNUOS Y DISCRETOS, Mc Graw Hill, 2005.
- **KUO**, Benjamín, SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE CONTROL, 2da Edición, SA. DE CV México.
- **CABRERA**, Rodrigo. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CONTROL DE TEMPERATURA. Tesis de grado. Noviembre 1996.
- **UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID**, SISTEMAS MUESTRADOS, [http://www.elai.upm.es/spain/Asignaturas/Servos/practicas/prac10 sis mes tr.pdf](http://www.elai.upm.es/spain/Asignaturas/Servos/practicas/prac10_sis_mes tr.pdf).
- **FRIDMAN**, Leonid. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL, Departamento de Control, División de Ingeniería Eléctrica Facultad de Ingeniería UNAM, agosto 2006.
- **NATIONAL INSTRUMENTS**, MANUAL DE LABVIEW 7.0, http://www.inele.ufro.cl/apuntes/LabView/Manuales/Manual%20 Empezand o%20 _Con%20_Labview.pdf.
- **NATIONAL INSTRUMENTS**, DAQ QUICK START GUIDE, manual.
- **FAULKENBERRY**, Luces. INTRODUCCIÓN A LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES CON APLICACIONES ACI LINEALES, LIMUSA, Grupo Noriega, 1992, México.
- **ALFARO**, Víctor. ECUACIONES PARA CONTROLADORES PID UNIVERSALES, [http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub inv/a rticulos/valfaro02A.pdf](http://www.eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub_inv/a rticulos/valfaro02A.pdf)

- **AMÉSTEGUI**, Mauricio. APUNTES DE CONTROL PID. Universidad Mayor de San Andrés (Bolivia), 2001.
http://www.alumnos.usm.cl/~ignacio.morande/descargas/apuntes_de_control_pid.pdf
- **RASIHD**, Muhammad H. ELECTRÓNICA DE POTENCIA, 3ra edición, Pearson Prentice Hall.
- **MICROCHIP**. 16F87XA DATA SHEET 28/40/44 PIN ENHANCED FLASH MICROCONTROLLERS, www.microchip.com
- **ANGULO**, José, **ANGULO**, Ignacio, **ETXEBARRÍA**, Aritza. MICROCONTROLADORES PIC, 4ta Edición, Mc Graw Hill, 2007.
- **NATIONAL SEMICONDUCTOR**, Precision Centigrade Temperature Sensors, Datasheet.
- **NATIONAL INSTRUMENTS**, USER GUIDE AND SPECIFICATIONS (USB-6008/6009), http://www.tau.ac.il/~electro/pdf_files/computer/ni_6008_ADC_manual.pdf
- **ANALOG DEVICES**, 4 – 20mA Transmitter, Datasheet.

ANEXOS

ANEXO A.

A. FOTOGRAFÍAS DE LOS MÓDULOS.

A-1. FOTOGRAFÍAS DE LA PLANTA.

Figura A1. Fotografía de la planta (vista frontal).

