

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO DE AGUA TEMPERADA DE USO DOMÉSTICO

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presentan los bachilleres:

Jesús Martín Vilca Contreras

Carolina del Rosario Vidarte Chicchón

**ASESOR:** Luis Alberto Vilcahuamán Cajacuri

Lima, noviembre de 2010

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis está orientado principalmente al área de Ingeniería de Control. El tema central consiste en diseñar e implementar un controlador de agua temperada enfocado al uso doméstico. Como parte introductoria, el documento contiene información acerca de productos o soluciones similares existentes en el mercado así como la problemática que los usuarios presentan con estos mismos.

A lo largo del documento, se expone información técnica sobre el desarrollo de un controlador difuso, basado en microcontroladores, elaborado con componentes electrónicos y circuitos integrados del mercado peruano. Además se presenta información relacionada al modelamiento del controlador difuso, así como también muestra el diseño de circuitos para una etapa de sensado y potencia las cuales son las encargadas de monitorear y controlar, respectivamente, el proceso de calentamiento del agua. Por último, se presentan las simulaciones y pruebas del diseño propuesto para comprobar su correcto funcionamiento.

El trabajo desarrollado en esta tesis pretende ofrecer una solución que se ajuste, de la mejor manera posible, con las necesidades de los usuarios para lograr resolver y mejorar los problemas existentes en los sistemas actuales.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA.....</b>	<b>2</b>
1.1. Planteamiento del Problema .....	2
1.2. Justificación .....	3
1.3. Estado del Arte.....	3
1.3.1. Presentación del Asunto de Estudio .....	3
1.3.2. Estado de la Investigación .....	4
1.3.3. Síntesis sobre el Asunto de Estudio .....	8
1.4. Objetivos .....	9
1.4.1. Objetivo General .....	9
1.4.2. Objetivos Secundarios .....	9
<b>CAPÍTULO 2. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....</b>	<b>10</b>
2.1. Modelos Matemáticos y Lógica Difusa .....	10
2.1.1. Conceptos Termodinámicos y Transferencia de Calor .....	10
2.1.2. Conceptos de Electrónica .....	12
2.1.3. Conceptos de Lógica Difusa .....	13
2.2. Sistemas Eléctricos y de Potencia .....	16
2.2.1. Sistema de Potencia .....	16
2.2.2. Dispositivos de Electrónica de Potencia .....	18
2.2.3. Circuito Detector de Cruce por Cero .....	18
2.2.4. Sensores de Temperatura .....	19
2.3. Controlador de Temperatura .....	20
2.4. Criterios de Eficiencia y Seguridad .....	21
<b>CAPÍTULO 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL .....</b>	<b>23</b>
3.1. Introducción a la Solución .....	23
3.2. Diseño del Circuito de Acondicionamiento de los Sensores .....	25
3.2.1. Sensor de Temperatura .....	25
3.3. Diseño del Circuito de Control de Potencia.....	27

3.3.1. El Calentador .....	27
3.3.2. Control de Actuadores .....	28
3.3.3. Módulo de Alimentación.....	30
3.4. Diseño e Implementación del Controlador Difuso .....	31
3.4.1. Controlador Difuso .....	31
3.4.2. Descripción del Microcontrolador .....	31
3.4.3. Programación del Microcontrolador .....	37
3.4.4. Módulo de Comunicación .....	47
<b>CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
4.1. Pruebas y Verificación de Instrumentación .....	49
4.1.1. Pruebas del Módulo de Sensores.....	49
4.2. Pruebas del Circuito de Potencia y Control Manual .....	50
4.3. Pruebas y Verificación del Controlador .....	53
4.3.1. Simulación del Controlador .....	53
4.4. Pruebas Generales del Sistema de Control .....	57
4.5. Tabla de Costos .....	64
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>67</b>

## INDICE DE GRAFICOS

Figura 1. Calentador de almacenamiento por resistencias eléctricas [32].....	5
Figura 2. Figura de un calentador a gas [5].....	5
Figura 3. Figura de un calentador solar [6].....	5
Figura 4. Onda PWM.....	13
Figura 5. Gráfica de la función de pertenencia. ....	14
Figura 6. Gráfica de evaluación de reglas. ....	15
Figura 7. Método de composición. ....	15
Figura 8. Fórmula del método de defuzzificación. ....	16
Figura 9. Esquema equivalente de un TRIAC.....	17
Figura 10. Gráfica de la respuesta del TRIAC.....	18
Figura 11. Gráfica de detector de cruce por cero. ....	19
Figura 12. Diagrama del sistema propuesto.....	23
Figura 13. Circuito de acondicionamiento de sensores.....	26
Figura 14. Diodo Blindado. ....	27
Figura 15. Circuito de mando para la resistencia. ....	29
Figura 16. Circuito de mando para el calentador.....	30
Figura 17. Controlador Proporcional-Integral difuso.....	33
Figura 18. Esquema del controlador difuso. ....	34
Figura 19. Diagrama de pines del microcontrolador PIC.....	36
Figura 20. Distribución de pines del PIC. ....	37
Figura 21. Diagrama de bloques del sistema de control.....	37
Figura 22. Diagrama de flujo general del bloque difuso. ....	39
Figura 23. Diagrama de flujo general de la etapa de fuzzificación. ....	42
Figura 24. Sintaxis de reglas difusas. ....	44
Figura 25. Algoritmo “Solución Antecedentes”.....	45

Figura 26. Algoritmo de programación evaluación de consecuentes y desfuzificación .....	46
Figura 27. Interfaz de PC de módulo de comunicaciones .....	48
Figura 28. Trama de comunicación serial .....	48
Figura 29. Diagrama de bloques de prueba a realizar .....	50
Figura 30. Escalón de entrada al sistema .....	51
Figura 31. Lectura del LCD.....	52
Figura 32. Gráfica de la respuesta del sistema al escalón.....	52
Figura 33. Foto de lectura del LC .....	52
Figura 34. Simulación Fuzzy MATLAB.....	53
Figura 35. Interfaz de configuración de reglas del bloque Fuzzy del MATLAB. ....	54
Figura 36. Funciones de pertenencia para la variable Error.....	54
Figura 37. Funciones de pertenencia para la variable Variación de Error.....	54
Figura 38. Funciones de pertenencia para la variable Salida.....	54
Figura 39. Simulación MATLAB.....	55
Figura 40. Entorno MPLAB.....	55
Figura 41. Simulación de la respuesta del controlador difuso en la interfaz MPLAB. .....	56
Figura 42. Diagrama de bloque de prueba del sistema general.....	57
Figura 43. Circuito impreso.....	58
Figura 44. Gráfica de la respuesta del sistema para un Set Point de 24 °C. ....	59
Figura 45. Gráfica de la respuesta del sistema para un Set Point de 26 °C .....	60
Figura 46. Gráfica de la respuesta del sistema para el Set Point a 28 °C.....	60
Figura 47. Gráfica de respuesta del sistema para un Set Point de 30 °C.....	61
Figura 48. Gráfica curva de corriente para prueba de 24 °C .....	62
Figura 49. Gráfica comparativo de consumo de energía (W) mensual entre calentadores para 2 a 3 usuarios. ....	63
Figura 50. Gráfica comparativo de consumo de energía (W) mensual entre calentadores para 3 a 5 usuarios. ....	63

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistencias eléctricas calefactoras [4].	6
Tabla 2. Sensores de Temperatura 1 [7].	7
Tabla 3. Sensores de Temperatura 2 [15].	7
Tabla 4. Tabla comparativa de sensores de temperatura comerciales.	25
Tabla 5. Tabla comparativa dispositivos de potencia en el mercado.	29
Tabla 6. Tabla de voltaje de alimentación por componentes.	31
Tabla 7. Cuadro comparativo de controlador difuso vs uno clásico [18].	31
Tabla 8. Comparación entre controladores P, PI y PD. [30].	32
Tabla 9. Comparación entre microcontrolador PIC y ATMEL. (Hoja de datos del fabricante).	36
Tabla 10. Tipos de funciones de pertenencia.	40
Tabla 11. Tablas de Fuzzificación.	41
Tabla 12. Tablas de reglas difusas.	43
Tabla 13. Tabla de pruebas del sensor.	49
Tabla 14. Ensayo de medición de caudal de agua.	50
Tabla 15. Medición de temperatura máxima.	51
Tabla 16. Simulación de la respuesta del controlador difuso en interfaz MPLAB. ...	56
Tabla 17. Comparación de consumo de energía entre 2 a 3 usuarios.	62
Tabla 18. Comparación de consumo de energía entre 3 a 5 usuarios.	63
Tabla 19. Tabla de costos de los componentes del sistema.	64
Tabla 20. Tabla de costos de diseño e implementación del sistema.	64

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Capacidad Calorífica.....	11
Ecuación 2. Ley de Ohm.....	12
Ecuación 3. Potencia Eléctrica.....	12
Ecuación 4. Centro de gravedad .....	16
Ecuación 5. Error.....	38
Ecuación 6. Variación de Error .....	38
Ecuación 7. Formula desfuzificación.....	47





## INTRODUCCIÓN

El control de la temperatura del agua en las viviendas de nuestro país, especialmente en las de tipo urbano, es un tema muy interesante en estos días, debido a las diversas campañas a nivel mundial relacionadas con el ahorro de agua y energía. Más aún, la tecnología involucrada en este proceso es de mucho interés tanto a nivel estudiantil como ingenieril.

Actualmente, en nuestro medio, los sistemas de control de temperatura para grifos de agua presentan bajos niveles de eficiencia en el proceso de calentamiento de agua. Por esta razón, el presente documento de tesis dará énfasis al diseño e implementación de un controlador difuso de agua temperada centrado en su uso doméstico, que tendrá como objetivo generar una solución con características acordes a las necesidades actuales de los usuarios, logrando un mejor rendimiento del sistema. Para lograr estos resultados, el sistema deberá tener un óptimo control de la variable temperatura, el cual se conseguirá mediante un controlador electrónico.

El desarrollo de esta tesis toma como punto de partida el análisis de la problemática existente en el proceso de calentamiento del agua y de los productos actuales en el mercado. Luego, se darán a conocer las distintas teorías, técnicas y propuestas acordes para el diseño del sistema. Por último, se dará énfasis al desarrollo del dispositivo, donde se explicarán en detalle los conocimientos y las técnicas utilizados para su elaboración.

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA**

### **1.1. Planteamiento del Problema**

El sistema de calentamiento de agua más usado en las viviendas urbanas en el Perú es el de los calentadores de almacenamiento de agua, más conocidos de manera popular y comercial como “termas”. El problema de estos sistemas radica en que generan un innecesario consumo de agua y de energía eléctrica, debido a la gran ineficiencia que presentan en el proceso de calentamiento del agua, lo cual conlleva a que los costos por el uso de agua y energía eléctrica se eleven, y ocasionen pérdidas de dinero al usuario, muy aparte de las pérdidas ocasionadas por la falta de control y mal uso del agua.

Así, los calentadores de almacenamiento de agua están diseñados para calentar el agua de acuerdo al volumen almacenado en el tanque de la terma, lo cual, en la mayoría de las veces, no está acorde a la demanda de agua que el usuario necesita utilizar en un determinado momento. Incluso, en el caso de que el usuario requiera el uso continuo de agua caliente, existen dos problemas con estos sistemas. El primero radica en que van a haber lapsos de tiempo en los cuales el agua no está disponible, ya que el tanque, una vez agotado, vuelve a llenarse y a calentar nuevamente el agua, lo cual podría demorar de una a dos horas en promedio, dependiendo de la capacidad de almacenamiento del tanque de la terma. A mayor volumen, se necesita un mayor tiempo de espera para que caliente el agua. El segundo radica en que si el volumen del tanque de almacenamiento está acorde a la demanda continua del usuario, el calentador del sistema va a tener que estar funcionando por ese lapso de tiempo, debido a que el agua puede disminuir su temperatura al tener contacto con el medio ambiente.

A partir de las características descritas anteriormente, se puede observar que este sistema de calentamiento de agua ocasiona el uso innecesario de agua y energía. Además, genera gastos adicionales para el usuario, ya que

el agua utilizada o requerida en un determinado momento está desligada con los costos que implica obtener el agua caliente.

## **1.2. Justificación**

En la actualidad, debido a la gran ineficiencia que presentan los sistemas de calentamiento convencionales, los usuarios están dispuestos a invertir en soluciones tecnológicas que les permitan satisfacer sus necesidades y requerimientos inmediatos. Más aún, si estas van de la mano con el ahorro de gastos innecesarios respecto al consumo de agua y energía eléctrica.

Por otro lado, en nuestro país, el precio de componentes y circuitos electrónicos ha disminuido considerablemente. Gracias a ello, se puede buscar una óptima solución a los calentadores domésticos de agua que sea de bajo costo y de gran eficiencia.

## **1.3. Estado del Arte**

### **1.3.1. Presentación del Asunto de Estudio**

El gran avance tecnológico a lo largo del tiempo se ha logrado en parte al desarrollo de todas las ingenierías en conjunto. Sin embargo, para tener sistemas tan sofisticados y eficientes, se requiere de un control continuo de los procesos que se realizan. La curiosidad del hombre por controlar las distintas variables de un determinado proceso, se puede remontar desde la antigüedad. Sin embargo, se puede considerar a James Watt el primero en realizar un estudio formal en la materia con el regulador de velocidad centrífugo para la máquina de vapor [20]. Gracias a este y a muchos otros aportes a lo largo de la historia, se ha logrado un gran avance en los sistemas de control, lo cual ha llevado a que un proceso sea muy eficiente, tenga respuestas muy rápidas y, sobretodo, que consuma el mínimo de recursos disponibles.

En la actualidad, existen productos que permiten obtener agua caliente en un grifo de agua sin necesidad de almacenarla y calentarla previamente, como en las termas convencionales. Estos equipos permiten ahorrar

energía, agua y dinero, por lo que están empezando a desplazar a los antiguos sistemas de calentamiento de agua.

En este contexto, interesa resaltar y analizar la importancia de los nuevos sistemas de calefacción de agua, los cuales no solo brindan comodidad, salud y ahorro para el cliente, sino también ofrecen un servicio de alta calidad.

En síntesis, este documento pretende ofrecer un mejor controlador para los sistemas mencionados, tomando como punto de partida el análisis de los productos ya existentes en el mercado nacional e internacional, resaltando los pros y contras de estos y de las tecnologías que emplean. Asimismo, pretende brindar distintas soluciones al problema, con lo cual quedaría pendiente la selección de la mejor de estas de acuerdo a las necesidades y requerimientos del usuario.

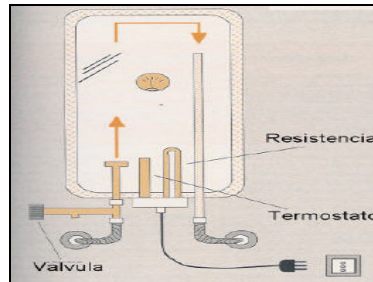
### **1.3.2. Estado de la Investigación**

En la actualidad, existen distintas tecnologías que permiten elevar la temperatura del agua. Por un lado, se tienen los calentadores convencionales, los cuales, por medio de un tanque, permiten calentar una cantidad limitada de agua. Cabe resaltar que el agua caliente se obtiene después de un determinado tiempo, el cual depende de la cantidad almacenada en el tanque. Por otro lado, se tienen los calentadores de agua instantáneos o los calentadores de agua sin terma (tankless water heaters). Estos se caracterizan por aumentar la temperatura del agua conforme esta va circulando por un grifo o tubería y lo hacen de manera casi instantánea (en el orden de segundos). Estos sistemas han sido utilizados ampliamente en Europa y Asia, desde hace muchos años [14].

En ambos casos, el agua recibe energía para poder elevar su temperatura. Entre los diversos métodos para lograr este fenómeno termodinámico, se pueden mencionar los siguientes:

**Calentadores eléctricos:** emplean resistencias eléctricas, las cuales se ponen en contacto con el agua y elevan su temperatura al entregarles calor.

En la figura 1, se puede observar un calentador de almacenamiento por resistencias eléctricas.



**Figura 1.** Calentador de almacenamiento por resistencias eléctricas [32].

**Calentadores por medio de combustible o gas:** usan un gas o un combustible para calentar el agua. Este fluido pasa por un intercambiador de calor donde recibe la energía necesaria para llegar a la temperatura deseada. En la figura 2, se observa un calentador a gas.



**Figura 2.** Figura de un calentador a gas [5].

**Calentadores solares:** usan paneles solares para captar la energía necesaria para calentar el agua que pasa por tuberías y es almacenada en un tanque. En la figura 3, se puede observar un calentador solar.

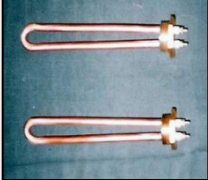



**Figura 3.** Figura de un calentador solar [6].

El modo de calentar el agua por medio de resistencias eléctricas es diverso, debido a que algunos fabricantes, dependiendo del diseño y del uso, ofrecen distintos tipos de resistencias eléctricas.

Es por esto que, el análisis del estado del arte se basa en diversas marcas que brindan distintas formas de trabajar con las resistencias eléctricas y las características que estas poseen. Son fabricadas para todo tipo de potencia y voltaje, siguiendo normas internacionales vigentes, en especial referentes a la corrosión, y optimizando la transferencia de calor. A continuación, en la tabla 1, se puede observar una tabla comparativa de resistencias eléctricas calefactoras.

**Tabla 1.** Resistencias eléctricas calefactoras [4].







				
MARCA				
MODELO	Packet	En cobre	Tubular de Inmersión <b>ACERO INOXIDABLE</b>	Tubular de Inmersión <b>COBRE</b>
CARACTERÍSTICAS	Acero inox 304 en 11.2mm de 63cms de altura en "U" De 12000 kwatts x 220voltios y brida de 2"	Resistencia para termas eléctricas en todo modelo y potencia (para sole, braset, etc.)	Se usa en substancias poco corrosivas. Pueden ser en acero tipo 304 y 316.	Ideal para el calentamiento de agua y soluciones NO Corrosivas al cobre
PRECIO	\$130	\$80	\$150	\$90

Además, en las tablas 2 y 3, se indican algunos de los sensores de temperatura que se encuentran actualmente en el mercado y sus respectivas características.

**Tabla 2.** Sensores de Temperatura 1 [7].

				
MARCA				
MODELO	Bulbo	Tipos variados	Con vaina	Con abrazadera
CARACTERÍSTICAS	Sensor de temperatura especial con bulbo de acero inox y cabezal de aluminio y rosca NPT de 1/2.	Sensores de temperatura en todo tipo tales como: "J", "K", "S", "RTD", "PT100" con los mejores suministros del mercado	Clase de Protección: IP52 para los modelos de inmersión	Clase de Protección: IP30 para los modelos de abrazadera
PRECIO	\$120	\$100-\$140	\$130	\$115

**Tabla 3.** Sensores de Temperatura 2 [15].

			
MARCA			
MODELO	Tipo cable	Pt1000, respuesta rápida	NTC, respuesta rápida

CARACTERÍSTICAS	<p>Vaina de latón de 135 mm G1/2", diámetro interno 7 mm</p> <p>Vaina de acero inoxidable de 135 mm G1/2", diámetro interno 7 mm</p>	<p>Sensor para montaje directo en tubería, conexión G1/2".</p> <p>Para medida de la temperatura del agua, para agua caliente sanitaria, paneles solares, etc.</p>	<p>Sensor para montaje directo en tubería, conexión G1/2"</p> <p>Para medida de la temperatura del agua, para calefacción de distrito o para agua caliente sanitaria.</p>
PRECIO	\$130	\$150	\$155

### 1.3.3. Síntesis sobre el Asunto de Estudio

A pesar de la gran oferta que existe actualmente en el mercado, todavía no se puede encontrar un producto que permita tener un control total de la temperatura deseada, sin importar el flujo que se maneje.

El calentador de flujo variable Pick está diseñado para suministrar agua caliente, a una temperatura controlada con precisión, dentro de un amplio rango del caudal. Se utiliza para asimilar grandes variaciones en la demanda, así como para aplicaciones con arranques y paradas frecuentes, y resulta especialmente apropiado como un sistema de calentamiento central para puntos de utilización múltiples, tales como estaciones de limpieza o desinfección de plantas industriales.

