

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE BIOELECTRÓNICA

Diseño y construcción de un sistema de control de temperatura
para pequeños roedores utilizando un sistema de control basado
en lógica difusa

Tesis que presenta

Luis Yhaser Olmos Torres

para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias

en la Especialidad de

Ingeniería Eléctrica

Director de la Tesis: Dr. David Elías Viñas

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado durante mi estancia de maestría. Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados de Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) por permitirme realizar mi posgrado en esta institución y complementar mi formación académica.

Un especial agradecimiento a mi asesor de tesis, el Dr. David Elías Viñas, quien me ayudó demasiado brindándome su apoyo y consejos durante la maestría, también le agradezco especialmente a Esteban Ruiz Hernández, gracias por su paciencia y su gran apoyo.

A mis sinodales: Dr. Daniel Lorias Espinoza y Dr. Rodolfo Delgado Lezama.

A mi familia: mi mamá Florayansi Torres Reyes y mis hermanos Erick Saúl Olmos Torres y Najla Cossete Olmos Torres, gracias por estar conmigo. A mis abuelos, que estuvieron ahí a pesar de todo. A mi primo Donovan que siempre ha confiado en mí.

A mi amigo Luis Alejandro Rangel López que siempre me dio palabras de ánimo cuando necesitaba y me ha brindado su apoyo cuando he estado en los peores momentos.

A mis amigos de la maestría: Abril Robles, Carlos Ramírez, Javier Vázquez, Armando Contreras, Mireya Carvajal, Walther Meyer, Iván Franco y Daniel Hernández.

A mis compañeros de laboratorio: Emmanuel, Bernardo, Nestor.

Resumen

En este proyecto se presenta el desarrollo de un equipo capaz de controlar temperatura de un animal utilizando un controlador difuso de bajo costo para el uso de monitoreo de y mantenimiento de la temperatura durante registros de bio-potenciales en roedores. Este tipo de equipos son comunes en laboratorios para mantener estables las variables fisiológicas a lo largo de diversos experimentos donde se realiza registro de información. El equipo aquí descrito está pensado para experimentos relacionados con experimentos de valoración bio-potenciales activados en el asta dorsal de la médula espinal de un roedor.

Los instrumentos para control de temperatura disponibles en el mercado constan de dos elementos: controlador y calentador, ambos pueden variar en precio y calidad dependiendo del fabricante y la tecnología empleada, sin embargo, los costos pueden ser muy elevados, por lo que el dispositivo descrito en este documento presenta una alternativa económica con un control aceptable.

Para el desarrollo del equipo, se consideró la técnica de control basado en lógica difusa con el fin de permitir un control más estable, dicho algoritmo de control se implementó en un micro-controlador PIC16F877A, la retroalimentación del sistema se basa en termistores de uso médico y la generación de calor por medio de una rejilla alambre nicrom.

El prototipo fue probado durante experimentos de registro de biopotenciales evocados en el asta dorsal de la médula espinal de roedores. Se valoró su desempeño y se realizaron los ajustes relacionados con ruido eléctrico y estabilidad.

Abstract

This project presents the development of a device capable of controlling temperature through a low cost fuzzy controller for use in temperature monitoring during small rodent bio-potential recording. This type of devices are common in laboratories to keep certain physiological variables stable throughout experiments where data is collected. The device described here is used in experiments focused on dorsal root potentials activated in rodents.

Temperature control instruments available in the market feature two elements: controller and heater. Both elements can vary in prize and quality depending on the manufacturer, the technology employed, and costs can be very high, for that reason the instrument presented here serves as a low cost alternative to those high-end systems.

The instrument's control is based on fuzzy logic in order to get a more stable response. The control algorithm is embedded in a PIC16F877A microcontroller; the system's feedback uses medical thermistors and the heating element is made of a nicrom grill.

To test the prototype's performance and check for possible adjustments related to noise and stability, the device was monitored during experiments where spinal dorsal horn bio-potentials were recorded.

Contenido

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2. ANTECEDENTES	5
2.1 Sensibilidad somatovisceral y dolor	5
2.2 Control de temperatura.....	18
2.3 Equipos Comerciales.....	21
2.4 Control difuso	25
2.4.1 Introducción.....	25
2.4.2 Lógica difusa	27
2.4.3 Conjuntos difusos	28
2.4.4 Operaciones de conjuntos difusos	29
2.4.5 Variables lingüísticas.....	31
2.4.6 Funciones de membresía	33
2.4.6 Lógica difusa aplicada al control	35
2.5 Modulación de ancho de pulso.....	40
2.6 Alambre nicrom	42
2.7 Termistor	43
Capítulo 3 DESARROLLO.....	46
3.1 Planteamiento del problema.....	46
3.2 Justificación.....	46
3.2 Metodología.....	49
3.2.1 Diseño electrónico	50
3.2.2 Diseño de controlador	57
3.2.4 Elaboración del pad.....	74

3.2.5 Chasis y ensamblaje	76
Capítulo 4 PRUEBAS	79
4.1 Pruebas del termistor	79
4.2 Prueba del sistema de control	83
Capítulo 5 RESULTADOS	90
5.1 Discusión	94
Capítulo 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	96
7.1 Trabajo futuro	96
Referencias	98
Anexos	100
A.1 Tabla de referencia para nicrom	100
A.2 Tarjeta principal: circuito y PCB	101
A.3 Circuitos de las fuentes	102
A.3 Código del PIC	103

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El control de temperatura es uno de los procesos más comunes en diversas áreas de la ingeniería que van desde aplicaciones industriales hasta las utilizadas en sistemas biológicos, siendo esto último un fenómeno natural presente en organismos vivos para regular la temperatura interna por medio de diversos mecanismos que en conjunto se denominan termorregulación.