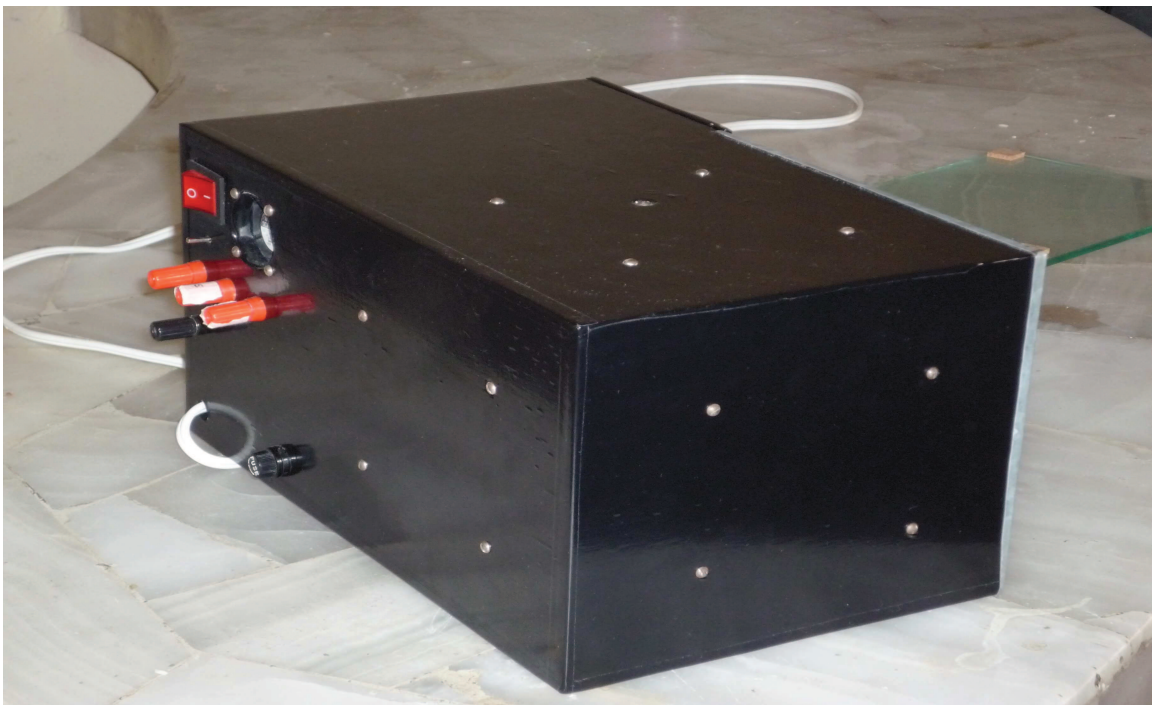


Figura A2. Fotografía de la planta (vista posterior).

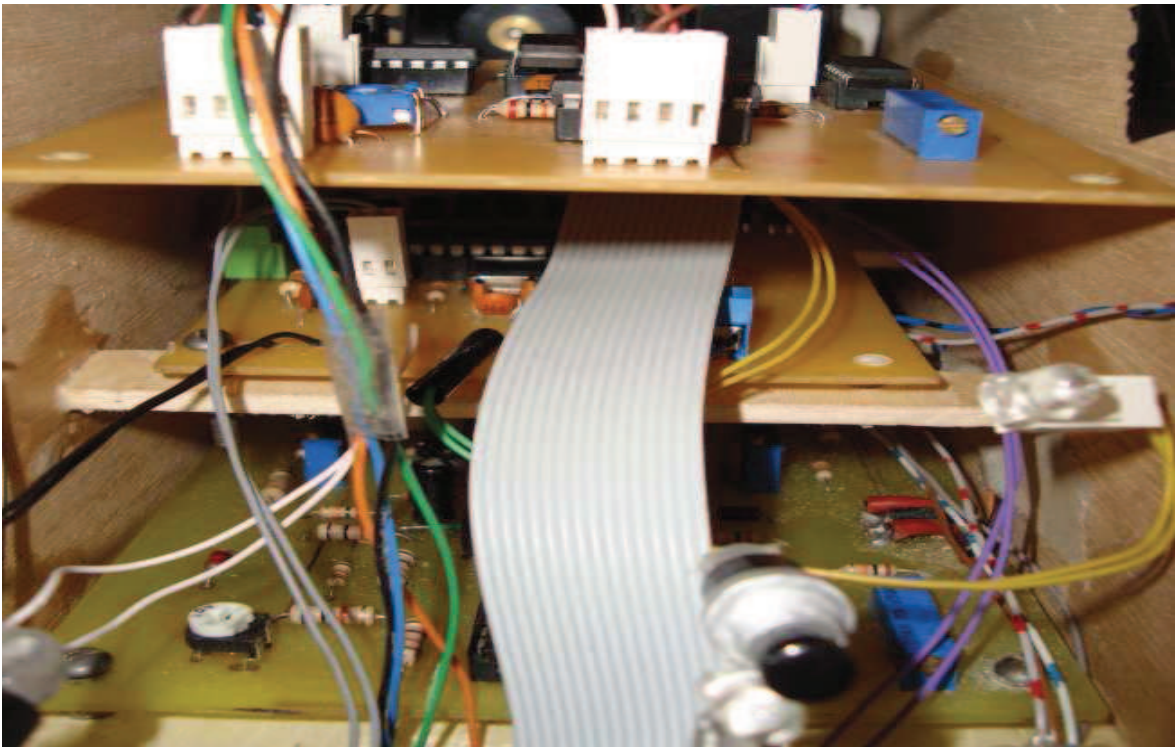


Figura A3. Distribución interna de las tarjetas.

A-2. FOTOGRAFÍAS DEL CONTROLADOR.



Figura A4. Fotografía del controlador (vista frontal).



Figura A5. Fotografía del controlador (vista posterior).