Para que el controlador de flujo variable funcione, se realiza la adición de una bomba de recirculación, la cual proporciona un control preciso de la temperatura cuando se producen variaciones en la demanda. Durante los momentos de poca o media demanda, la bomba mantiene una recirculación adecuada a través del calentador y la sonda del controlador de temperatura para evitar las variaciones de temperatura. Como resultado se obtiene un suministro de agua caliente, a una temperatura controlada con precisión, acorde a la demanda.



Una prueba comparativa entre los calentadores convencionales y una entre los que tienen un control de temperatura de agua, se puede ver en las termas de uso doméstico. Se aprecia una clara diferencia durante su funcionamiento en el calentador de flujo variable Pick, el cual permite trabajar con un amplio rango de flujo a la misma temperatura, aunque su respuesta ante el cambio de flujo no es muy rápida.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo General**

Diseñar e implementar un sistema de control de temperatura del agua, utilizando resistencias eléctricas sometidas a un control difuso que permita la optimización, a nivel del usuario, del uso de agua caliente, reduciendo el consumo innecesario de energía y brindando la cantidad de agua necesaria al usuario.

##### **1.4.2. Objetivos Secundarios**

- Establecer los requerimientos del sistema, entendiendo las necesidades propias de la implementación (usuario final) y de las variables a controlar.
- Comprender los sistemas de control de temperatura, sus elementos, así como las tecnologías existentes para su implementación.
- Diseñar un control difuso con controladores, sensores y actuadores. Además, se desarrollará un prototipo para la implementación del sistema de control de temperatura.
- Validar el funcionamiento del sistema de control de temperatura con procedimientos de simulaciones y pruebas.

## CAPÍTULO 2. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

### 2.1. Modelos Matemáticos y Lógica Difusa

#### 2.1.1. Conceptos Termodinámicos y Transferencia de Calor

##### **CALOR**

Se define como un tipo de energía que puede ser producto de reacciones químicas, reacciones nucleares, disipación electromagnética o por disipación mecánica. El calor puede ser transferido entre objetos por diferentes mecanismos, entre los cuales están la radiación, convección y conducción [29].

##### **CALOR ESPECÍFICO**

Es una propiedad intensiva que se refiere a la capacidad de un cuerpo para almacenar calor. Esta se define como el cociente entre la capacidad calorífica y la masa del objeto. El calor específico del agua es igual a  $4.1840 \text{ J/K} \times g$  [29].

##### **ENERGIA INTERNA**

Depende de la suma de dos energías: la energía cinética interna y la energía potencial interna [29].

##### **TEMPERATURA**

Es una propiedad que poseen los sistemas físicos a nivel macroscópico y cuyo origen es a nivel microscópico, es decir, proviene de la energía promedio por partícula. Está relacionada con la energía interna y la entalpia. Es una propiedad intensiva, ya que no depende del tamaño del sistema [29].

##### **CAPACIDAD CALORIFICA**

Se define como una propiedad extensiva, debido a que su magnitud depende no solo de la sustancia, sino también de la cantidad de materia del

cuerpo o sistema involucrado [12]. Se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

### Ecuación 1. Capacidad Calorífica

$$C = c \cdot m = \frac{Q}{\Delta T}$$

**Dónde:** c = calor específico

m = masa

Q= calor

$\Delta T$  = variación de temperatura

La capacidad calorífica del agua es igual a 1 kcal/kg °C.

### CONDUCCIÓN

Esta se produce por contacto térmico entre dos cuerpos. Debido al contacto directo entre las partículas individuales de los cuerpos que están a diferentes temperaturas, se produce el equilibrio térmico [12].

### CONVECCIÓN

Solo se produce en fluidos, es decir líquidos o gases, ya que la transferencia de calor se da por regiones de volúmenes a distintas temperaturas. El transporte de calor está ligado al movimiento del propio medio [12].

### RADIACIÓN

La radiación térmica es el proceso por el cual se transmite a través de ondas electromagnéticas. Esto implica primero una transformación de energía térmica a radiante y viceversa [12].

### ECUACION DE ENERGIA

Se basa en la primera ley: “La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma” [29]. La ecuación sostiene que la energía suministrada a un sistema es igual al cambio de energía en el sistema más la energía evacuada [29].

## 2.1.2. Conceptos de Electrónica

### LEY DE OHM

Establece que la intensidad de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo [26]. Se puede expresar matemáticamente con la ecuación:

**Ecuación 2.** Ley de Ohm.

$$I = \frac{V}{R}$$

Dónde: I = corriente, V = voltaje, R= resistencia.

### POTENCIA ELÉCTRICA

Es la cantidad de energía eléctrica que se transporta o trabajo que se consume en un determinado intervalo de tiempo [26]. La fórmula que la define es la siguiente:

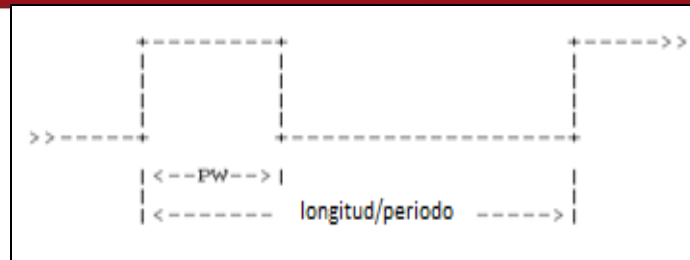
**Ecuación 3.** Potencia Eléctrica

$$P = V \cdot I$$

Dónde: I = corriente, V = voltaje, R= resistencia.

### MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM)

Es una técnica en la cual se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica proveniente de una fuente de energía o de una fuente eléctrica. Se puede usar para transmitir información, como se aprecia en la figura 4, la onda PWM.



**Figura 4.** Onda PWM.

Donde: PW = ciclo de trabajo

Periodo = tiempo de la señal

### 2.1.3. Conceptos de Lógica Difusa

La lógica difusa aplicada a controladores es un concepto usado desde hace muchos años y tiene aplicaciones en productos comerciales como televisores, ollas arroceras, aspiradores, etc., como también en sistemas como elevadores, trenes, carros, etc. [21]. Entre los diversos métodos de procesamiento de fuzzificación, se tienen el de Mandami y el de Sugeno.

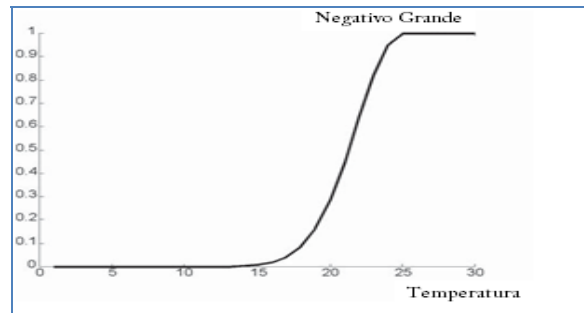
El método de Mandami consiste en la elaboración de condiciones o reglas relacionadas con el proceso a controlar. Estas se evalúan por medio de un mecanismo de inferencia [21]. Este método consta de cuatro partes o módulos: Fuzzificación, Reglas Difusas, Mecanismo de Inferencia y Defuzzificación [10].

La fuzzificación es el proceso por el cual se modifican las variables de entrada para que puedan ser interpretadas y comparadas por los siguientes bloques o módulos. Este proceso se realiza por medio de las variables lingüísticas [31]. Una variable lingüística comúnmente es una palabra que determina el rango de pertenencia de una determinada variable dentro de un universo discreto o continuo [22]. La relación que existe entre estas se da por medio de una función matemática llamada función de pertenencia, cuyo rango se encuentra entre 0 y 1 [10]. Por ejemplo:

Variable lingüística: Negativo Grande

Función Matemática:  $A(x)$

La figura 5, muestra la función de pertenencia de  $A(x)$  de la variable lingüística negativo grande.



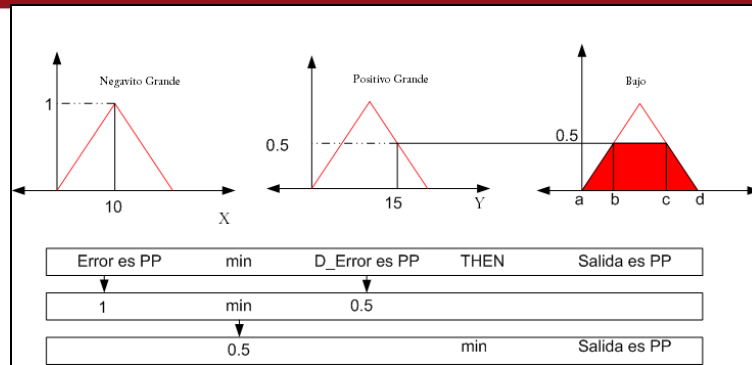
**Figura 5.** Gráfica de la función de pertenencia.

Las reglas difusas y el mecanismo de inferencia van de la mano. Las reglas difusas normalmente tiene la siguiente estructura [21]:

**IF X = Negativo Grande THEN Y = Bajo.**

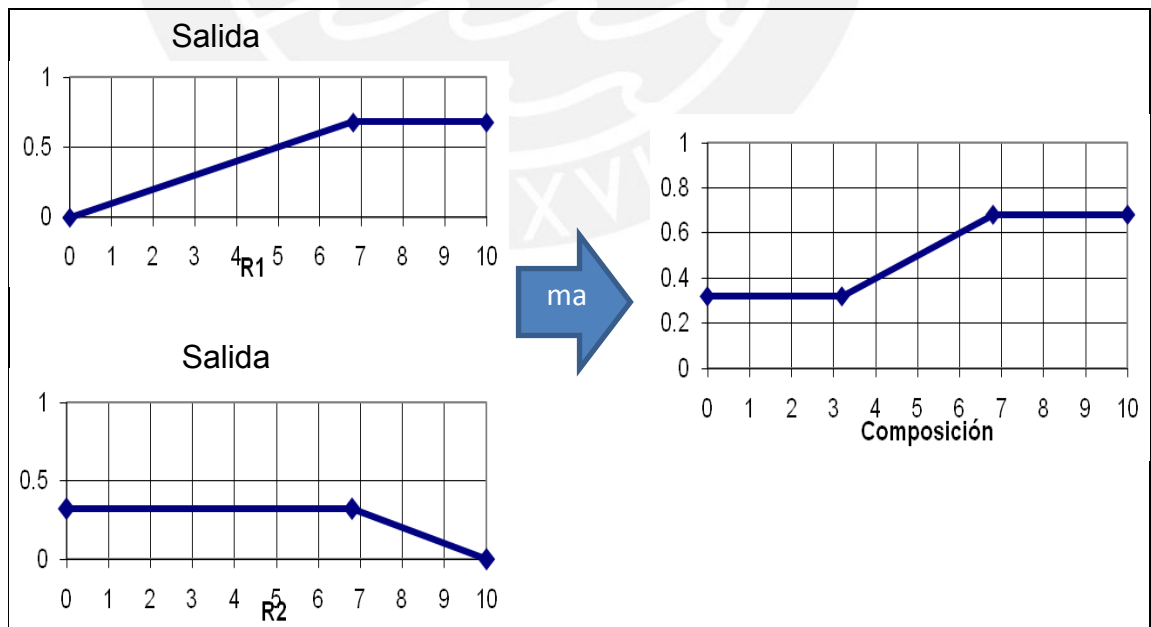
El antecedente de la regla es la parte “**IF X = Negativo Grande...**” y el consecuente de la regla es “**...THEN Y = Bajo**”.

El mecanismo de inferencia determina la manera cómo se evalúan las reglas y el método o funciones utilizadas para hallar la respuesta [10]. Para la evaluación de los antecedentes, se puede tomar como ejemplo la regla “**IF X = Negativo Grande and Y = Positivo Grande THEN Z = Bajo**”. La función “AND” puede ser reemplazada por “MIN” que simboliza el valor mínimo entre dos números. Entonces, la regla señala que se debe hallar el valor mínimo entre el valor de “X” reemplazado en la función Negativo Grande y el valor “Y” reemplazado en la función Positivo Grande. Una vez hallado este valor, para hallar la solución a la regla, se vuelve a aplicar la función “MIN” entre el resultado del antecedente y la función de salida que indica la regla. La figura 6 ilustra lo explicado:



**Figura 6.** Gráfica de evaluación de reglas.

Para obtener la respuesta del sistema, el mecanismo de inferencia determina cuáles de las reglas se han activado. Esto lo hace por medio del antecedente de la regla. Si el valor del antecedente es diferente de cero (esto quiere decir que los valores de las variables analizadas están dentro del rango de las funciones de pertenencia asignadas en la regla), entonces esas reglas serán activadas. Una vez halladas todas las reglas activas, se aplica el método de composición por medio de la función “Max”. Esta halla el valor máximo en todo el rango de salida de las funciones activas. Por ejemplo, en el caso de que se activaron dos reglas y dentro de un rango de salida de 0 a 10. La figura 7 ilustra el método de composición:



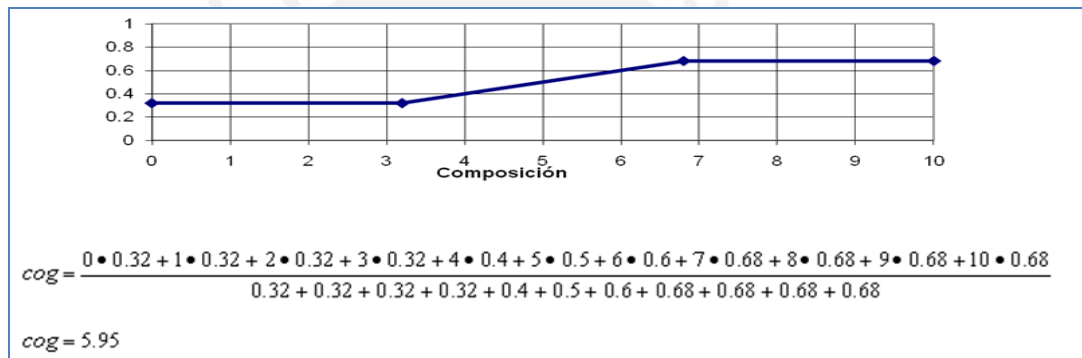
**Figura 7.** Método de composición.

Por último, una vez hallado este resultado, se procede al módulo de defuzzificación. Este se encarga de transformar la conclusión de las reglas en el valor de entrada a la planta. Para esto, existen varios métodos de defuzzificación, entre los cuales se tienen el de centro de gravedad o área, el centro de área máxima, el método de altura, entre otros. El método de centro de gravedad o área se realiza por medio de la siguiente fórmula:

**Ecuación 4.** Centro de gravedad

$$cog = \frac{\sum_{i=0}^n \mu(Z)_i \cdot Z_i}{\sum_{i=0}^n \mu(Z)_i}$$

La forma de operar de esta fórmula se aprecia en la figura 8:



**Figura 8.** Fórmula del método de defuzzificación.

## 2.2. Sistemas Eléctricos y de Potencia

### 2.2.1. Sistema de Potencia

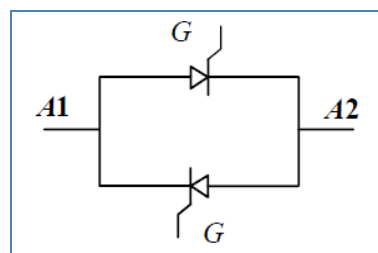
Existen diferentes dispositivos de electrónica de potencia, los cuales se mencionan a continuación:

- Dispositivos no controlados: en este grupo se encuentran los diodos. Los estados de conducción o cierre (ON) y bloqueo o abertura (OFF) dependen del circuito de potencia. Por lo tanto, estos dispositivos no disponen de ningún terminal de control externo [28].



- Dispositivos semicontrolados: en este grupo se encuentran, dentro de la familia de los Tiristores, los SCR (“Silicon Controlled Rectifier”) y los TRIAC (“Triode of Alternating Current”). En este caso, su puesta en conducción (paso de OFF a ON) se debe a una señal de control externa que se aplica en uno de los terminales del dispositivo, comúnmente denominado puerta. Por el contrario, su bloqueo (paso de ON a OFF) lo determina el propio circuito de potencia. Es decir, se tiene control externo de la puesta en conducción, pero no así del bloqueo del dispositivo [28].
- Dispositivos totalmente controlados: en este grupo encontramos los transistores bipolares BJT (“Bipolar Junction Transistor”), los transistores de efecto de campo MOSFET (“Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor”), los transistores bipolares de puerta aislada IGBT (“Insulated Gate Bipolar Transistor”) y los tiristores GTO (“Gate Turn-Off Thyristor”), entre otros [28].

Para la implementación, se usará un TRIAC, el cual permite el paso de corriente del terminal A1 al A2 y viceversa, y puede ser disparado con tensiones de puerta de ambos signos. Cuando se trabaja con corriente alterna, es interesante poder controlar los dos sentidos de circulación de la corriente. Evidentemente, con un SCR, sólo podemos controlar el paso de corriente en un sentido. Por lo tanto, uno de los motivos por el cual los fabricantes de semiconductores han diseñado el TRIAC ha sido para evitar este inconveniente. Simplificando su funcionamiento, se puede decir que un TRIAC se comporta como dos SCR en antiparalelo (tiristor bidireccional). De esta forma, se tiene control en ambos sentidos de la circulación de corriente. La figura 9, muestra el esquema equivalente de un TRIAC [28].



**Figura 9.** Esquema equivalente de un TRIAC.

### 2.2.2. Dispositivos de Electrónica de Potencia

En el circuito de potencia se usará un TRIAC BTA40600B, el cual será disparado por el MOC 3041. En este caso, por las especificaciones del MOC 3041, deberá circular por el diodo una corriente mínima IFT de 15 mA [16].

A continuación, se muestra la figura 10, la cual permite relacionar el ángulo de disparo con el voltaje que le será entregado a las resistencias, para que estas puedan ser activadas dependiendo de la temperatura que se necesite.

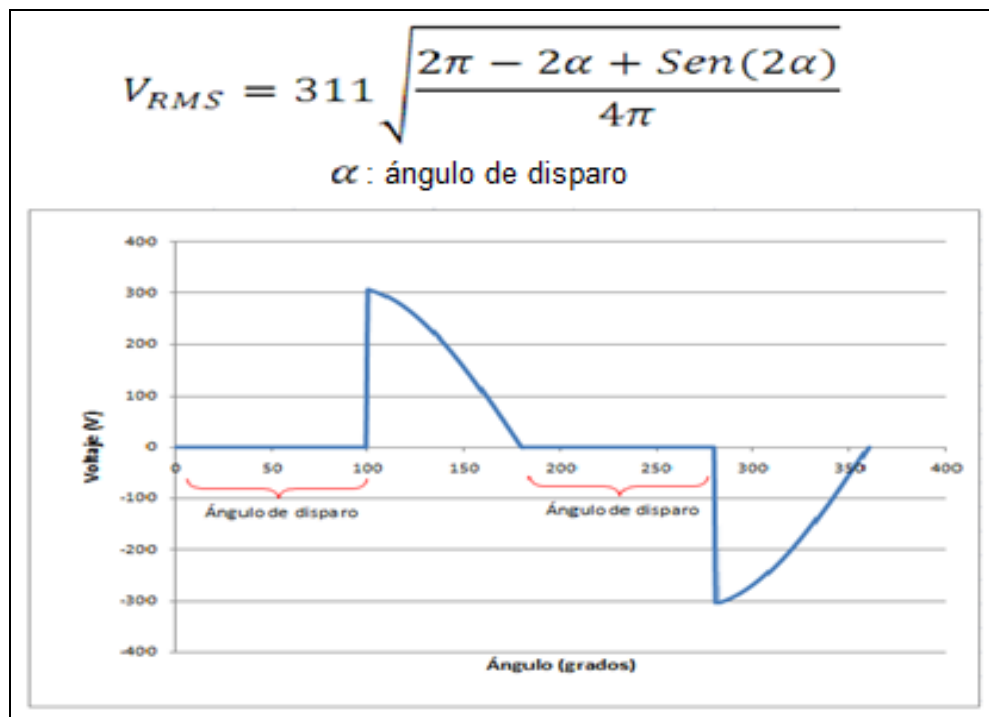
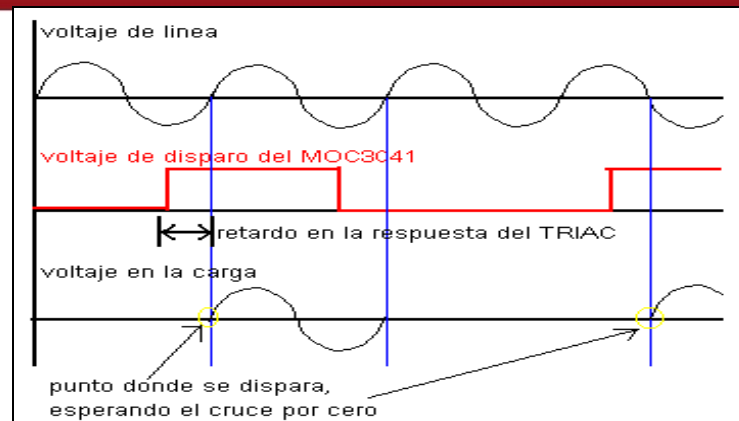


Figura 10. Gráfica de la respuesta del TRIAC.