Durante los experimentos y pruebas en animales de laboratorio, es importante monitorear diversas variables fisiológicas, entre ellas la temperatura interna. El dispositivo aquí descrito está diseñado para uso en experimentos donde se lleva a cabo registro de bio-potenciales en el asta dorsal de la médula espinal de ratas, donde cambios en la temperatura pueden afectar el resultado al añadir perturbaciones debido a actividad anómala en la raíz dorsal [1]. Además, ratas y ratones bajo anestesia tienen dificultad para regular su temperatura interna presentando un riesgo de hipotermia [2], por lo que es necesario un método para aumentar la temperatura interna del animal y mantenerla en el nivel adecuado.

En el mercado existen gran variedad de dispositivos que son utilizados y que constan de dos partes principales: controlador y elemento de calefacción, de los cuales existen diversas variantes de ambos elementos con una gama de precios que dependen de la tecnología empleada en su diseño y construcción. Los instrumentos de control y los métodos de calefacción pueden variar en cuanto a precisión, exactitud y adaptabilidad dependiendo la aplicación.

El dispositivo propuesto consta de dos sensores para monitoreo de la temperatura: la interna del roedor y temperatura del calentador.

En cuanto a la parte de control, se propone un controlador difuso con el fin de permitir una buena exactitud, y menor sobretiro “overshoot”, más versatilidad en cuanto al

control de una variable que no es lineal en el rango de temperatura empleado para experimentos fisiológicos.

Por otro lado, el elemento calentador propuesto es un alambre nicrom que presenta ventajas en cuanto a costo y facilidad de control en comparación con otros métodos de generación de calor. El calentador es parte de una cama o pad que está en contacto con la rata para calentarla por convección.

Al llevar a cabo registros de bio-potenciales es importante tener en cuenta el problema de ruido eléctrico generado por el equipo, principalmente en la cama, la cual está en contacto directo con el roedor y puede reducir la relación entre la señal y el ruido en los registros electrofisiológicos del orden de microvolts.

Los experimentos en los cuales se probó el equipo permitieron observar su desempeño y realizar ajustes de estabilidad y reducción de ruido, éstos ajustes se describen posteriormente.

Objetivo general

Diseño y construcción de un dispositivo basado en lógica difusa para controlar la temperatura de roedores, durante registros de bio-potenciales en el asta dorsal de la médula espinal.

Objetivos particulares

- Diseño del control de temperatura
- Calibración de sensores
- Diseño de cama (pad) de calefacción
- Construcción del equipo

Organización de la tesis

El presente escrito se divide en 6 capítulos los cuales se desarrollan de la siguiente manera.

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se describe brevemente el contenido del escrito, se presenta a grandes rasgos el proyecto a desarrollar y en que consiste la solución propuesta.

Capítulo 2. Antecedentes

Aquí se definen conceptos, técnicas y herramientas matemáticas para la describir el desarrollo de la solución propuesta al proyecto.

Capítulo 3. Desarrollo

En este capítulo se describen detalladamente los pasos y consideraciones de diseño y construcción del prototipo. Se describen: la calibración del sensor, implementación del control embebido y características del calentador.

Capítulo 4. Pruebas

Se presentan las pruebas realizadas al equipo para determinar su desempeño como prototipo antes de su uso en animales

Capítulo 5. Resultados

El prototipo fue probado durante experimentos en pequeños roedores, aquí se presentan los resultados del desempeño del equipo en campo.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro

Se analiza el desempeño del sistema y se proponen posibles mejoras

Capítulo 2. ANTECEDENTES

2.1 Sensibilidad somato visceral y dolor

En este apartado se habla brevemente de la fisiología del dolor, dando información necesaria para comprender los experimentos de registro de bio-potenciales en asta dorsal de la médula espinal de ratas.

La manera en la que el sistema nervioso puede diferenciar entre varios estímulos es un tema complejo que se ha estudiado por mucho tiempo. La expresión “sensibilidad somato visceral” engloba un conjunto de modalidades sensoriales muy diferentes entre sí, pero con una característica común: los receptores implicados no forman órganos de los sentidos, sino que están repartidos por todo el cuerpo [3].

La palabra somático viene del griego soma, que se refiere a ‘cuerpo’ y por lo cual, los receptores en todo el cuerpo dan lugar a los sentidos somáticos. Se distinguen 4 modalidades sensoriales para los sentidos somáticos:

- Dolor (nocivos).
- Temperatura.
- Tacto difuso (tosco, ligero e intenso).
- Tacto fino (discriminaciones precisas en el espacio y en el tiempo, vibración).