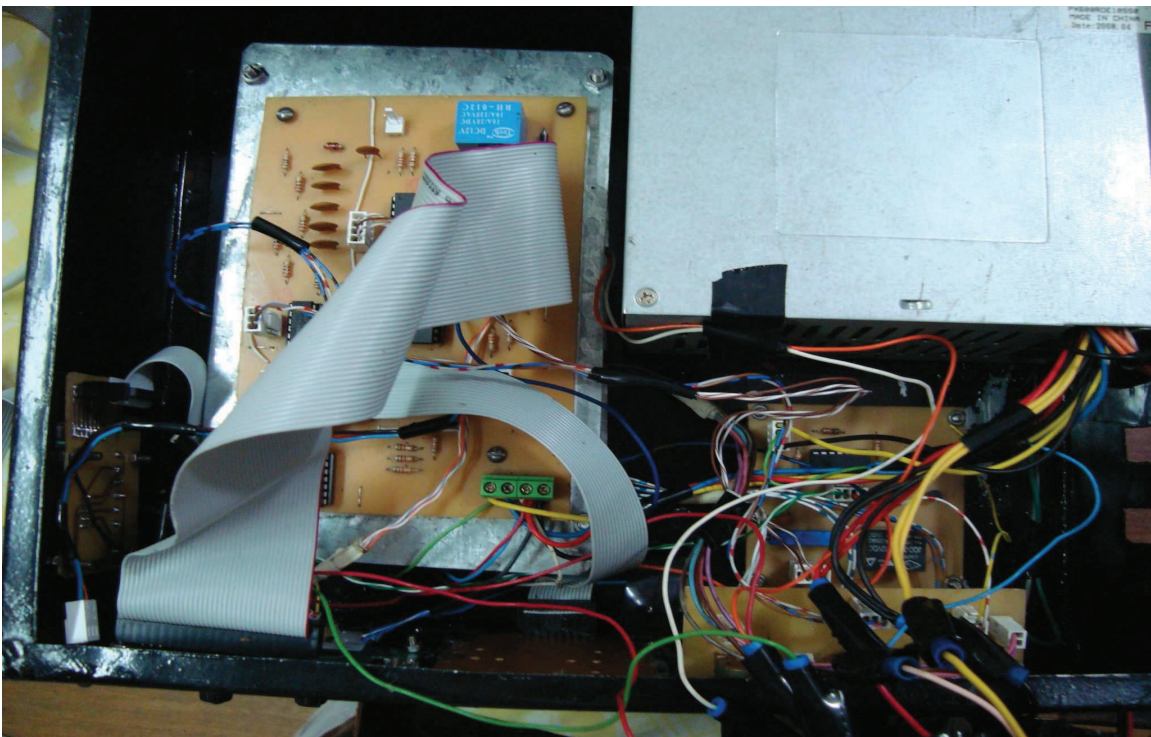


Figura A6. Distribución de las tarjetas.



Figura A7. Sistema de control.

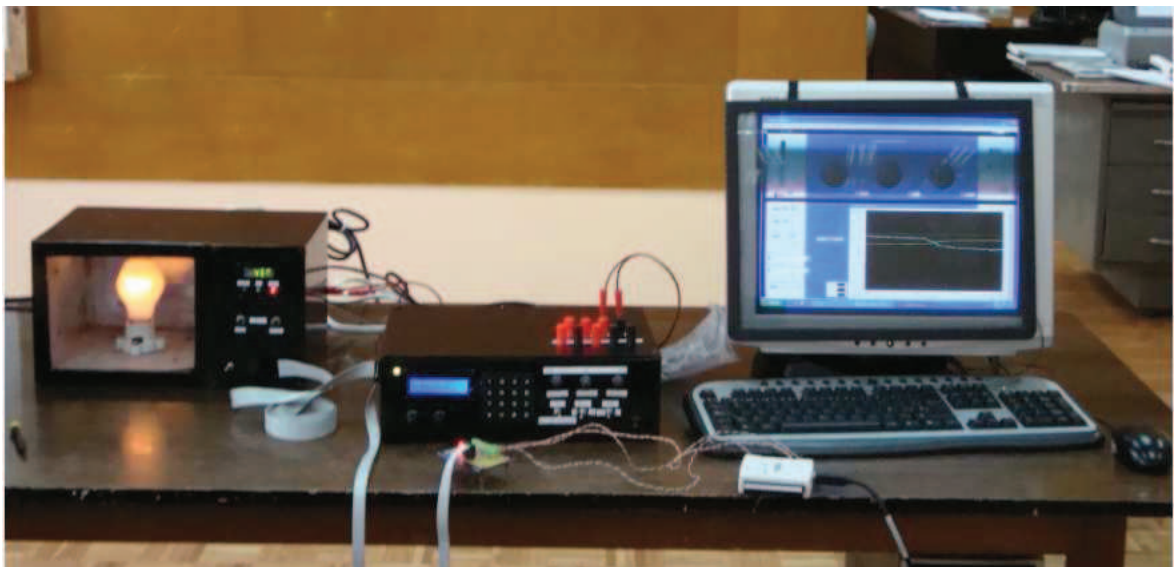


Figura A8. Funcionamiento del sistema de control.