### 2.2.3. Circuito Detector de Cruce por Cero

Trata de eliminar los armónicos que se producen al activar la señal de la carga, es decir, cuando hay un retardo de disparo fuera de fase con la señal de la línea, lo que produce la generación de armónicos para compensar la forma de onda [16] como se muestra en la figura 11.



**Figura 11.** Gráfica de detector de cruce por cero.

#### 2.2.4. Sensores de Temperatura

Existen varios dispositivos para sensar la temperatura. Todos ellos poseen características tales como sensibilidad, linealidad, costo y compatibilidad con sistemas digitales.

Los dispositivos más antiguos, como el termómetro bimetálico, no poseen una interfaz con un sistema digital y sería complicado elaborar alguna. Además, algunos de sus parámetros no varían con la temperatura, sino que a cierta temperatura pueden abrir o cerrar algún circuito. Se puede decir que estos dispositivos no tienen un comportamiento lineal con la variación de la temperatura.

En el mercado existen diferentes tipos de sensores: la resistencia metálica, el circuito integrado transductor y el RTD. Este último es el más conveniente por el tipo de implementación que se está realizando, ya que se puede sumergir este dispositivo en el agua a diferencia de los otros.

Por costo, se ha decidido usar el diodo 1N4148 que ofrece una baja inercia térmica, trabaja en una curva casi lineal en el rango de temperaturas deseadas (15 °C a 45 °C), es de bajo costo y de respuesta rápida, ya que se encuentra en contacto directo con el sistema. Por último, transformar los valores en mV que dará el diodo 1N4148 conforme varía la temperatura a señales de voltaje se puede hacer empleando un amplificador de ganancia variable con realimentación negativa y voltaje de offset ajustable. Luego, bastará con usar un convertidor A/D.

### **2.3. Controlador de Temperatura**

Los controladores de temperatura que existen en la actualidad pueden estar configurados con técnicas de control clásico y en algunos casos con técnicas de control moderno.

Las técnicas de control clásico abarcan los controladores ON/OFF y los PID. El control ON /OFF consiste en mantener el sistema funcionando hasta que se alcance el valor deseado. Una vez alcanzado este valor, se apaga el sistema y se vuelve a encender si es que el valor deseado vuelve a modificarse [20].

Los controladores PID, se utilizan para sistemas donde es necesario un control continuo. Esto quiere decir que son usados para variar el desempeño de un dispositivo entre un 0 % y 100 %. Cabe resaltar que el diseño de estos controladores va de la mano con un análisis matemático, que para algunos casos puede ser muy complejo y profundo [20].

Por otra parte, entre las técnicas de control moderno, están las redes neuronales y la lógica difusa. La primera está orientada a sistemas de aprendizaje, ya que después de ingresarle una cantidad de parámetros iniciales, los identifica, acepta, aprende y responde dependiendo del medio o perturbaciones existentes para mantener el sistema estable [17]. La segunda, la lógica difusa, ofrece una solución muy versátil y fácil de configurar y diseñar, debido a que su modelamiento puede estar basado en el conocimiento o experiencia previa sobre la planta a controlar. Además, como las redes neuronales, su respuesta a cambios y perturbaciones no consideradas previamente en sus parámetros iniciales es mucho más rápida y estable en comparación con las técnicas de control clásico [18].

De las técnicas mencionadas anteriormente, se encontró más adecuada la lógica difusa, debido a su fácil diseño e implementación. Además, se tomó en cuenta la ventaja que presenta este sistema de control ante procesos cambiantes. Esto es de gran ayuda, debido a que los sistemas termodinámicos suelen presentar cambios y perturbaciones que no son

tomados en cuenta en sus parámetros iniciales o que suelen ser difíciles de modelar.

#### **2.4. Criterios de Eficiencia y Seguridad**

Para lograr el ahorro tanto de energía eléctrica y de agua, se deben tomar en cuenta los siguientes criterios:

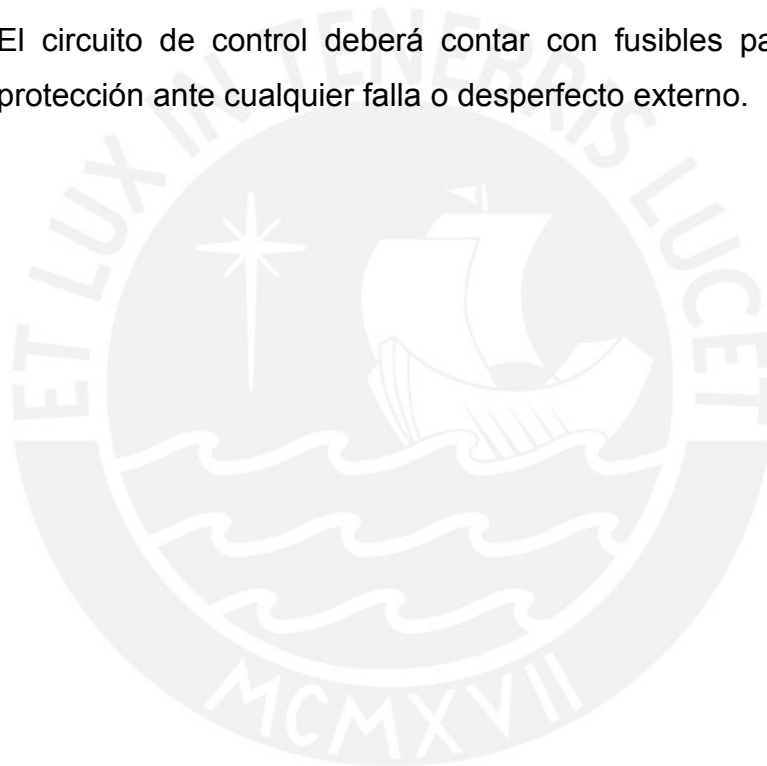
- El consumo de corriente del calentador de agua no deberá exceder los 30 Amperios, ya que, en ese caso, se tendría que cambiar el contrato de energía eléctrica y los respectivos interruptores de seguridad. En consecuencia, la potencia máxima de consumo del sistema no deberá exceder los 6 kW.
- El caudal de agua en la toma de duchas se encuentra entre 3 a 10 litros por minutos, dependiendo del tipo de cabezal. El sistema deberá poder manejar este tipo de caudal.
- El tiempo de calentamiento no deberá exceder los 30 minutos y tampoco podrá ser instantáneo (tiempo = 1 segundo) ya que el sistema consumiría grandes cantidades de potencia eléctrica.
- El sistema deberá calentar la cantidad de agua que el usuario requiera para evitar el calentamiento de cantidades de agua innecesarias.
- No se deberá de instalar un sistema de tubería de “agua caliente”, se Usará únicamente el existente de “agua fría” en el hogar.

Para los criterios relacionados con la seguridad del usuario, se deberá tomar en cuenta lo siguiente:

- La temperatura de salida del agua debe estar entre los 18 y 45 °C. La exposición del usuario al agua a una temperatura entre los 38 y 43 °C no debe ser mayor de 5 minutos, ya que puede causar daño de fatiga muscular o sequedad de la piel. También, se debe tomar en cuenta que, para temperaturas menores a 23 °C, la exposición al agua debe

ser de corta duración, si no puede causar entumecimiento muscular [8].

- La exposición a temperaturas entre los 25 y 38 °C es recomendable para relajamiento y puede durar entre 10 a 20 minutos [24].
- El sistema deberá poseer un circuito de seguridad que se activará si el consumo de corriente es mayor a 30 Amperios. Esto evitará que se activen los interruptores del hogar.
- El circuito de control deberá contar con fusibles para asegurar su protección ante cualquier falla o desperfecto externo.

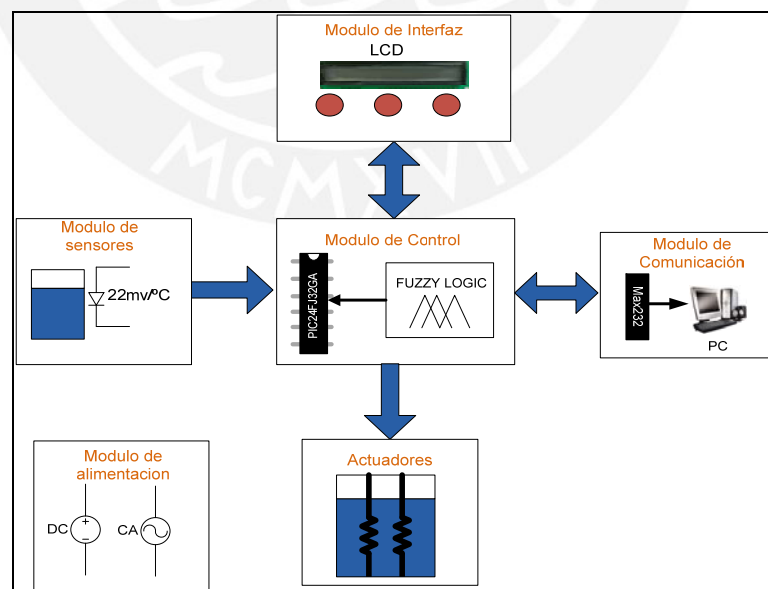


## CAPÍTULO 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

### 3.1. Introducción a la Solución

El sistema propuesto pretende controlar el calentamiento del agua por medio de actuadores, sensores y una técnica de control difusa. Todos serán implementados con circuitos y componentes electrónicos del mercado peruano. Su uso está orientado principalmente al ámbito doméstico.

La solución consiste en el diseño de un sistema que permita calentar el agua por medio de resistencias eléctricas y sensar el valor de su temperatura mediante un semiconductor de bajo costo. Estos dispositivos estarán conectados a un módulo de control que se encargará de controlar todo el sistema en conjunto. A continuación, en la figura 12, se muestra el diagrama propuesto.



**Figura 12.** Diagrama del sistema propuesto.

El módulo que gobierna todo el sistema es el módulo de control, el cual está conformado principalmente por un microcontrolador. Este obtiene información de la planta por medio del módulo de sensores. Con esta información y los parámetros ingresados por un usuario a través del módulo de interfaz es como se define el modo de operación de los actuadores. El módulo de comunicación también permite enviar y recibir información de la planta; sin embargo, su uso está orientado principalmente a obtener gráficas que permitan estudiar y configurar el controlador de manera más óptima. Por último, se tiene el módulo de alimentación que suministra la energía adecuada a todos los módulos para su funcionamiento.

La temperatura es la variable de realimentación del sistema. Esta se muestrea por medio del diodo 1N4148, el cual tendrá una cubierta de resina para poder sumergirse dentro del agua. Para este caso, solo se usará un diodo debido a que la temperatura es la única variable involucrada en el proceso.

Para calentar el agua, se usaran resistencias eléctricas sumergibles. El sistema tiene la capacidad de controlar hasta dos resistencias. Estas se encuentran dentro del módulo de actuadores.

El ingreso de datos se puede hacer por medio de los potenciómetros o pulsadores ubicados en el módulo de interfaz. Este módulo permite variar la temperatura deseada o Set Point y se puede visualizar el valor actual de la temperatura en el LCD.

El módulo de comunicación también permite ingresar datos al controlador, como la temperatura deseada. Además, puede graficar el valor de la temperatura versus el tiempo. Con esta información, el usuario puede analizar el comportamiento del controlador, así como realizar modificaciones que permitan optimizar su funcionamiento.

El módulo de alimentación es el encargado de alimentar a todos los circuitos que componen el sistema. Este entrega valores de voltaje de 3.3, 5 y 12 Voltios para alimentar el microcontrolador y los demás integrados respectivamente.



## 3.2. Diseño del Circuito de Acondicionamiento de los Sensores

### 3.2.1. Sensor de Temperatura

El sensor de temperatura a usar es un diodo 1N4148 porque opera en el rango de 15 a 50 °C (ver anexos), con una curva de aproximación lineal para el rango de temperatura en el que vamos a trabajar. Este tiene una respuesta lineal a la variación de la temperatura para el rango de 15 a 45 °C, que es el rango de interés. Si bien es cierto que un RTD de platino o de níquel posee una buena variación de resistividad con la variación de la temperatura, es más costoso que el de cobre y su respuesta, debido a la transferencia de calor, es mucho más lenta. Se decidió usar el diodo 1N4148 como sensor de temperatura, ya que se necesita un control óptimo para llegar a la temperatura deseada en el menor tiempo de establecimiento posible. Esto es lo que permite el diodo 1N4148, ya que es muy sensible al cambio de cada grado en la temperatura y la transferencia de calor es inmediata, ya que se encuentra en contacto directo con el sistema, lo que permite obtener el menor tiempo de establecimiento posible, que es uno de los problemas más grandes del sistema. En la tabla 4, se muestra la comparación.

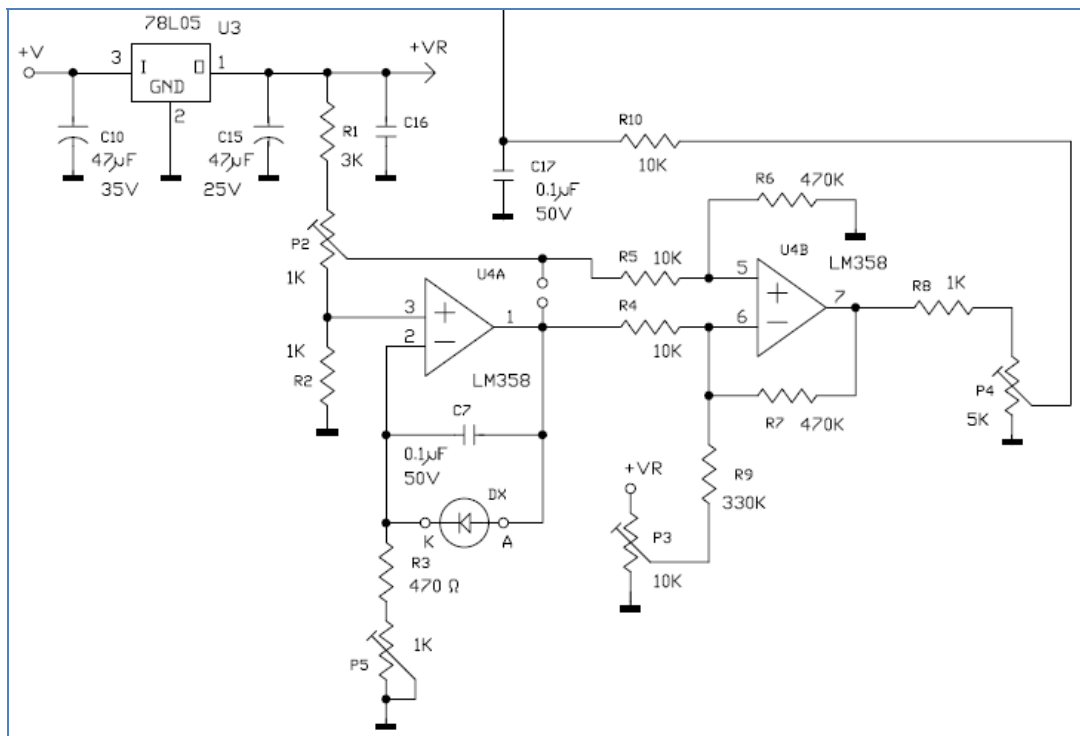
Sensor	Temperatura	Tiempo de respuesta	Costo (soles)
Diodo 1N4148	15°C – 50°C	máx 2 seg	0.2
RTD	Hasta 300°C	10 seg	35
Pt100	-100°C a 500°C	4 a 6 seg	210

**Tabla 4.** Tabla comparativa de sensores de temperatura comerciales

Debido a la naturaleza del trabajo que se realizará con este sensor, interesa su respuesta para temperaturas entre los 15 y 45 °C [8], que es el rango en el que las personas normalmente utilizan el agua, por lo tanto los límites superior e inferior serán estos, respectivamente.

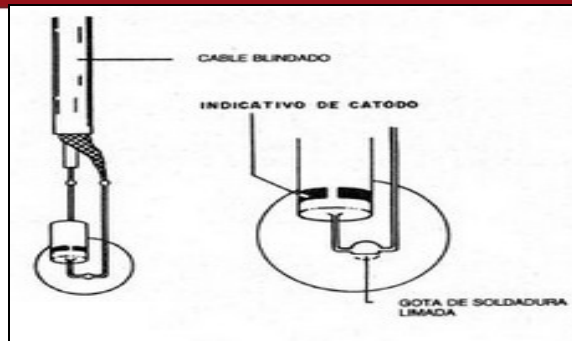
Para acoplar el sensor de temperatura, en este caso un diodo, con el microcontrolador, se usarán dos amplificadores operacionales [5], los cuales permitirán variar la ganancia dependiendo de la configuración con la se trabaje. El primer amplificador operacional tiene una configuración que le

permite trabajar como fuente de corriente [23], servirá para poder ajustar a la temperatura deseada, para 0 °C sea 0 V. Así, se tendrá al sistema controlado. El segundo amplificador operacional en configuración no inversor, lo cual nos permite tener una ganancia mayor a uno [2], la ganancia para nuestro diseño es igual a 30, ya que la variación por cada grado Celsius es de 2,2 mV, considerando un rango de temperaturas entre 15 y 45 °C. En la Figura 13, se muestra el esquemático del circuito del sensor de temperatura.



**Figura 13.** Circuito de acondicionamiento de sensores.

El acoplamiento del diodo 1N4148 con el sistema, como se muestra en la Figura 14, consiste en un blindado total de sus pines para no afectar la lectura del sensor, donde el diodo estará en contacto directo con el sistema, lo cual permitirá una mejor respuesta en tiempo del sistema.



**Figura 14.** Diodo Blindado.

El sensor de temperatura, el diodo, estará conectado a la salida del calentador y sujeto al contacto físico con este, para evitar errores de lectura generados por la temperatura fuera del sistema. El acoplamiento del diodo 1N4148 con el circuito de acondicionamiento, que lo integra con el microcontrolador, se hará mediante un cable blindado para evitar que entre en contacto con el agua.

### **3.3. Diseño del Circuito de Control de Potencia**

#### **3.3.1. El Calentador**

El calentador en el sistema propuesto será una terma eléctrica de paso que funciona con 220 VAC, ya que una terma solar necesita de un panel solar y baterías para poder almacenar la energía. Además, se elige este tipo de terma porque no necesita almacenar el agua para calentarla, sino que calienta el agua como sea el consumo. Por esta razón, calienta más rápido que las termas convencionales, que poseen un tanque de almacenamiento.

Para poder seleccionar la terma de paso necesaria para el sistema, se tiene que tener en cuenta la cantidad de agua que circula en promedio por las cañerías convencionales que se tienen en un domicilio, que en este caso es de 1000 litros aproximadamente [4]; y el tiempo en que se quiere pasar de una temperatura a otra, es decir, la cantidad de calor que puede entregar la terma.

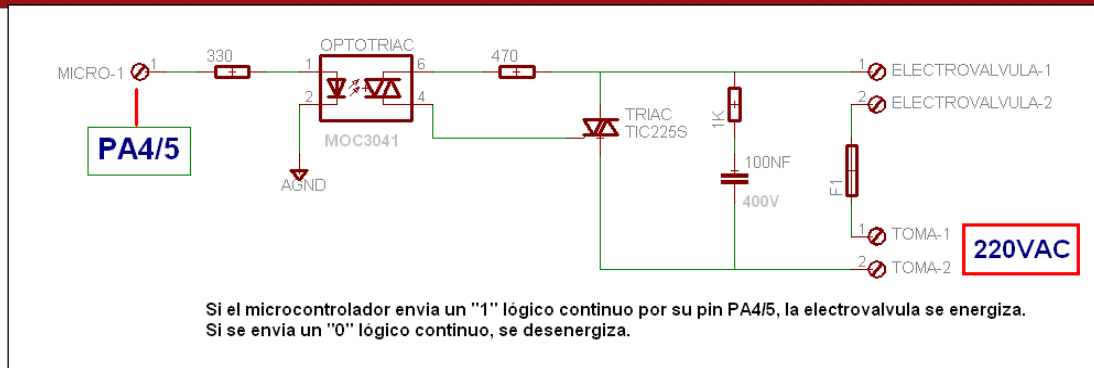
### **3.3.2. Control de Actuadores**

Para controlar el actuador calentador, bastará contar con dos resistencias eléctricas que serán controladas por el microcontrolador, el cual las encenderá o apagará dependiendo de la lógica de control.