ANEXO B.

B. GUÍA DE USUARIO.

B-1. GUÍA DE USUARIO (MÓDULO DE TEMPERATURA).

El módulo de temperatura puede manejar un rango de funcionamiento desde la temperatura ambiente hasta un valor máximo de 95°C dependiendo de las condiciones externas.

Para el correcto funcionamiento del módulo de temperatura se describe a continuación las instrucciones de funcionamiento:

1. Alimentación.

El módulo requiere de dos tipos de alimentación:

Para la alimentación del circuito de potencia, el voltaje requiere las siguientes características: $V_{AC} : 100 - 130V / 60Hz$.

El módulo no tiene fuente interna de voltaje DC por lo que la alimentación de polarización debe ser externa.

Los niveles de voltaje requeridos son: 12V (2.4w), -12V (1w), 5V (2.5w), GND.

Para la alimentación de los voltajes de polarización se accede de dos formas:

- a. A través de los conectores banana colocados en la parte posterior.
- b. Por el puerto frontal del módulo. (véase figura 2.37)

NOTA: Para la alimentación del circuito de potencia primero se desconecta el circuito de potencia utilizando el interruptor colocado en la parte posterior del módulo.

PRECAUCIONES:

- Para la alimentación de los voltajes de polarización se tiene que conectar con la fuente apagada y luego encender todas las alimentaciones al mismo tiempo.
- No alimentar a la planta con otros voltajes que no sean los indicados previamente ya que puede ocasionar daños en el módulo.

2. Funcionamiento.

El selector que se encuentra en la parte frontal, selecciona el control en lazo abierto incluido en el módulo o la opción de un control externo, que utiliza el puerto del módulo.

En la posición derecha se realiza el control dentro de la planta, variando el voltaje aplicado a la lámpara por medio del potenciómetro que se encarga de variar el voltaje RMS aplicado a la lámpara.

El pulsante derecho de la planta (ON–OFF) tiene la función de apagar y encender el display de indicación de los parámetros de la planta sin alterar el funcionamiento del módulo.

El pulsante izquierdo (Var) tiene la función de presentar en forma cíclica los valores de: Temperatura, ángulo de disparo del convertidor y voltaje RMS aplicado a la lámpara, cuando se presione el pulsante.

NOTA: Al encender se muestra en el display el valor de la temperatura en °C en la cámara del módulo.

Los indicadores (Temp , V_{RMS} , α) muestran que variable es la que se presenta en el display.

IMPORTANTE: Cuando se enciende al módulo con el selector colocado en la posición de control externo el display indica situación de alarma si no tiene la resistencia de carga para el transmisor de corriente que envía el valor de temperatura.

Para realizar el control con un controlador externo se utiliza obligatoriamente el puerto del módulo para enviar la señal de temperatura y recibir la señal de control.

La señal de control debe tener un rango de voltaje comprendido entre 0 y 10v.

La temperatura de la cámara del módulo se transmite por corriente con valores comprendidos entre 4 y 20mA para un rango de temperatura comprendido entre 0 y 100°C respectivamente.

NOTA: la resistencia de carga debe tener un valor máximo de 500 Ω

3. Indicaciones adicionales.

Las características de la lámpara son: 120V/60Hz con potencia nominal de 100W

NOTA: evitar colocar otra lámpara de mayor valor de potencia al especificado.

La cámara de temperatura se encuentra conectada a tierra.

PRECAUCIONES:

- No introducir objetos extraños a la cámara de temperatura.
- Evitar colocar las manos dentro de la cámara.
- La tecnología del transmisor de corriente es CMOS. Evite realizar contacto con el puerto del módulo.

B-2. GUÍA DE USUARIO DEL CONTROLADOR.

El controlador maneja niveles de voltaje entrada y salida estandarizados.

1. Alimentación.

El controlador requiere de un tipo de alimentación especificado en el diseño del controlador (Pág. 135).