Para poder seleccionar las resistencias eléctricas se tuvo que tomar en cuenta la tensión eléctrica con la que operaran, la potencia máxima y la temperatura a la que se desea llegar con las condiciones establecidas para el sistema.

Las resistencias eléctricas serán controladas por la corriente que se les entregará para llegar a la temperatura deseada por el sistema. Entonces, cuando sean energizadas, comenzarán a calentar. Estas operarán con 220 VAC, ya que se dispone de esta tensión y, además, los dispositivos que operan con este nivel de tensión son más económicos. El caudal del sistema, cuando se activen las resistencias, será un caudal constante aproximadamente de 2 a 5 L/min [12]. Entonces, se sabe que el diámetro de la tubería es de  $\frac{1}{2}$ ", se espera una presión de  $3.0294 \times 10^{-2}$  Pa [12]. Luego, se conoce que las resistencias eléctricas, las cuales se encuentran dentro de la terma, consumen una corriente máxima de 30 A [27]. Además, se tiene que considerar que el sistema tendrá que soportar potencia 4.5KW promedio, una corriente de 20A a 25A promedio y temperatura máxima de 45 °C a la salida y a la entrada, agua a temperatura ambiente [9].

Para que el microcontrolador controle a las resistencias eléctricas, cada una tendrá una interfaz de potencia, como la que se muestra en la Figura 15. Esta unirá la etapa de potencia con la de baja potencia usando un optotriac MOC3041 (ver anexos). Esto se hace con el fin de aislar la parte de baja potencia de la de alta potencia. Además, la interfaz de potencia estará implementada, junto con otros componentes, con un BTA40600, el cual, puede soportar hasta 40 Amperios de corriente en alterna (ver anexos), por lo tanto, es más que suficiente para el uso que se requiere.



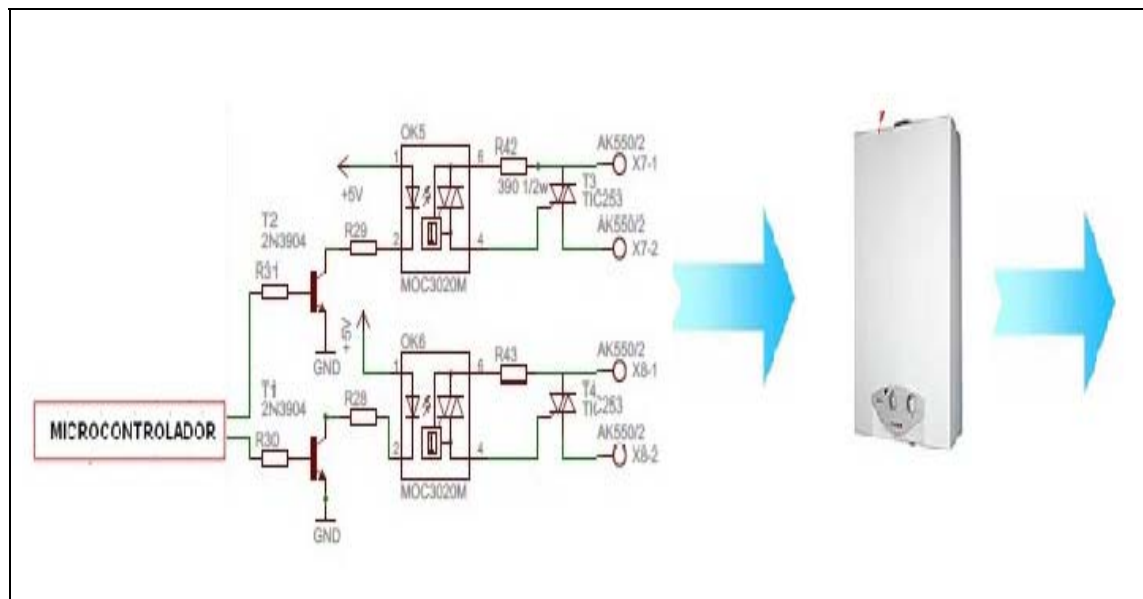
**Figura 15.** Circuito de mando para la resistencia.

El pin de salida del microcontrolador está conectado a una resistencia de 220  $\Omega$ , la cual a su vez está conectada con el diodo emisor del optotriac, el cual tiene su cátodo conectado a la referencia, 0 VDC. El valor de la resistencia asegura una corriente de 15 mA en el diodo emisor, suficiente para poder excitar el optoacoplador y, en el optotriac, una resistencia de 330  $\Omega$ , 1/2 W, asegura el correcto funcionamiento del TRIAC. Cuando el optotriac permite el paso de corriente en un sentido, este se refleja en el TRIAC de potencia. El circuito RC conectado en paralelo con el TRIAC de potencia sirve para limitar la velocidad de crecimiento de la tensión ante cargas inductivas. El fusible para las resistencias eléctricas de potencia es de 1A. A continuación en la tabla 5, se observa el cuadro comparativo de las dos opciones consideradas para nuestro diseño.

	TRIAC	MOSFET
Precio	S/. 4	S/. 54
Voltaje	400V	400V
Corriente	60A	50A
Composición	robusta	sensible

**Tabla 5.** Tabla comparativa dispositivos de potencia en el mercado.

En la Figura 16, se puede observar el circuito de mando para el calentador.



**Figura 16.** Circuito de mando para el calentador.

### 3.3.3. Módulo de Alimentación

Este módulo es el encargado de entregar los diferentes voltajes DC hacia los otros módulos del sistema. Las tensiones AC para los actuadores, contactores, fusibles y resistencias serán tomadas directamente de una toma de 220 VAC externa al circuito del sistema.

Para obtener la tensión que alimentará a los diversos módulos, se hará uso de transformadores, ya que hay circuitos de baja potencia y digitales en el sistema, no se quiere que algún desperfecto en la red eléctrica (como picos de voltaje muy pronunciados) los dañe. Esto puede ocurrir, ya que en un domicilio pueden operar cargas, cuya activación genera distorsión en la tensión de línea. Si bien se podría sobrellevar los desperfectos de la línea con aparatos de protección y regulación, pueden resultar costosos dependiendo del tipo de problema eléctrico a resolver.

Las tensiones de 5 VDC y 3.3 VDC se pueden obtener haciendo uso del regulador L7805 y el LM317 (ver anexos).

Alimentación	Componentes alimentados
3.3 V	Microcontrolador (potenciómetros y pulsadores conectados a este), circuito de cruce por cero
5 V	Max232, LCD Divisores resistivos
12 V	TRIAC , OPAMP

**Tabla 6.** Tabla de voltaje de alimentación por componentes.

La alimentación general se obtendrá directamente de una toma de 220 VAC +/- 2%, a la cual el transformador estará conectado y de este se podrá obtener la señal rectificada a 12 VDC. Mediante reguladores de voltaje, se obtendrán los voltajes 5 VDC y 3.3 VDC, los cuales servirán de alimentación para los distintos módulos.

### 3.4. Diseño e Implementación del Controlador Difuso

#### 3.4.1. Controlador Difuso

El control usado para el sistema propuesto se basa en lógica difusa. Las ventajas más significativas entre usar un controlador difuso y uno convencional se pueden apreciar en la Tabla 7

**Tabla 7.** Cuadro comparativo de controlador difuso vs uno clásico [18].

Limitaciones de controladores Clásicos	Beneficios de Lógica Difusa
Planta con modelos no lineales: Los modelos lineales del proceso bajo control son muy restrictivos. Modelos no lineales exigen mayor nivel de computacionales y presentan problemas de estabilidad.	Controladores difusos son más robustos que los controladores PID, ya que pueden cubrir un rango de operación más amplio, pueden trabajar con la presencia de ruido y perturbaciones de todo tipo.
Incertidumbre del proceso a controlar: las plantas o procesos a controlar no tiene modelos precisos debido a la falta de conocimiento sobre esta.	Implementar un controlador difuso es más barato que implementar un controlador basado en un modelo matemático.

Restricciones con sistemas multivariables, multizalos y con el entorno: la gran cantidad de variables y lazos presentan restricciones y dependencias complejas.	Los controladores difusos son de fácil configuración, ya que al usar reglas difusas usan la lógica de un operador humano y pueden ser expresadas en términos lingüísticos.
Incertidumbre en mediciones: No existen modelos estocásticos de "ruido" para contrarrestar la incertidumbre en mediciones.	Son fáciles de aprender, configurar y aplicar.
Comportamiento temporal: Las plantas, controladores y los entornos presentan cambios en el tiempo. Más aun los retardos son difíciles de modelar.	

Debido a que la temperatura de entrada de agua puede verse afectada por la temperatura ambiente (conducción de calor por convección y radiación [26]) y el flujo de agua no es siempre constante (puede disminuir o aumentar si es que se abre en otra terminal del hogar), es necesario un controlador que sea más robusto a perturbaciones y ruidos de toda naturaleza. Por otra parte, se busca un controlador fácil de comprender, configurar e implementar para reducir el costo de diseño y horas hombres involucradas.

Tomando como base el sistema de control propuesto, se eligió el diseño de un controlador difuso del tipo proporcional-integral, el cual tiene como variables de entrada al Error y a la variación del Error. La Tabla 8 muestra una breve comparación entre los controlador P, PI y PD.

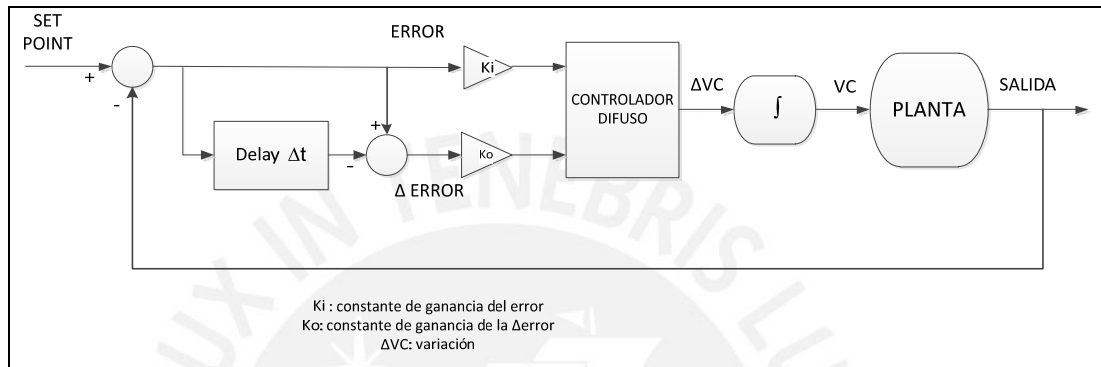
	Tiempo de subida	Sobre impulso	Estado Estable
<b>P</b>	rápido	incrementa	oscilatorio (tiende a ser inestable)
<b>PI</b>	lento	disminuye	estable
<b>PD</b>	rápido	incrementa	oscilatorio (tiende a ser inestable)

**Tabla 8.** Comparación entre controladores P, PI y PD.[30]

Para el sistema propuesto se requiere que el valor de la temperatura no sea alcanzado instantáneamente (tiempo de subida > 2 segundos), el valor de esta variable se mantenga en el tiempo (variable error en estado estable

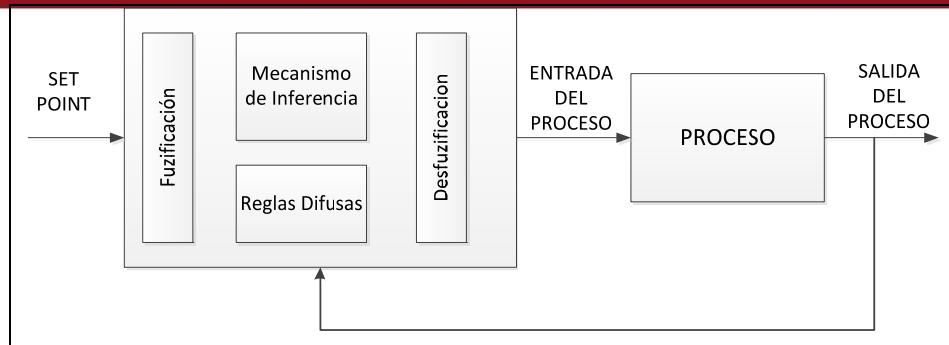


tienda a cero), y no presente un sobre impulso de gran magnitud (no oscilatorio). A pesar de que el controlador PI presenta un tiempo de subida no muy rápido en comparación a los otros dos tipos de controladores, cumple con las otras dos condiciones necesarias para el sistema propuesto. Más aun, al no ser necesario que el agua se caliente instantáneamente el tiempo de subida no debe ser de rápida acción. La Figura 17 muestra el diagrama de bloques del controlador difuso implementado.



**Figura 17.** Controlador Proporcional-Integral difuso.

En el diagrama mostrado se tiene como entradas al controlador difuso las variables Error y la variación del Error (la cual se calcula restando el error actual con el error en un tiempo “t” anterior). Ambas variables de entrada son multiplicadas por una ganancia “k” antes de ser leídas por el controlador. El controlador difuso luego de leer y procesar las entradas genera una señal que representa un cambio (un incremento o decremento) de la variable de salida en un determinado instante de tiempo. Por esta razón en el diagrama considera una integral después de la salida del controlador, que representa la sumatoria del valor anterior más el nuevo valor de cambio, el cual puede aumentar o disminuir el valor de entrada a la planta en ese instante de tiempo. El controlador difuso consta de cuatro etapas, como se observa a continuación en la Figura 18.



**Figura 18.** Esquema del controlador difuso.

La figura 18, muestra la arquitectura básica de un controlador difuso según el método de Mandami, el cual es el más básico y sencillo de. Este se debe principalmente a que:

- La etapa de fuzzificación puede modelarse con ecuaciones matemáticas conocidas: rectas, exponenciales, cuadráticas [31] (Ver Tabla 4: Funciones de pertenencia).
- El mecanismo de inferencia trabaja con reglas del tipo: IF “A” and “B” THEN “C” las cuales son fáciles de entender y programar en los lenguajes de programación assembly y C [21].
- Los conectores AND, OR y THEN, usados para la interpretación de las reglas difusas, pueden resolverse con las operaciones MIN y MAX las cuales se pueden programar en un microcontrolador por medio de sumas y restas lógicas (ver punto 3.4.3) [21].
- Los métodos de desfuzzificación pueden modelarse con ecuación matemáticas conocidas como: centro de gravedad, centro de gravedad del área más grande, primer valor máximo, valor medio máximo o media del valor máximo [21].

La primera etapa de la figura 18 es la de fuzzificación, la cual modifica las variables de entrada para que puedan ser interpretadas y utilizadas por las otras etapas del controlador. La segunda etapa consiste en el mecanismo de inferencia el cual se encarga de evaluar las reglas difusas del sistema para determinar la salida del controlador en un determinado instante de tiempo.

La tercera etapa consta de las reglas difusas, las cuales contienen información sobre el proceso a controlar. Por último, se tiene la etapa de defuzzificación encargada de convertir la salida del mecanismo de inferencia en la entrada de la planta [21].

El controlador se implementará en un microcontrolador que pueda manejar este tipo de mecanismo y su programación se realizara en lenguaje Assembly.

### 3.4.2. Descripción del Microcontrolador

Para el sistema propuesto, el microcontrolador deberá manejar y conectarse a un sensor de temperatura, un visualizador LCD, potenciómetros y pulsadores, enviar datos por medio de un módulo de comunicación asíncrono y controlar dos resistencias.

Para la visualización del valor de la temperatura deseada y actual se selección un LCD de 16x2 el cual usa dos pines de control y 4 de comunicación. El usuario elegirá el valor de la temperatura deseada por medio de un potenciómetro el cual estará conectado al pin de entrada de un ADC. Para realizar pruebas y muestreo de la variable a controlar, se usaran los 2 pines de comunicación serial (Tx y Rx) del microcontrolador. El sistema de sensado tiene como salida una señal analógica la cual cambia 2.2mv por cada grado centígrado. Para poder ser interpretada se conectara al módulo analógica/digital (ADC) del microcontrolador cuyo valor de LSB o resolución debe ser menor o igual a 70mv/°C (ver capítulo 4.1.1). Por otra parte, las resistencias eléctricas se controlan por medio de una señal manipulada por ancho de pulso la cual se envía a los optocopladores.

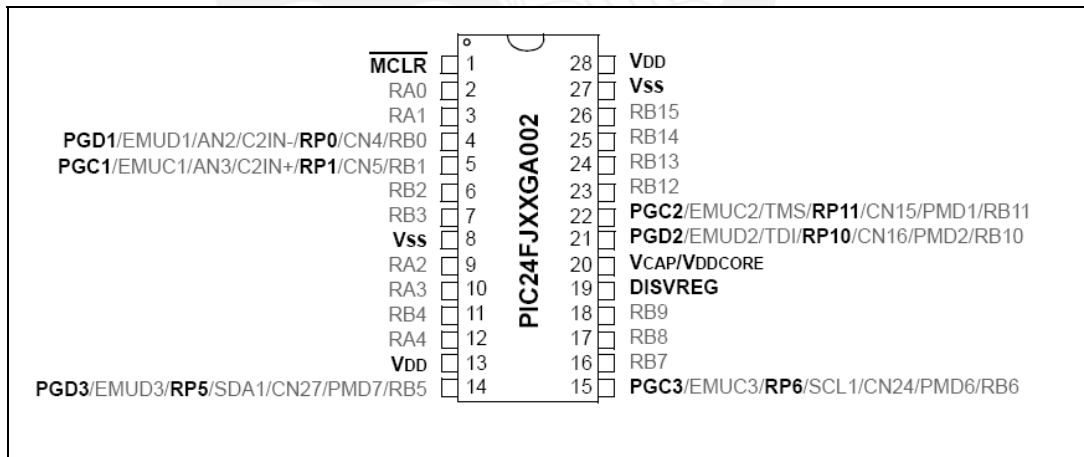
Tomando en cuenta los requerimientos explicados se muestra a continuación (Tabla 9) una tabla comparativa de características entre las dos familias de microcontroladores mas populares

	PIC24FJ32GA	ATMEGA 88
Precio	\$3.50	\$5.00

<b>Frecuencia</b>	32MHZ	20MHZ
<b>Puertos mapeables</b>	Si	No
<b>Voltaje Alimentacion</b>	2.6 - 3.3V	2.7 - 5.5V
<b>ADC</b>	16 bits	8 bits
<b>N# pines</b>	21	28
<b>UART</b>	2	1
<b>Timers</b>	5 - 16 bits	1 - 16bits, 2 - 8 bits

**Tabla 9.** Comparación entre microcontrolador PIC y ATMEL. (Hoja de datos del fabricante)

Ambos microcontroladores cumplen con los requisitos mencionados. Sin embargo el PIC24FJ32GA presenta un menor costo y mayores ventajas respecto al ATMEGA 88 ya que tiene incorporado un ADC y timers de mayor numero de bits los cuales influyen en la resolución de la lectura de datos y en la señal de salida. Más aun, el voltaje de alimentación del PIC es menor y trabaja a mayor frecuencia que el ATMEL. A continuación, se muestra en la Figura 19 la distribución de pines del PIC.



**Figura 19.** Diagrama de pines del microcontrolador PIC.

Para su correcta operación, el microcontrolador debe estar alimentado a una tensión de 3.3 VDC, bajo la cual su consumo de corriente aproximado será de 250 mA como máximo, según la hoja de datos del fabricante.

En la Figura 20, se muestra la asignación de pines para el sistema de control propuesto.

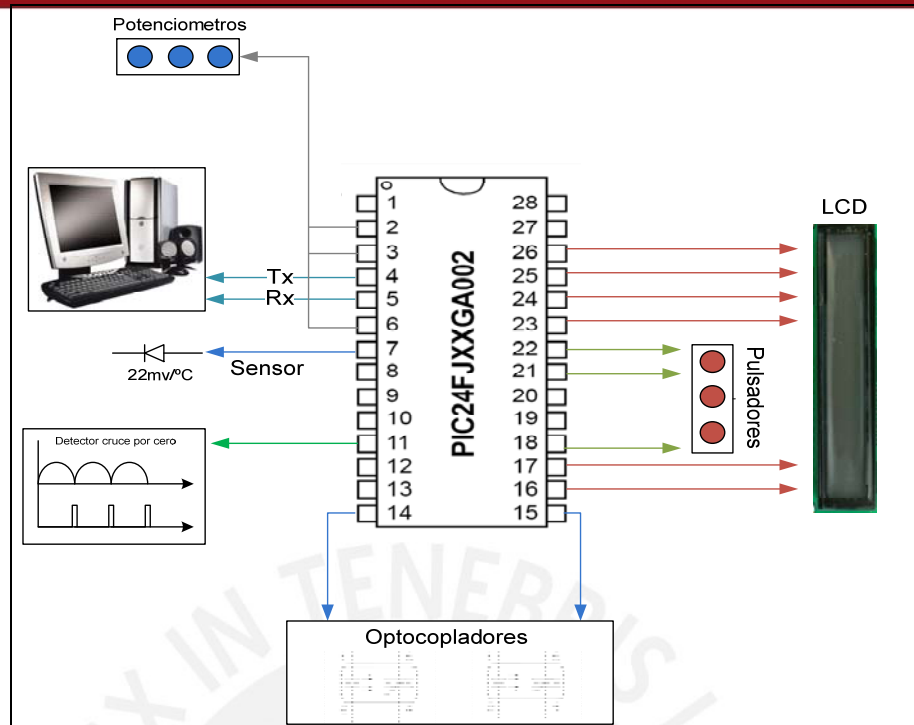


Figura 20. Distribución de pines del PIC.

### 3.4.3. Programación del Microcontrolador

El microcontrolador ejecutará un programa, elaborado en lenguaje Assembly, para el funcionamiento del sistema. Los principales módulos con los que interactúa el microcontrolador son los de actuadores y sensores. Sobre estos, el programa ejecuta las principales tareas para lograr establecer y mantener la temperatura deseada del agua. En la Figura 21, se observa el diagrama de bloques con detalle y la relación entre los módulos.

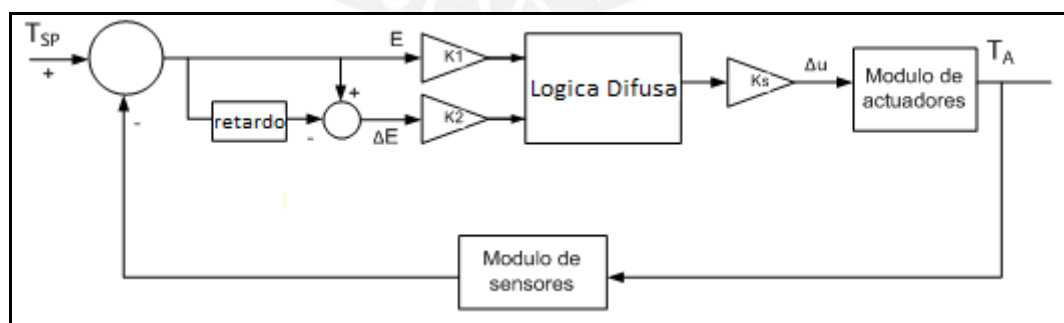


Figura 21. Diagrama de bloques del sistema de control.

Primero, se espera que el operario ingrese un valor de temperatura deseado. Luego, se obtiene el valor real de la temperatura mediante la medición de la variación de voltaje que ocurre en el diodo, la cual representa linealmente el

cambio de temperatura. Luego de pasar por una etapa de amplificación (según capítulo 3.2.1) e ingresarlo por el ADC del PIC, se puede obtener en un número de 4 bytes.

Con el valor ingresado por el usuario y el valor leído por el sensor, el microcontrolador puede obtener los valores de las variables de entrada del bloque difuso: Error y Variación del Error. Esto lo realiza ejecutando las siguientes operaciones matemáticas, usando las funciones de suma y resta (con registro de 16 bits) del lenguaje assembly. Estos valores son guardados en la memoria SRAM del micro.

#### Ecuación 5. Error

$$\text{Error} = T_{\text{setpoint}} - T_{\text{actual}}$$

$$E(t) = T_{\text{setpoint}} - T(t)$$

#### Ecuación 6. Variación de Error

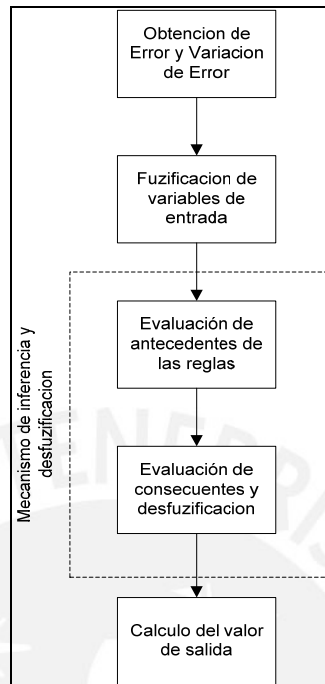
$$\Delta E = (E_{\text{actual}} - E_{\text{anterior}})$$

$$\Delta E = E(t) - E(t-1) = -[T(t) - T(t-1)]$$

Cabe resaltar que la lectura del error se actualiza cada 8.33 ms, tiempo en el cual el microcontrolador demora en ejecutar todo el lazo de control y las demás tareas como la visualización del LCD, el disparo del TRIAC, lectura de datos, entre otras. Este valor de tiempo se determinó por medio de la siguiente operación: tiempo = 1 / 2\*frecuencia. Donde la frecuencia es igual a 60hz (valor de frecuencia de voltaje 220 AC de la red eléctrica para Lima). Esto se debe a que las resistencias operan mediante TRIACs con una onda rectificada completa (periodo = (1/60hz)/2). Por esta razón, el programa como máximo debe demorar en ejecutarse 8.33ms. Por otro lado, la variación de error se puede muestrear, como mínimo, a este intervalo de tiempo, debido a que cada cambio de magnitud del error se da a la frecuencia calculada.

Una vez realizados estos cálculos, los valores pueden ser ingresados al bloque difuso (primer bloque de la Figura 22). En el diagrama de flujo, de la

Figura 22 se detalla la forma de operar del bloque difuso con respecto a las etapas mencionadas anteriormente.

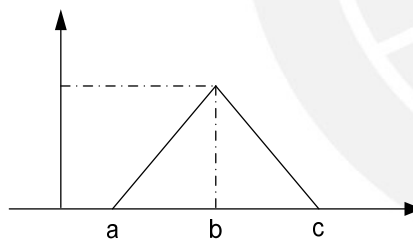
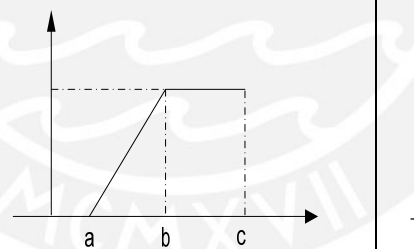
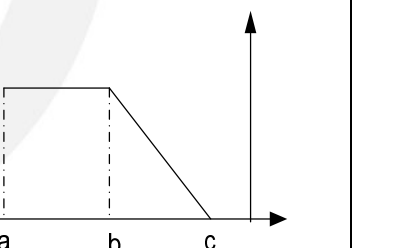


**Figura 22.** Diagrama de flujo general del bloque difuso.

Para poder realizar el control difuso según el planteamiento de “Mandami” presente en el capítulo 3.4.1, el microcontrolador primero halla los valores de las variables de entrada: error y variación de error. Luego, pasa al siguiente bloque (según Figura 22) de fuzificación en el cual trabaja con funciones matemáticas triangulares (Tabla 10) y sentencias lingüísticas difusas [21]. El resultado de estas funciones son almacenados en una tabla para ser utilizados por el siguiente bloque: evaluación de antecedentes. Este bloque evalúa el antecedente de las reglas difusas las cuales están almacenadas en memoria según lo planteado por el método de Mandami. Con este resultado se pasa a evaluar los consecuentes de las reglas para completar con la parte del mecanismo de inferencia. Cabe resaltar que la solución planteada para esta tesis conforme se va evaluando los consecuentes se va hallando los componentes de la fórmula de sumatoria de la etapa de desfuzificación. Esto se hizo para poder optimizar el tiempo de procesamiento del resultado de salida.

Como se explico anteriormente, las variables de entrada del controlador son “fuzzificadas” por el segundo bloque del diagrama de flujo de la Figura 22. La fuzzificación se realiza por medio de las llamadas funciones de pertenencia. Estas representan en forma matemática un valor lingüístico asociado a una variable, por ejemplo: pequeño, grande, negativo, positivo, etc. Los tipos de funciones de pertenencia usados por el controlador son los indicados, según la Tabla 10, que a continuación se detalla:

**Tabla 10.** Tipos de funciones de pertenencia.

<u>TRIANGULAR</u>	<u>TRIANGULAR SUBIDA</u>	<u>TRIANGULAR BAJADA</u>
$f(x,a,b,c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$	$f_2(x,a,b,c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ 1, & c \leq x \end{cases}$	$f_3(x,a,b,c) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$
$f(x,a,b,c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$	$f_2(x;a,b,c) = \left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1\right)\right)$	$f_3(x;a,b,c) = \left(\min\left(1, \frac{c-x}{c-b}\right)\right)$
		

Los resultados numéricos de las funciones de la tabla 10 han sido ingresados en la memoria del microcontrolador. La forma de obtener los resultados se hace por medio de tablas. Para cada variable, el microcontrolador apunta al tipo de función asignada, con sus respectivas constantes(a, b y c) y determina su resultado apuntando a un valor de la tabla guardada en memoria. Después, guarda el resultado obtenida por cada variable de entrada (error y delta de error) en una nueva tabla, que se detalla a continuación en la tabla 11.



**Tabla 11.** Tablas de Fuzzificación.

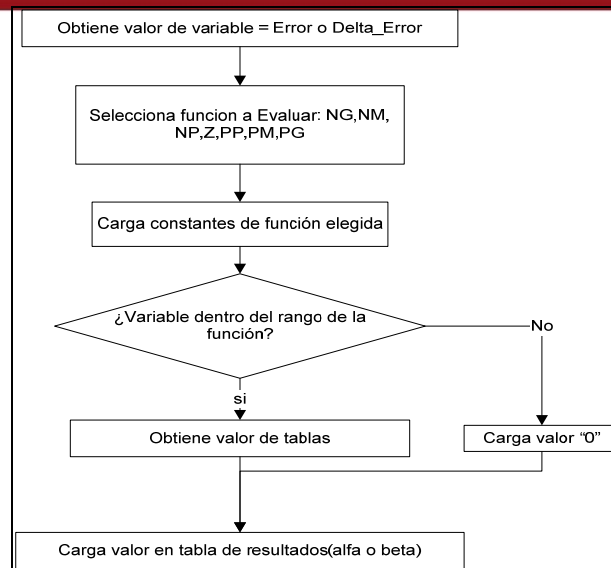
**ERROR**

Valor lingüístico	Función matemática	Tabla
Negativo Grande	$\min [1, (c-x)/(c-b)]$ a = -40 , b = -30 , c = -15	alfa 1
Negativo Mediano	$\min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)]$ a = -30 ,b= -15 , c= -10	alfa 2
Negativo Pequeño	$\min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)]$ a = -15 ,b= -10 , c= -0	alfa 3
Zero	$\min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)]$ a = -10 ,b= 0 , c= 10	alfa 4
Positivo Pequeño	$\min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)]$ a = 0 ,b=10 , c= 15	alfa 5
Positivo Mediano	$\min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)]$ a = 10 ,b= 15 , c= 30	alfa 6
Positivo Grande	$\min [(x-a)/(b-a),1]$ a= 15, b=30 c =40	alfa 7

**DELTA DE ERROR**

Valor Lingüístico	Función matemática	Tabla
Negativo Grande	$\min [1, (c-x)/(c-b)]$ a = -40 , b = -30 , c = -15	beta 1
Negativo Mediano	$\min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)]$ a = -30 ,b= -15 , c= -10	beta 2
Negativo Pequeño	$\min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)]$ a = -15 ,b= -10 , c= -0	beta 3
Zero	$\min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)]$ a = -10 ,b= 0 , c= 10	beta 4
Positivo Pequeño	$\min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)]$ a = 0 ,b=10 , c= 15	beta 5
Positivo Mediano	$\min[(x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)]$ a = 10 ,b= 15 , c= 30	beta 6
Positivo Grande	$\min [(x-a)/(b-a),1]$ a= 15, b=30 c =40	beta 7

Para cada variable se tienen 7 valores lingüísticos, los cuales están asociados a uno de los tres tipos de funciones matemáticas mencionadas anteriormente. A mayor número de variables aumenta la resolución en la medición de las variables de entrada. El microcontrolador evalúa cada una de estas dentro de sus respectivas funciones y los valores hallados se almacenan en las tablas señaladas en la tabla 11. El siguiente diagrama de flujo, de la figura 23, muestra el algoritmo utilizado por el controlador para realizar esta operación:



**Figura 23.** Diagrama de flujo general de la etapa de fuzzificación.

Después de realizar el cálculo de las variables de entrada el microcontrolador, se selecciona primero la variable “error” para ser evaluada en las 7 funciones de pertenencia. Como el rango de valores entre los cuales puede estar la variable es ingresado manualmente y considerado por las funciones de pertenencia para optimizar el tiempo de ejecución de este bloque, el microcontrolador evalúa si es que el valor del “error” se encuentra dentro del rango de la función de pertenencia escogida (a, b y c según tabla 10). Si esto no ocurre, el controlador automáticamente pasa a hacer la comparación de este valor dentro del rango de la siguiente función de pertenencia, hasta que este valor este dentro de una de las funciones de la parte de fuzzificación. Para este caso, el microcontrolador le suma un offset a al valor leído de la variable de entrada y carga una dirección de memoria para obtener el resultado de la función que se encuentra en la memoria del mismo. Una vez ejecutado todo esto, para la variable “error”, se repite el mismo proceso para la variable “variación de error”.

Continuando con la ejecución del bloque difuso, mostrado en la figura 22, prosigue el mecanismo de inferencia, el cual determina la respuesta del sistema. Esto lo logra por medio de la evaluación de las reglas difusas, obteniendo como resultado la predominación de una de estas en la respuesta de salida del controlador. Es por esta razón, que las reglas difusas son el cerebro del controlador. Las reglas utilizadas para el controlador son

del tipo: “IF A THEN B”. Además, el número de reglas depende del número de funciones de pertenencia. Para este caso, el controlador trabaja con 49 reglas, ya que se tienen 7 funciones para cada variable de entrada. La tabla 6 muestra las 49 reglas propuestas para el sistema.

**Tabla 12.** Tablas de reglas difusas.

		Derivada del error						
		Neg Grande	Neg Mediano	Neg Pequeño	Zero	Positivo Pequeño	Positivo Mediano	Positivo Grande
Error	Neg Grande	Neg Grande	Neg Grande	Neg Grande	Neg Grande	Neg Mediano	Neg Pequeño	Zero
	Neg Mediano	Neg Grande	Neg Grande	Neg Grande	Neg Mediano	Neg Pequeño	Zero	Positivo Pequeño
	Neg Pequeño	Neg Grande	Neg Grande	Neg Mediano	Neg Pequeño	Zero	Positivo Pequeño	Positivo Mediano
	Zero	Neg Grande	Neg Mediano	Neg Pequeño	Zero	Positivo Pequeño	Positivo Mediano	Positivo Grande
	Positivo Pequeño	Neg Mediano	Neg Pequeño	Zero	Positivo Pequeño	Positivo Mediano	Positivo Grande	Positivo Grande
	Positivo Mediano	Neg Pequeño	Zero	Positivo Pequeño	Positivo Mediano	Positivo Grande	Positivo Grande	Positivo Grande
	Positivo Grande	Zero	Positivo Pequeño	Positivo Mediano	Positivo Grande	Positivo Grande	Positivo Grande	Positivo Grande

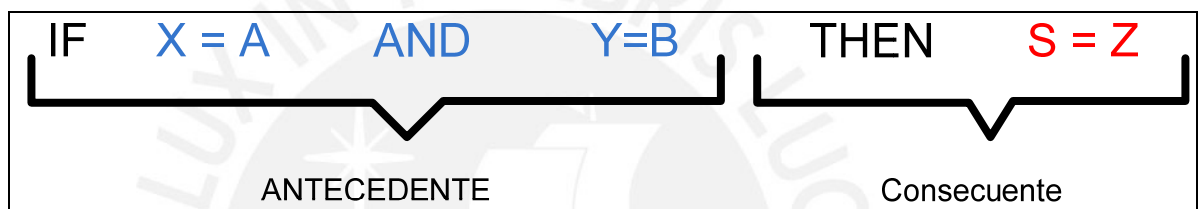
Esta matriz relaciona las variables del controlador con la salida de la regla. Por ejemplo, la regla número uno sería: IF Error = Neg Grande AND D\_Error = Neg Grande THEN Neg\_Grande.

Esto quiere decir que si el error tiene el valor “negativo muy grande”, es decir, la temperatura actual está por encima de la temperatura deseada, y la variación de este también tiene el valor “negativo muy grande”, es decir el cambio de la variable error es rápido, entonces el sistema disminuirá el calor entregado al agua para poder alcanzar la temperatura deseada. Razón por la cual su salida se designa como una salida negativa grande, lo que simboliza directamente que se le disminuirá la potencia entregada a las

resistencias. Las reglas fueron elaboradas tomando como base los conocimientos sobre controladores proporcionales integrales y la teoría de control clásico.

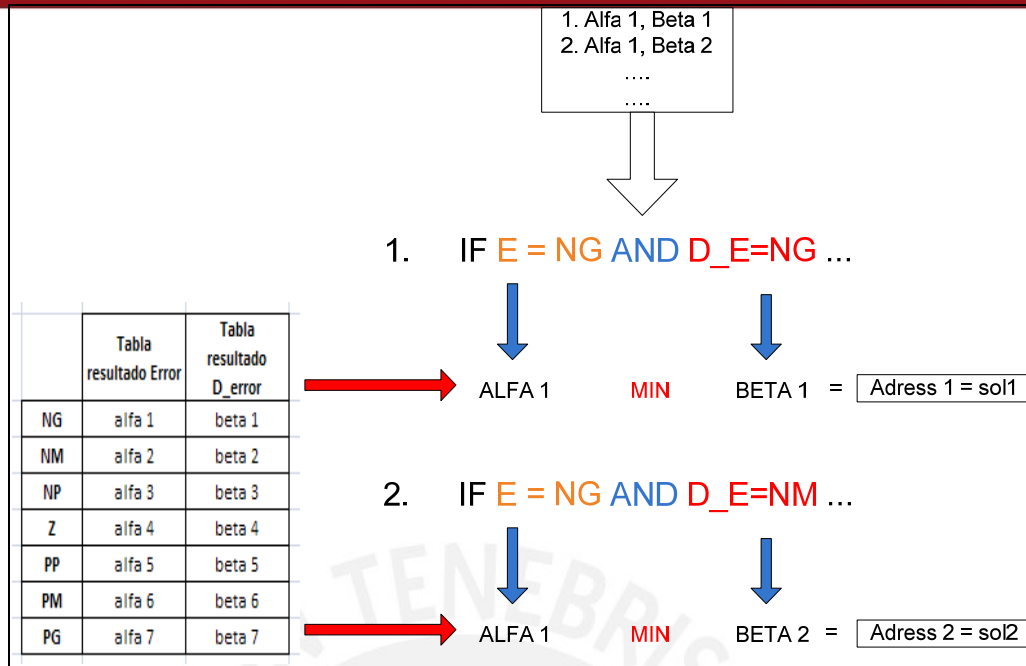
Con estas reglas el mecanismo de inferencia trabaja en base al método de Mandami, que está principalmente orientado al control de plantas. Este utiliza las funciones “MIN” y “MAX”, y el método de agregación e implicación para determinar la regla de mayor peso en un determinado instante.