Se puede acceder a la fuente interna del controlador por medio de los conectores bananas que se encuentran la parte superior del módulo, en las cuales se tienen los siguientes voltajes DC.

- 12V (15A)
- -12V (0.8A)
- 5V (28A)
- GND

Otra forma de acceso a la fuente del controlador es por medio del puerto ubicado en la parte lateral del módulo con todos los voltajes de polarización mencionados (véase figura 3.60).

NOTA: la fuente interna del controlador no tiene funcionamiento mientras no se encienda el controlador utilizando el interruptor principal ubicado en la parte inferior derecha del módulo.

2. Funcionamiento.

Al encender el módulo todos los controladores se activan pero la salida de la señal de control (u) se pone en referencia circuital (GND).

A través del display LCD el controlador presenta un mensaje inicial que tiene una duración aproximada de 4 segundos en dos etapas (véase figura 3.44).

NOTA: Durante la presentación no se puede realizar ninguna acción al controlador hasta que termine la presentación.

La selección de un tipo de control utiliza el teclado matricial. El controlador indica que tecla se debe presionar para acceder a las funciones del controlador.

3. Ingreso y salida de las señales.

El controlador permite el ingreso de la variable medida por dos formas diferentes:

- Ingreso por voltaje con un rango de variación comprendido entre 0 y 10v.
- Ingreso por corriente con un rango de variación comprendido entre 4 y 20mA.

El controlador admite un tipo de señal a la vez. La selección se realiza por medio del selector (Y_m). El selector indica de que tipo es la variable es la que hay que realizar el control.

IMPORTANTE: Si se escoge la lectura de la señal a controlar por corriente el valor de la resistencia interna de carga tiene un valor de 500Ω . La conversión de corriente a voltaje es realizada por el controlador aplicando la siguiente fórmula:

$$V_{Y_m} = 1.25(500I_{Y_m} - 2v) : \text{Donde la corriente se expresa en [A].}$$

El transmisor de corriente debe manejar los niveles de voltaje requeridos para realizar el control de forma correcta.

La entrada de la señal para realizar la acción de control utiliza los conectores bananas ($Y_m (0-10v)$ ó $Y_m (4-20mA)$) ubicados en la parte superior del controlador.

También se puede acceder a la entrada de la variable medida (Y_m) por medio del puerto pero solamente cuando se transmite la señal por corriente.

La señal de control sale por los conectores ($U (0-10v)$ $U (-10-10v)$). Las dos salidas funcionan de manera simultánea.

Adicionalmente a la señal de control ($U (0-10v)$) se puede también acceder por el puerto (véase figura 3.60).

El puerto de diez pines (Puerto control PC) permite utilizar un control externo al controlador.

El puerto tiene las señales de: la variable medida (Y_m) en voltaje normalizado ($0-10v$), la señal de la referencia del controlador ($0-10v$), la señal de control del controlador ($0-10v$), además dispone de una entrada de voltaje para ingresar la señal de control que proviene de un controlador externo.

IMPORTANTE: la señal de controlador externo debe estar en un rango comprendido entre 0 y 5V.

4. Adicionales.

La caja del controlador es metálica, está conectada a tierra.

PRECAUCIONES:

- Evite colocar un sobre contraste al display, ya que puede ocasionar un deterioro prematuro.

- No utilizar los puertos para energizar equipo que tenga alto consumo de energía.
- Asegúrese de realizar la selección de la entrada de la señal de la variable medida.
- Coloque el valor de la referencia del control análogo al máximo cuando realice el control digital.
- Utilizar cables con aislante preferentemente bananas (no utilizar cable unifilar).
- No colocar más de un cable a la vez en los terminales del controlador.
- Verificar la distribución de los pines de los puertos del controlador antes de la conexión (utilice la tarjeta de distribución de señales).

ANEXO C.

C. CIRCUITOS ESQUEMÁTICOS Y TARJETAS DE LOS MÓDULOS.

C-1. ACTUADOR.

C-2. VISUALIZADOR.

C-3. TRANSMISOR.

C-4. PUERTOS.

C-5. CONTROL PID ANÁLOGO.

C-6. CONTROL PID DIGITAL.

C-7. CONTROL EN LAZO CERRADO.

**C-8. POTENCIÓMENTROS DE LAS CONSTANTES DEL CONTROL
PID ANÀLOGO.**

ANEXO D.**D. ESPECIFICACIONES DE LOS DISPOSITIVOS
ELECTRÓNICOS.**