Entonces, tomando como base lo explicado, lo primero que realiza el controlador, como nos muestra la Figura 24, es evaluar los antecedentes de cada regla:



**Figura 24.** Sintaxis de reglas difusas.

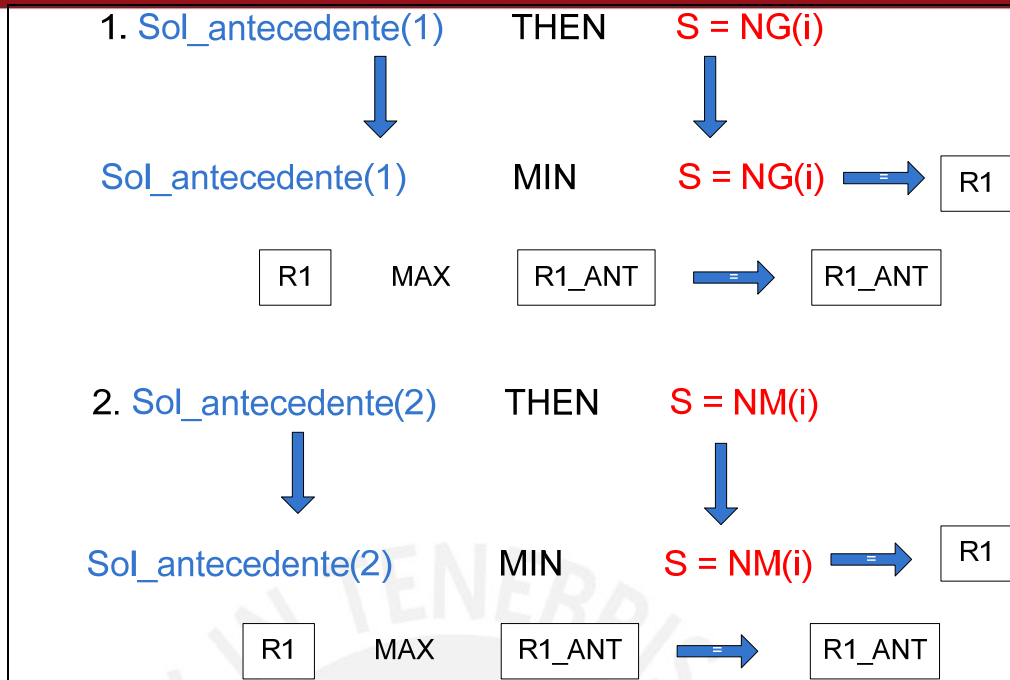
Para evaluar los antecedentes, el programa cuenta con información sobre las reglas dentro de una tabla. Como se sabe, la fuzzificación da información sobre el resultado de reemplazar cada variable dentro de una función. Entonces, las tablas dentro del microcontrolador señalan los dos valores de tablas de cada variable que deben ser evaluados. El siguiente gráfico, de la figura 25, detalla lo explicado.



**Figura 25.** Algoritmo “Solución Antecedentes”.

Los antecedentes de las reglas están guardados en memoria en forma de números hexadecimales. Estos valores contienen información de qué valores de las tablas de resultado de Error y D\_Error deben ser evaluados con la función “MIN”, la cual se ejecuta por medio de una resta entre ambos valores y se analiza el resultado de la resta verificando el registro de banderas. Una vez realizado este cálculo, el resultado es guardado en una nueva tabla, asociando el primer resultado a la solución del antecedente de la regla 1. Esto se hace hasta evaluar las 49 reglas. Con lo cual se forma una nueva tabla llamada “Solución Antecedentes” y se puede pasar al siguiente bloque.

El penúltimo bloque de la figura 22 evalúa los consecuentes de cada regla y calcula los términos para realizar la defuzzificación. Como se mencionó anteriormente, se usará el método de agregación e implicación por medio de las funciones “MIN” y “MAX”. La primera que se efectúa es la función “MIN” entre la salida y la solución del antecedente correspondiente a una regla. Luego, ese resultado se compara con la solución de otra regla y se determina cual es el máximo valor por medio de la función “MAX”. El siguiente gráfico, que se muestra en la figura 26, ilustra lo explicado:



**Figura 26.** Algoritmo de programación evaluación de consecuentes y defuzificación

Cabe resaltar que este algoritmo se ejecutará dentro de todo el rango de las variables lingüísticas de la variable de salida (ver capítulo 4.3.1). Es por esta razón, que en el gráfico mostrado se reemplaza el valor del rango en la función de salida asignada por cada regla. Así, se obtiene el resultado, el cual será comparado con los valores de la tabla de solución antecedente. Este algoritmo permite evaluar las 49 reglas para cada valor del rango de salida o “i”. Para cada valor de “i” se obtiene el valor máximo de la evaluación de todas las reglas. Este valor es utilizado por el bloque de defuzzificación. La operación matemática que se efectúa al finalizar esta evaluación con cada valor de “i” es la siguiente:

Para $i = 10\%$ , el resultado máximo sería: $R1\_ANT = 0.5$
Numerador = $R1\_ANT * i + \text{Numerador anterior}$
Denominador = $R1\_ANT + \text{Denominador anterior}$
Numerador Anterior = Numerador
Denominador Anterior = Denominador

Con estas operaciones se va sumando todos los valores hallados para cada valor de “i”. Esto se debe a que la fórmula de desfuzificación utilizada es la siguiente:

**Ecuación 7.** Formula desfuzificacion

$$\text{Valor salida} = \frac{\sum_{i=0}^n \mu(Z)_i \cdot Z_i}{\sum_{i=0}^n \mu(Z)_i}$$

Donde el numerador equivale al resultado máximo obtenido para cada valor de “i” multiplicado por “i” y el denominador equivale al resultado máximo obtenido por cada valor de “i”. Tomando en cuenta lo explicado, el resultado final se obtiene realizando la división entre el numerador y el denominador obtenido en el bloque anterior. Cabe resaltar que la salida puede ser positiva o negativa, por lo cual los negativos se expresan en complemento a 2.

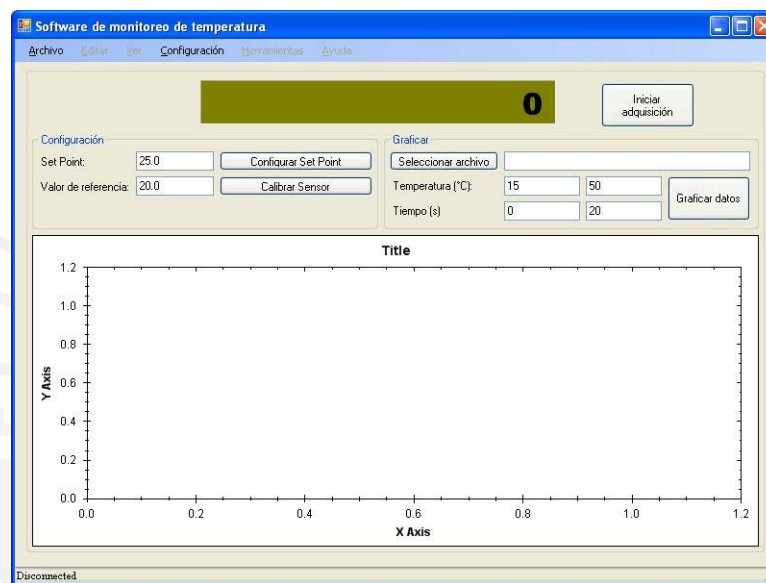
Luego de efectuar el bloque difuso, el controlador efectúa las demás operaciones como enviar datos por el LCD, enviar datos por el puerto serial, etc. Entre las más importantes está la de indicar la potencia entregada a la resistencia por medio de los TRIACs. Esto se calcula de forma muy sencilla, ya que se sabe que 8.33 ms corresponde a entregar 0 W de potencia y 0 ms corresponde a entregar toda la potencia de las resistencias (ver capítulo 2.2.1.1). Para determinar la potencia entregada, lo único que hace el controlador es mandar un valor decimal entre 10 y 500, donde 10 corresponde a mandar toda la potencia y 500 a mandar 0 W. Con esta información, el microcontrolador solo suma o resta la respuesta entregada por el controlador y la envía por medio de una señal PWM a los optoacopladores.

#### **3.4.4. Módulo de Comunicación**

Este módulo de monitoreo, elaborado como una herramienta para esta tesis, permite comunicarse con el controlador por medio de una computadora. Su uso está orientado a observar el comportamiento y la respuesta del sistema de control.

Para poder observar la curva de repuesta del sistema a controlar es necesaria una interfaz visual que permita graficar la variable a controlar vs el tiempo. Con estos datos es posible determinar el tiempo de establecimiento, tiempo de subida y sobre impulso.

El programa consiste en una interfaz programada en visual.net que permite al usuario ingresar un Set Point y tomar datos que le envía el controlador, los cuales los almacena en un archivo de Excel. Además, permite graficar los datos almacenados en el archivo de Excel generado en la interfaz que se muestra en la figura 27.



**Figura 27.** Interfaz de PC de módulo de comunicaciones

En la interfaz se puede observar una ventana de configuración en donde el usuario puede modificar los baudios de la comunicación y seleccionar el puerto serial. Cabe resaltar que la comunicación con el microcontrolador se hace por medio del chip MAX232 el cual permite enviar y recibir datos de la PC por medio de un puerto serial.

La trama utilizada, mostrada en la figura 28, para la comunicación del microcontrolador con la PC tiene la siguiente estructura:

[Carácter de Inicio]	[Dirección uC]	[Datos]	[Carácter de fin de Trama]
[<]	[1]	[Data]	[>]

**Figura 28.** Trama de comunicación serial



## CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1. Pruebas y Verificación de Instrumentación

#### 4.1.1. Pruebas del Módulo de Sensores

El sensor de temperatura utilizado entrega una señal analógica de voltaje por cada cambio centígrado de la temperatura del agua. Esta señal cambia  $2.2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Para poder obtener esta variación de voltaje, el diodo es sometido a una fuente de corriente regulada. Luego, pasa por una etapa de comparación y amplificación. Cabe resaltar que la etapa de amplificación posee un circuito corrector de offset, ya que las señales con las que se trabaja son muy pequeñas. Por último, pasa por un atenuador que permite ajustar la ganancia deseada para que pueda ingresar al ADC del microcontrolador.

Primero, se comprobó que la variación del sensor fuera de alrededor de  $2.2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Por ello en la Tabla 13, se muestra una tabla con las pruebas realizadas de la variación de voltaje por cada grado centígrado que aumentaba.

Temperatura( $^\circ\text{C}$ )	Variación de Voltaje
18 $^\circ\text{C}$	
19 $^\circ\text{C}$	2.22mV
20 $^\circ\text{C}$	2.216mV
21 $^\circ\text{C}$	2.21mV
22 $^\circ\text{C}$	2.223mV
23 $^\circ\text{C}$	2.215mV
24 $^\circ\text{C}$	2.205mV
25 $^\circ\text{C}$	2.213mV
26 $^\circ\text{C}$	2.221mV
27 $^\circ\text{C}$	2.217mV
28 $^\circ\text{C}$	2.202mV
29 $^\circ\text{C}$	2.218mV

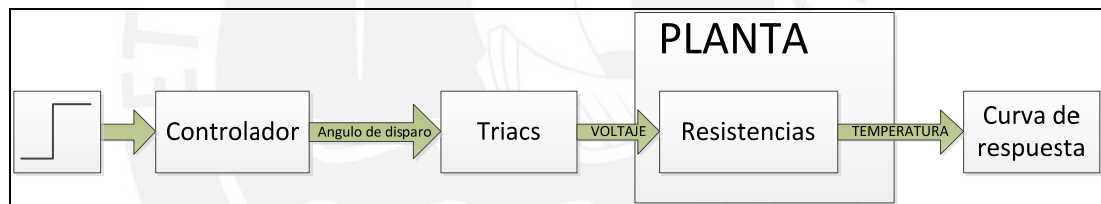
**Tabla 13.** Tabla de pruebas del sensor.

Segundo, se conectaron las dos entradas del segundo OPAMP (pines 5 y 6) y se giró el potenciómetro P3 hasta que el valor de la salida en el operacional sea 0 V. Luego, se ajustó la corriente en el diodo a 100 mA con el potenciómetro P5.

Una vez realizado esto, se pasó a calibrar el sensor. Este se sometió a 0 °C por medio de ponerlo en contacto con un cubo de hielo.

#### 4.2. Pruebas del Circuito de Potencia y Control Manual

Las pruebas del control manual del sistema se realizaron usando el LCD, el microcontrolador, potenciómetros, pulsadores y la interfaz en visual.net. Para observar la curva de respuesta de la planta se simuló un escalón a la entrada del sistema. El siguiente diagrama muestra los bloques involucrados en la prueba a realizar.



**Figura 29.** Diagrama de bloques de prueba a realizar

La planta utilizada es un calentador a paso que funciona mediante dos resistencias eléctricas, una de 2.5 kW y otra de 1 kW. El caudal de agua utilizado en las pruebas es aproximadamente entre 1.5 a 3 litros por minuto (LPM). Para poder medir este caudal se utilizó un cronometro y una jarra de 1 litro. La tabla 14 muestra los resultados obtenidos de contar el tiempo que demora el flujo de agua del caño en llenar la jarra de un litro.

**Tabla 14.** Ensayo de medición de caudal de agua

N° ensayo	Estado caño	Tiempo de llenado (s)	Caudal (LPM)
1	completamente abierto	20.5	2.93
2	completamente abierto	21.5	2.79
3	completamente abierto	19.8	3.03

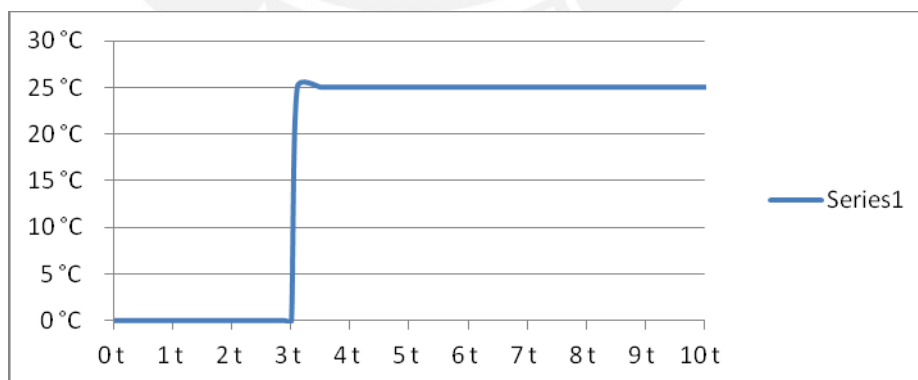
4	completamente abierto	20.1	2.99
5	abierto a la mitad	41	1.46
6	abierto a la mitad	39.8	1.51
7	abierto a la mitad	39	1.54
8	abierto a la mitad	41.2	1.46

Se conectó al circuito la resistencia de 2.5 kW, la cual, aplicándole 220 de voltaje para distintos estado del caño pudo calentar el agua a un máximo de 36°C, según tabla 15.

**Tabla 15.** Medición de temperatura máxima

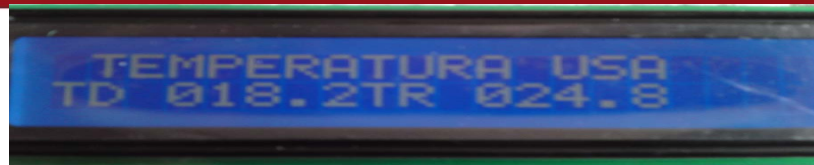
Resistencia	Estado caño	Voltaje	Temperatura
2.5KW	Completamente abierto	219	31.5
	Completamente abierto	219.5	32
	Abierto a la mitad	219.5	35.6
	Abierto a la mitad	219.4	35.7

Se utilizó un pulsador para simular un escalón de magnitud igual a 25°C mostrado en la siguiente figura 30 .Se configuro el microcontrolador para que cada vez que se presione el pulsador el set point actual sea de 25°C y se mande el correspondiente ángulo de disparo a los triacs. Utilizando un cronometro se presionó este pulsador luego de 3 segundos de haber encendido el sistema.



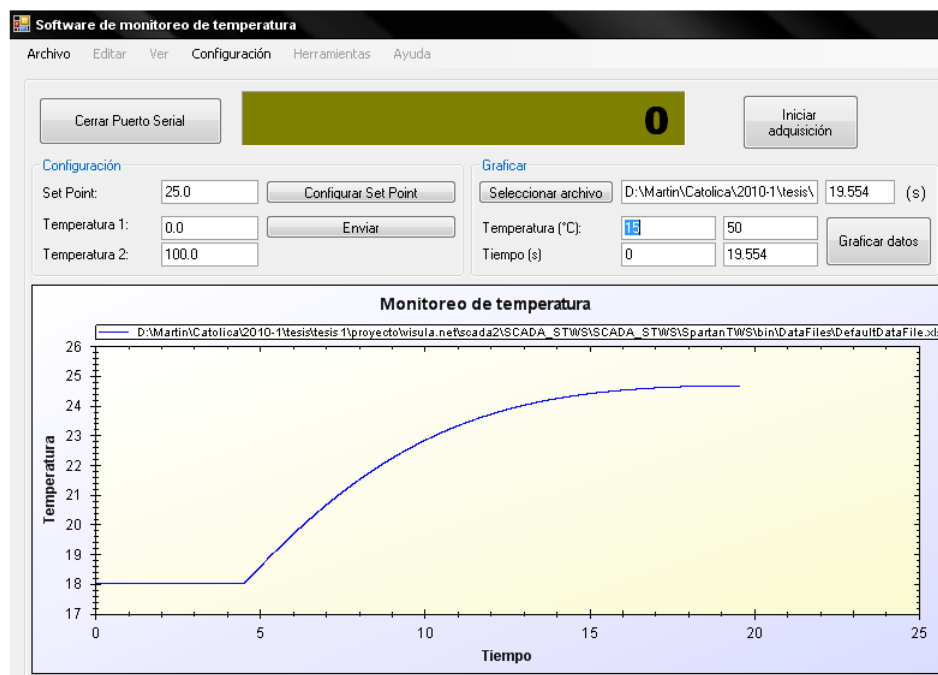
**Figura 30.** Escalón de entrada al sistema

En la figura 31, se muestra la lectura del LCD cuando se aprieta el pulsador.



**Figura 31.** Lectura del LCD

La figura anterior muestra la lectura del sensor. TD es la temperatura leída por el sensor y TR es el Set Point. El sensor detectó que la temperatura del agua de entrada es aproximadamente 18 °C. La respuesta del sistema, se observa en la figura 32:



**Figura 32.** Gráfica de la respuesta del sistema al escalón.

De la gráfica 32 se puede observar que el sistema tuvo un retardo en la respuesta de 1.5 segundos. La planta del sistema a controlar presentó una curva de respuesta de primer orden. En la figura 33, se muestra la visualización de las variables después de realizar el ensayo:

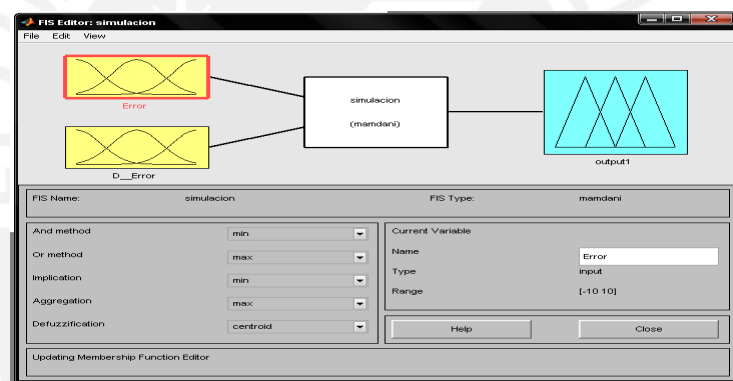


**Figura 33.** Foto de lectura del LC

### 4.3. Pruebas y Verificación del Controlador

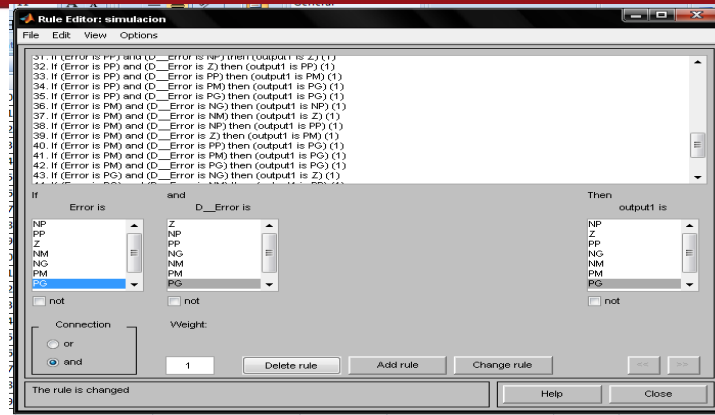
#### 4.3.1. Simulación del Controlador

El control difuso fue programado en lenguaje Assembly en un microcontrolador PIC. Para realizar esta tarea, se usó el entorno de microchip llamado MPLAB IDE. La simulación del bloque de control se realizó con esta interfaz y con el bloque “Fuzzy Logic” del programa MATLAB. Primero, se ingresaron las mismas variables y funciones tanto en el simulador de MATLAB como en el programa del microcontrolador. Luego, se compararon las respuestas obtenidas, con lo cual se determinara el correcto funcionamiento del bloque difuso. En la figura 34, se muestra el bloque de control del programa MATLAB:



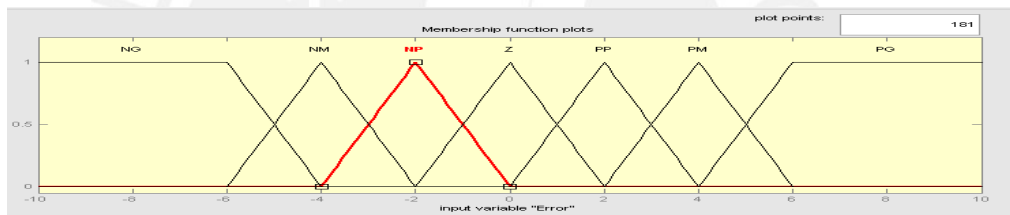
**Figura 34.** Simulación Fuzzy MATLAB.

En el simulador, se insertaron las dos variables de entradas con sus 7 funciones de pertenencias: “error y variación de error”. Luego, en la interfaz mostrada se seleccionó la función “MIN” para los métodos AND y “IMPLICATION” (implicación) y la función “MAX” para los métodos OR y “AGGREGATION” según el modelo de Mandami elegido. También se seleccionó el método de centroide para la defuzzificación y se ingresaron las 49 reglas al simulador de MATLAB. En la figura 35, se muestra el bloque de reglas:

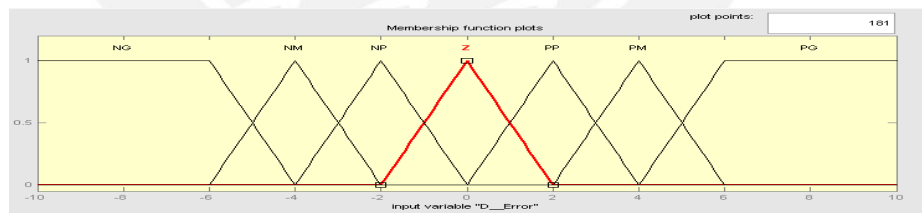


**Figura 35.** Interfaz de configuración de reglas del bloque Fuzzy del MATLAB.

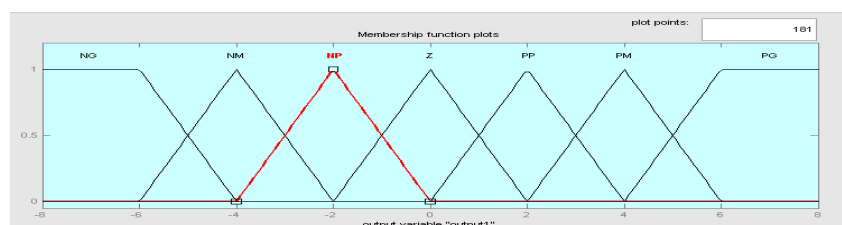
Se configuró el simulador con el mismo conector AND entre el antecedente y consecuente de una regla. Las funciones de pertenencia utilizadas en las figuras 36, 37 y 38 para las variables de entrada y salida en la simulación son las mostradas a continuación:



**Figura 36.** Funciones de pertenencia para la variable Error.

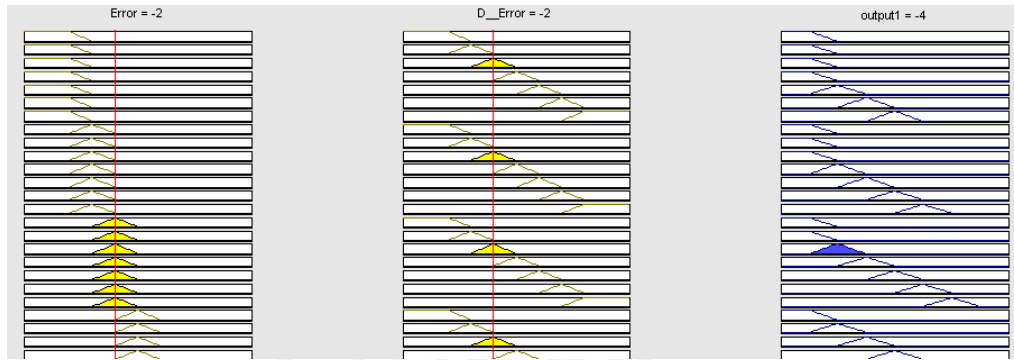


**Figura 37.** Funciones de pertenencia para la variable Variación de Error.



**Figura 38.** Funciones de pertenencia para la variable Salida.

Estas mismas funciones de pertenencias fueron ingresadas al microcontrolador según formulas planteadas en el capítulo 3.4.3. Con la data ingresada en ambos simuladores, se realizó la primera prueba, como se muestra en la figura 39.



**Figura 39.** Simulación MATLAB.

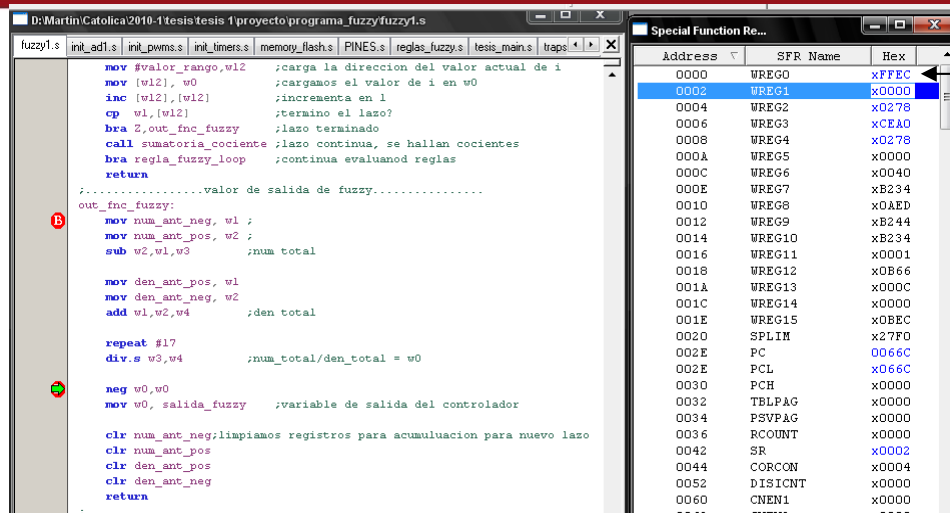
Se ingresó al Error el valor “-2” y a la Variación de Error el valor “-2”. Luego, se observó que el valor de la salida fue “-4”. En el simulador del MPLAB se ingresaron estos valores como se observa en la figura 40:

```

error: .skip 2
variacion_error: .skip 2
.global error
.global variacion_error
.global calculo_del_error
.global calculo_de_variacion_del_error
.text
calculo_del_error:
    mov #0xFFD8,w0
    mov w0, error
    return
calculo_de_variacion_del_error:
    mov #0xFFD8,w0
    mov w0, variacion_error
    return
.end
  
```

**Figura 40.** Entorno MPLAB.

Cabe resaltar que estos valores se multiplicaron por 20, debido a la amplificación del ADC, y luego se convirtieron a complemento a 2, obteniendo así el valor de 0xFFD8 en hexadecimal. Luego, se ejecutó el programa y se evaluó la respuesta en el entorno de MPLAB. En la figura 41, se muestra el resultado obtenido:



**Figura 41.** Simulación de la respuesta del controlador difuso en la interfaz MPLAB.

Luego de ejecutar la instrucción “div.s,” el microcontrolador guarda el resultado en el registro WREG0. Al observar el panel de registros, el valor obtenido, luego de efectuar la división (que equivale a la división del valor de salida de la ecuación 7 del capítulo 3.4.3), fue de 0xFFEC. Este valor en decimal es igual a -20. Como se sabe, la salida es un DUTY CYCLE que va entre 0 y 100 %, el cual el microcontrolador interpreta como un valor entre 10 y 500. Para obtener el resultado, basta con dividirlo entre 5, de donde se obtiene el valor de -4. En la tabla 16, se indica los resultados hallados en otras pruebas para distintos valores de entrada y salida.

**Tabla 16.** Simulación de la respuesta del controlador difuso en interfaz MPLAB.

Error	D_Error	Salida Matlab	Salida MPLAB (HEX)	Salida MPLAB divide entre 5
-1	-2	0.9888	0x0007	1.4
0	2	2	9x000A	2
1	0	0.9888	0x0007	1.4
2	-5	-3	0xFFFF1	-3
0	0	0	0x0002	0.4
5	5	6.28	0x001E	6

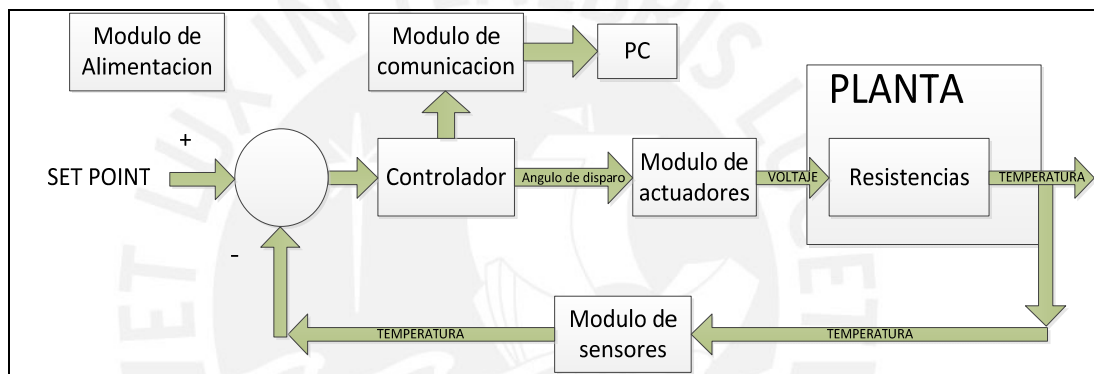


1	4	5.28	0x0018	4.8
---	---	------	--------	-----

El error del valor de salida entre el controlador simulado en el matlab y el implementado en el microcontrolador es como máximo de +/- 0.4.

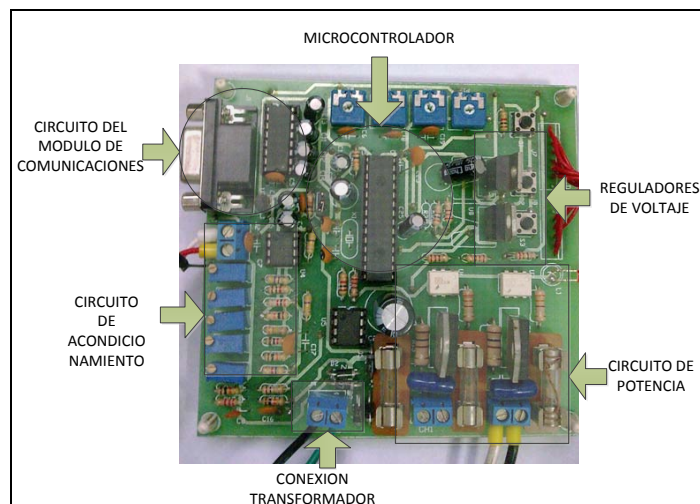
#### 4.4. Pruebas Generales del Sistema de Control

Las pruebas generales del sistema de control involucran el funcionamiento conjunto de los módulos diseñados así como el uso de la interfaz en la PC para monitorear la respuesta del sistema. La siguiente figura 42 ilustra lo explicado.



**Figura 42.** Diagrama de bloque de prueba del sistema general

El diagrama ilustra la conexión entre el controlador con los módulos planteados para formar un lazo cerrado de control que permita el control de la temperatura del agua. La siguiente foto muestra las conexiones físicas de los circuitos de los módulos sobre una tarjeta de circuito impreso.



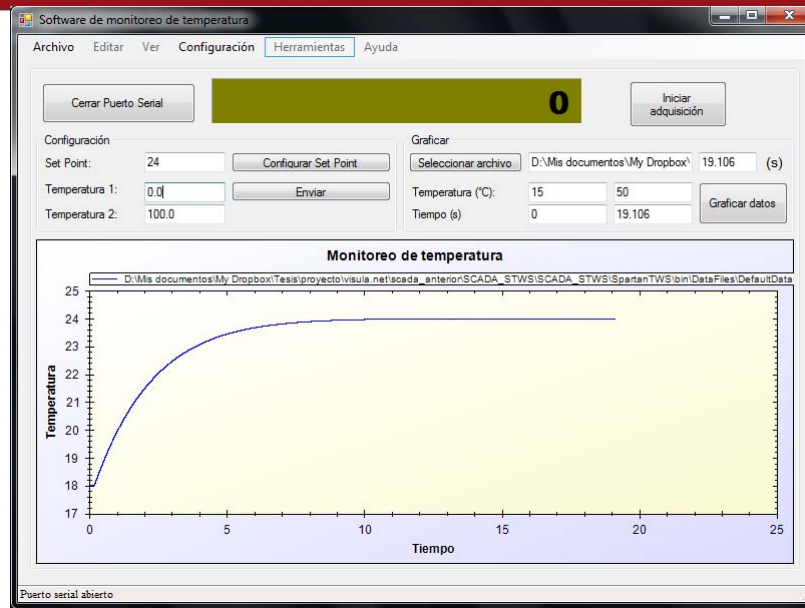
### Figura 43. Circuito impreso

Los reguladores de voltaje y la conexión del transformador permiten alimentar a todos los circuitos de la tarjeta. El circuito de potencia está conformado por TRIACS y tienen fusibles para proteger a los circuitos de intensidades de corriente mayores a 20 amperios. El circuito de comunicaciones posee un conector RS232 para poder conectarse a la PC y el chip max 232 para comunicarse con el micro controlador. Por último se puede apreciar al microcontrolador conectado a los circuitos de los módulos planteados.

Para realizar las pruebas primero se conectó el módulo de actuadores a la resistencia de 2.5 kW. Se energizó el controlador y la tarjeta de circuito impreso, y se conectó el sistema a la interfaz de visual.net por medio de un cable RS232 para grabar la lectura de datos en un archivo de Excel.

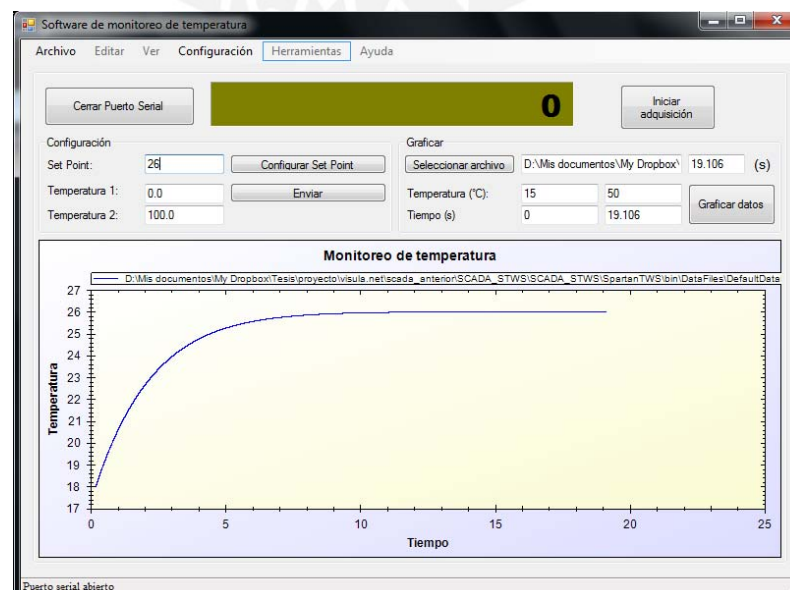
Para la primera prueba se configuró el Set Point a 24 °C por medio de la interfaz y se envió el dato al microcontrolador. Además, se fijó el caudal de agua a 3 LPM. La respuesta del sistema esperado debe ser de primer orden, con un tiempo de retardo menor a 1.5 segundos y el tiempo de subida menor a 12 segundos según datos obtenidos de la curva de respuesta de la planta sin controlador (ver figura 32)

El resultado obtenido de este ensayo se muestra en la figura 44.



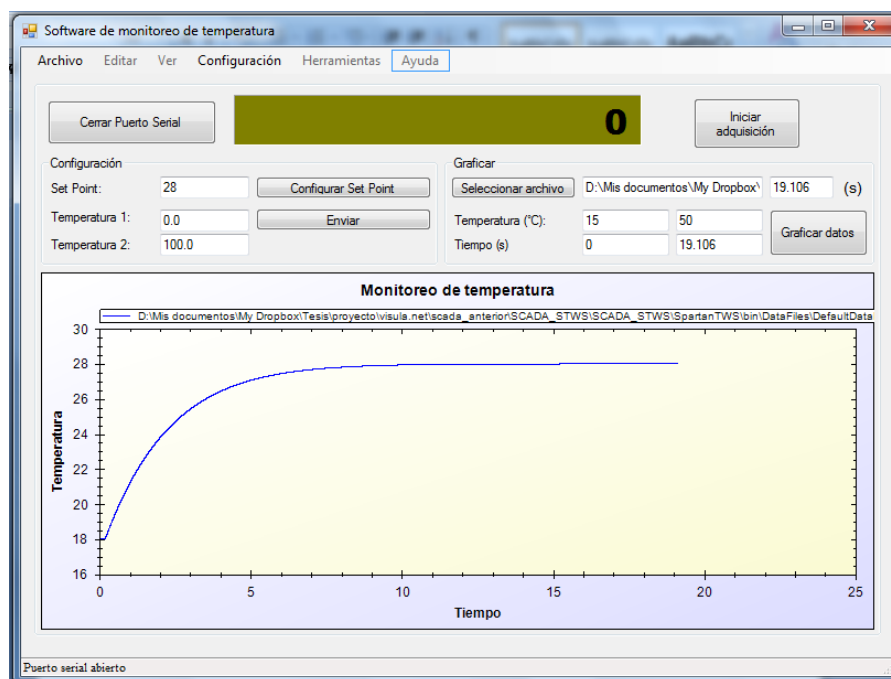
**Figura 44.** Gráfica de la respuesta del sistema para un Set Point de 24 °C.

Según la gráfica, el sistema logró estabilizar la variable temperatura aproximadamente en 10 segundos, el tiempo de subida fue igual a 2.5 segundos y no presento sobreimpulso. Cabe resaltar que el grifo de agua está abierto a partir del tiempo 0 de la gráfica 44. Por esta razón, el agua desperdiciada para el tiempo de establecimiento hallado es alrededor de 0.5 litros. Luego, se realizó el mismo procedimiento para los siguientes valores de temperatura: 26 °C, 28 °C y 30 °C. En la figura 45, se observa la respuesta del sistema para un Set Point de 26 °C



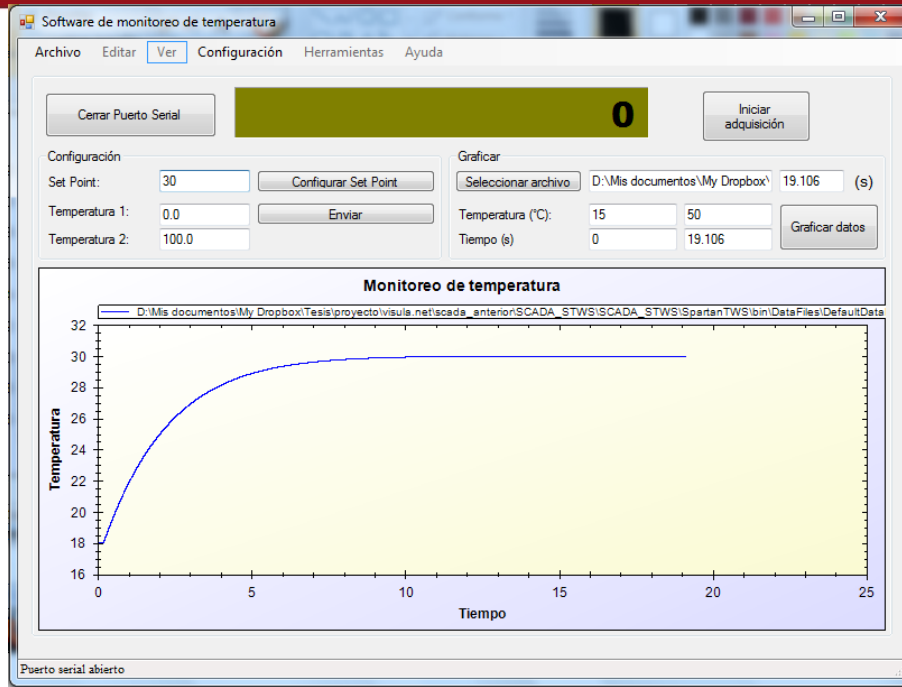
**Figura 45.** Gráfica de la respuesta del sistema para un Set Point de 26 °C

Para un Set Point igual a 26 °C, el tiempo de establecimiento de la variable se logró aproximadamente en 15 segundos. La curva no presento sobreimpulso, el tiempo de subida fue igual a 2.1 segundos y el agua desperdiciada para esta prueba fue alrededor de 0.75 litros. En la figura 46, se observa la respuesta del sistema para un Set Point de 28 °C



**Figura 46.** Gráfica de la respuesta del sistema para el Set Point a 28 °C

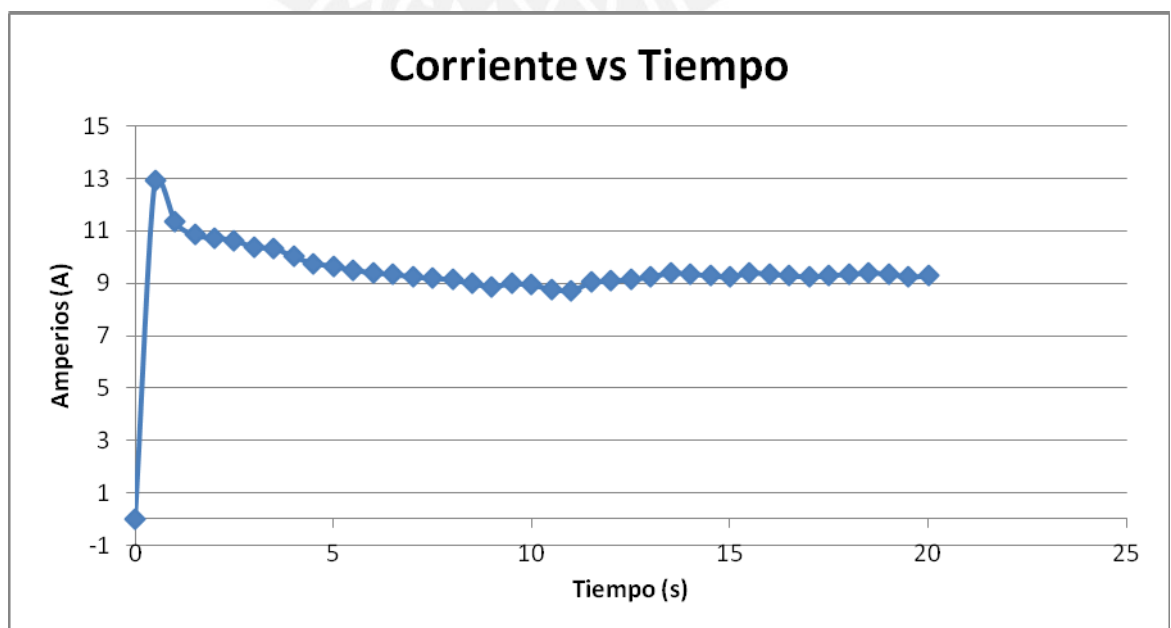
Para el caso de un Set Point igual a 28 °C, el sistema demoró 13 segundos en establecer el valor de la temperatura. No hubo sobreimpulso, el tiempo de subida es igual a 2.3 segundos y el agua desperdiciada fue alrededor de 0.65 litros. En la figura 47, se observa la respuesta del sistema para un Set Point de 30 °C



**Figura 47.** Gráfica de respuesta del sistema para un Set Point de 30 °C

Para el caso del Set Point igual a 30 °C, el sistema demoró aproximadamente 10 segundos en establecer el valor de la variable temperatura. No hubo sobreimpulso, el tiempo de subida fue igual a 2.5 segundos y el agua desperdiciada fue de 0.5 litros.

Para medir el consumo de corriente del sistema se utilizó pinzas amperimétricas FLUKE. En la figura 48, se muestra la curva de consumo de corriente para prueba de 24 °C.



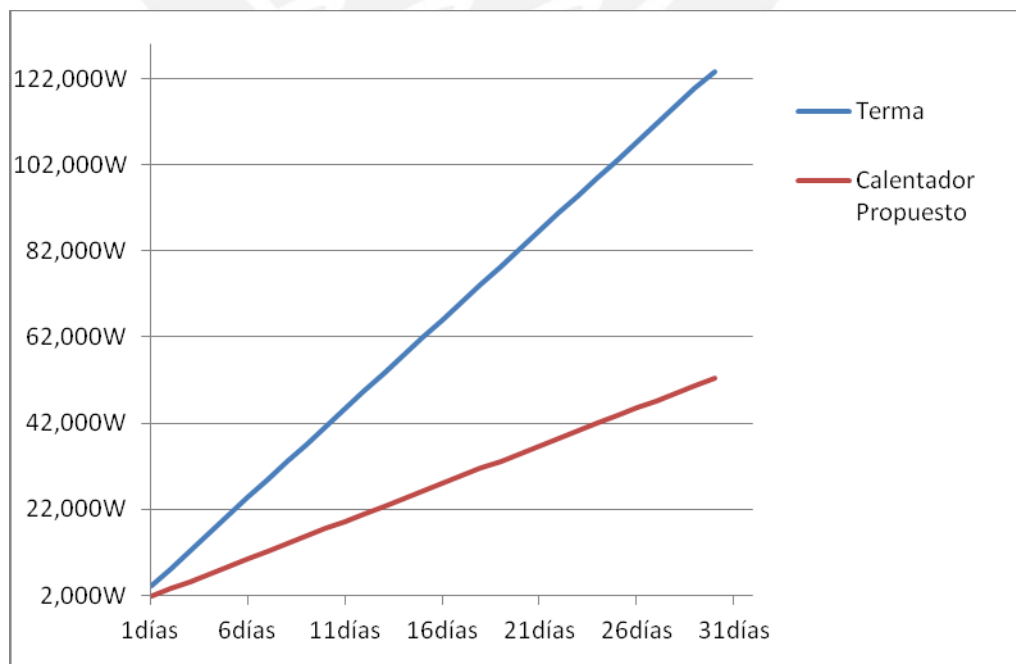
**Figura 48.** Gráfica curva de corriente para prueba de 24 °C

Se puede apreciar que el sistema presento un pico de corriente de alrededor de 13 Amperio y el consumo promedio del sistema esta aproximadamente entre 9 Amperios. La corriente se mantiene estable y presenta solo un pico lo que favorece a la protección de los equipos contra daños de sobretensión.

En la tabla 17, se muestra un cuadro con la comparación del consumo de energía en kilowatts en una terma convencional y en el calentador desarrollado. La tarifa utilizada para el ejemplo es de la empresa Luz del SUR del tipo BT5B de 0 a 30 kW. El costo por kilowatt hora es igual a 0.268 nuevos soles.

**Tabla 17.** Comparación de consumo de energía entre 2 a 3 usuarios.

	Potencia (kW)	N° de equipos	Horas de consumo por día	Días de consumo al mes	Consumo mensual (W)	Ahorro (W)	Ahorro (S/.)	% de Watts ahorrados
<b>Terma eléctrica</b>	1500	1	2.5	30	112500	60000	16.08	53.33
<b>Calentador propuesto</b>	3500	1	0.5	30	52500			

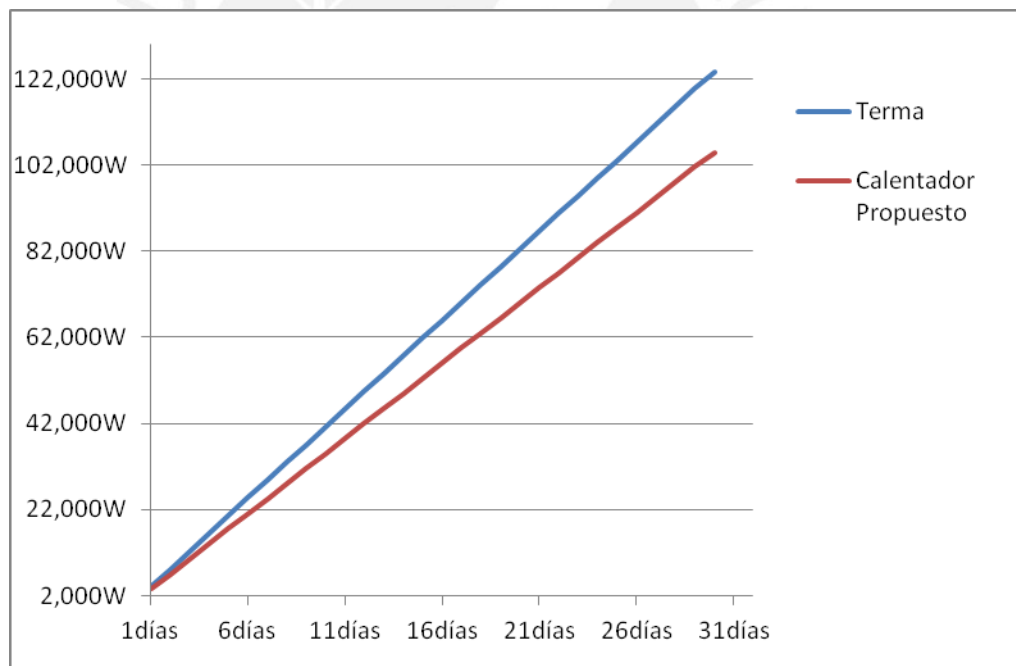


**Figura 49.** Gráfica comparativo de consumo de energía (W) mensual entre calentadores para 2 a 3 usuarios.

En la tabla 18, se muestra un cuadro con la comparación del consumo de energía entre 3 a 5 usuarios.

**Tabla 18.** Comparación de consumo de energía entre 3 a 5 usuarios.

	Potencia (kW)	N° de equipos	Horas de consumo por día	Días de consumo al mes	Consumo mensual (W)	Ahorro (W)	Ahorro (S/.)	% Watts ahorrados
<b>Terma eléctrica</b>	1500	1	2.75	30	123750	18750	5.025	15.15
<b>Calentador propuesto</b>	3500	1	1	30	105000			



**Figura 50.** Gráfica comparativo de consumo de energía (W) mensual entre calentadores para 3 a 5 usuarios.

#### 4.5. Tabla de Costos

En la tabla 19, se muestra un cuadro con los costos de los componentes del sistema.

**Tabla 19.** Tabla de costos de los componentes del sistema

Item	Descripción	Precio S/.
1	Componentes electrónicos	30
2	Transformador	25
3	Display LCD	28
4	Microcontrolador	8
5	Circuito Impreso	60
6	Chasis con Resistencias Eléctricas	200
7	Sensor de Temperatura	0.2
8	Blindaje del sensor	10
	<b>Total</b>	<b>361.2</b>

En la tabla 20, se muestra un cuadro con los costos de diseño e implementación del sistema

**Tabla 20.** Tabla de costos de diseño e implementación del sistema

Item	Descripción	Precio S/.
1	Programación del controlador	100
2	Diseño de circuitos electrónicos	100
3	Costos por implementación y pruebas	100
4	Costo horas hombre (S./ 25 por hora para 100 horas)	2500
	<b>Total</b>	<b>2800</b>

Las tablas mostradas anteriormente muestran detalladamente el costo de la mano de obra y el costo de los materiales involucrados en el diseño e implementación del sistema. El costo total de desarrollar el proyecto es 3161.2 nuevos soles.



## CONCLUSIONES

Del trabajo realizado en este documento de tesis se concluye lo siguiente:

1. El empleo de un controlador difuso, con resistencias eléctricas, logró establecer el valor de la variable temperatura en un máximo de 12 segundos (en contraste a los 20 segundos que tardo en calentar el agua sin controlador), con lo cual se disminuyó el consumo de energía eléctrica en un 50 %, si el número de usuarios está entre 2 y 3, y en un 15 % si el número de usuarios está entre 3 y 5, en comparación a los calentadores de almacenamiento. Además, se consiguió como máximo desperdiciar 0.75 litros de agua al encender el calentador.
2. El sistema implementado presentó otros beneficios a nivel del usuario, tales como disminuir el espacio, evitar la instalación de tuberías adicionales y ofrecer agua caliente ilimitada. Estos resultados se lograron al calentar el agua conforme esta va circulando, en contraste con calentarla dentro de un tanque, obteniendo así un sistema que se adapta al ritmo de uso del usuario. Cabe mencionar que la tarjeta de control ocupa un espacio de  $11 \times 11 \text{ cm}^2$ , el cual puede ser reducido si se usan componentes de montaje superficial, con lo cual se reduce más el espacio del calentador.
3. El uso de un controlador difuso resultó ser sencillo de configurar y diseñar, debido al trabajo con funciones de pertenencia y reglas difusas, y al reducido uso de modelos matemáticos complejos del proceso a controlar. Además, el sistema de control por lógica difusa resulta ser más robusto ante perturbaciones, como un cambio de flujo, logrando el establecimiento de la variable en un máximo de 12 segundos según curvas de respuesta muestreadas por la PC.
4. El sistema puede operar en climas similares al de la ciudad de Lima, ya que el sensor y el controlador pueden trabajar en un rango de 0 a 50 °C, y las resistencias pueden calentar el agua de entrada en un máximo de 20 °C. En el caso de climas drásticos, como el de Puno, se deben

cambiar las resistencias eléctricas por unas de mayor potencia para que se obtengan valores de temperatura adecuados para el usuario.

5. El uso de un diodo para el sensado de la variable temperatura resultó ser una solución muy económica. Además, proporcionó una resolución de muestreo de  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$  al microcontrolador, lo cual permitió que este trabaje con mayor información, logrando así una resolución final de  $0.1$  grados de la variable de control, lo cual es aceptable para tener un buen control de esta variable.
6. El empleo del control, basado en un microcontrolador, permite programar el comportamiento de este y computarlo por medio de una interfaz en una PC, sea un simulador por base de datos o en tiempo real.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acoplamiento de ADC y DAC  
William Neris, Maite Orama  
(Consultado el 18/04/2010)  
<http://www.oocities.org/fisiclady1/AcoplamientoDeADCyDAC.pdf>
- [2] Amplificadores Operacionales  
(Consultado el 18/04/2010)  
[http://www.ifent.org/temas/amplificadores\\_operacionales.asp](http://www.ifent.org/temas/amplificadores_operacionales.asp)
- [3] Barajas Mora, Leandro Giovanni y Barón Duarte, María Del Pilar  
1998 Sistema De Control Integrado Neurofuzzy  
Proyecto Curricular De Ingeniería Electrónica
- [4] Bjev fabricaciones.com.pe  
(Consultado el 18/04/2010)  
<http://www.bjev fabricaciones.com.pe/b/b-j-v-fabricaciones-de-resistencias-electricas-s-r-l-300602/resistencia-tipo-tubular>
- [5] Calentadores y calderas ag.iespana.es  
(Consultado el 18/04/2010)  
<http://calentadores y calderas ag.iespana.es/calorex.html>

- [6] Cielo-verde.com  
(Consultado el 18/04/2010)  
<http://cielo-verde.com/DescripcionPaquete2.aspx>
- [7] Corporacionlaser.com.pe  
(Consultado el 18/04/2010)  
<http://www.corporacionlaser.com.pe/s/corporacion+resistencias+laser>
- [8] Cosas de mujer.com  
(Consultado el 24/05/2010)  
<http://www.cosasdemujer.com/la-temperatura-del-agua-de-la-ducha/>
- [9] Coward, Andrew H.  
2007 Development of a Model Predictive Controller for Tankless Water Heaters
- [10] Design of Fuzzy Controllers  
(Consultado el 24/05/2010)  
[www.iau.dtu.dk/~jj/pubs/design.pdf](http://www.iau.dtu.dk/~jj/pubs/design.pdf)
- [11] Determinación de parámetros físicos de un flujo de agua procedente de una tubería doméstica.  
(Consultado el 18/04/2010)

<http://es.scribd.com/doc/40554912/determinacion-de-parametros-fisicos-de-un-flujo-de-agua-proveniente-de-una-tuberia-domestica>

- [12] Fundamentals of Heat and Mass Transfer  
Incropera, DeWitt, Bergman, Lavine
- [13] GALINDO, Jose.  
2006 Fuzzy Databases: modeling, design and implementation  
Idea Group Inc (IGI), 320 páginas
- [14] GoogoBits.com  
(Consultado el 20/05/2010)  
<http://www.googobits.com/articles/2437-tankless-water-heaters-modern-technology-to-the-rescue.html>
- [15] Honeywell.com  
(Consultado el 18/04/2010)  
<http://honeywell.com/Pages/Home.aspx>
- [16] lc.fie.umich.mx  
(Consultado el 20/04/2010)  
[http://lc.fie.umich.mx/~ifranco/DATASHEET/sensor\\_temperatura/CONTROL\\_DE\\_TEMPERATURA.pdf](http://lc.fie.umich.mx/~ifranco/DATASHEET/sensor_temperatura/CONTROL_DE_TEMPERATURA.pdf)

- [17] INGEMAR.  
1967 Control Systems  
McGraw-Hill
- [18] Jairo Espinosa, Joos Vandewalle and Vincent Wertz  
Fuzzy Logic, Identification and Predictive Control 2005,  
Springer
- [19] J. Klir, George and Boua Yo  
1995 Fuzzy sets and fuzzy logic. Theory and applications  
Prentice Hall P T R
- [20] Katsuhiko Ogata,  
2003 Ingeniería de Control Moderna  
Pearson Educación
- [21] LEONID, Reznik  
1997 Fuzzy Controllers  
BH NEWNES
- [22] M. Passino, Kevin and Yurkovich, Stephen  
1998 Fuzzy Control  
Addison Wesley Longman, Inc.

- [23] Patricio Grinberg, Juan Pablo Mazzini - Informe V Fuentes  
(Consultado el 18/04/2010)  
[http://focuslab.lfp.uba.ar/public/Electronica/Informes/Fuentes\\_Grinberg-Mazzini.PDF](http://focuslab.lfp.uba.ar/public/Electronica/Informes/Fuentes_Grinberg-Mazzini.PDF)
- [24] Pediatría al día.  
(Consultado el 22/05/2010)  
[http://www.pediatraldia.cl/01PBFULL/banar\\_nino.htm](http://www.pediatraldia.cl/01PBFULL/banar_nino.htm)
- [25] Rashid, Muhammad H.  
1995 Electrónica de Potencia.  
Prentice-Hall International.
- [26] SEARS, Francis  
2005 Física Universitaria  
Pearson Education
- [27] Tankless Water Heater Buying Guide  
(Consultado el 24/05/2010)  
<http://www.tanklesswaterheaterguide.com/>
- [28] Tec.upc.es  
(Consultado el 18/04/2010)  
[http://tec.upc.es/el/TEMA-2%20EP%20\(v1\).pdf](http://tec.upc.es/el/TEMA-2%20EP%20(v1).pdf)

- [29] Termodinámica Problemas y Aplicaciones en Ingeniería  
2002 Hadzich, M.
- [30] Tuning Of Fuzzy PID Controllers  
(Consultado el 24/05/2010)  
[www.automa.altervista.org/Documenti/fpid.pdf](http://www.automa.altervista.org/Documenti/fpid.pdf)
- [31] Tutorial on Fuzzy Logic  
(Consultado el 24/05/2010)  
<http://www.iau.dtu.dk/~jj/pubs/logic.pdf>
- [32] Ventools.com  
(Consultado el 18/04/2010)  
<http://www.ventools.com/Paginastips/e2.htm>