Los receptores encargados de llevar cabo la transducción de estas sensaciones son nociceptores, termoreceptores y mecanoreceptores. Para este trabajo, es de principal interés la sensación de dolor, la cual depende de los nociceptores, fibras nerviosas y de varias estructuras del sistema nervioso.

Existen una gran variedad de reacciones a los estímulos dolorosos, incluyendo discriminación de dolor, respuestas motivacionales/afectivas, reflejos somáticos y autónomos, así como cambios endócrinos y emocionales. La transmisión de señales de dolor hacia el cerebro activa circuitos de retroalimentación que pueden inhibir los

efectos de las entradas sensoriales o aumentar las respuestas al dolor a nivel de médula espinal, tallo cerebral o cortical.

2.1.1 Clasificación de los nervios

Dirección de transmisión

Los nervios son clasificados principalmente con respecto a la dirección a la que transmiten información (hacia o desde el sistema nervioso central), aunque también pueden ser sub-clasificados con base a otras características.

De acuerdo a la dirección de transmisión, los axones se separan en tres grupos:

1. **Axones aferentes:** de neuronas sensoriales que conducen señales desde la periferia hacia el sistema nervioso central (SNC), por ejemplo, señales de mecanorreceptores, de dolor.
2. **Axones eferentes:** Conducen señales desde el SNC hacia músculos y glándulas.

Todos los nervios contienen axones aferentes y eferentes

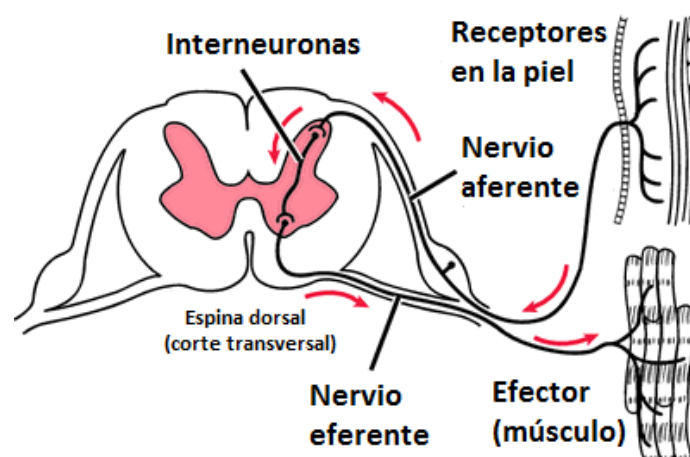


Figura 1. Nervios aferente y eferente en relación a la médula espinal

Diámetro, velocidad de conducción y estado mielinizado

Las fibras nerviosas periféricas se agrupan de acuerdo al diámetro, velocidad de conducción, y el estado de mielinización. Estas clasificaciones aplican a fibras motoras y sensoriales. Se distinguen 3 grupos (A, B y C) de fibras nerviosas.

Grupo A

Las fibras del grupo A se subdividen en 4 tipos ($A\alpha$, $A\beta$, $A\gamma$ y $A\delta$), su principal característica es que son nervios mielinizados, con alta velocidad de conducción.

$A\alpha$: Estas fibras inervan los receptores del huso neuromuscular y el órgano tendinoso de Golgi.

$A\beta$: Actúan como receptores secundarios del huso neuromuscular inervan a los mecanorreceptores cutáneos (principalmente los que detectan vibración y presión)

$A\gamma$: Normalmente son motoneuronas y se encargan de la contracción de las fibras musculares intrafusales, controlan el estiramiento del huso muscular

$A\delta$: Son fibras aferentes que conducen información desde la periferia hacia la medula espinal, tienen menos mielina que las $A\beta$, por lo que tienen una velocidad de conducción menor a las fibras gruesas. Sus terminales no tienen células de Schwann, siendo así un nociceptor muy sensible.

Grupo B

Las fibras del grupo B son mielinizadas con diámetro pequeño y baja velocidad de conducción, menor que las fibras A, pero mayor a las fibras del grupo C. El papel principal de las fibras del grupo B es transmitir información automática (fibras pregangliónicas), también inervan los órganos internos.

Grupo C

Estas fibras no son mielinizadas, tienen un diámetro muy pequeño y baja velocidad de conducción como resultado de la falta de mielina. Los axones se agrupan en ramilletes conocidos como fibras de Remak. Las fibras C se consideran polimodales ya que pueden responder a una combinación de estímulos térmicos, mecánicos y químicos.

Otra manera de clasificar las fibras nerviosas que sólo aplica a los axones sensoriales fue propuesta por Lloyd y Hunt, se enumeran con números romanos del I-IV

Tabla 1. Clasificación de fibras nerviosas

Tipo de fibra	Función de acuerdo al tipo de fibra (Lloyd y Hunt I-IV)	Diámetro (µm)	Velocidad de conducción (m/s)
Aα	(I) Eferente inerva el músculo esquelético, aferentes del huso muscular (Ia) y órganos tendinosos de Golgi (Ib)	11 – 16	60-80
Aβ	Mecanorreceptores aferentes de la piel (II)	6 – 11	30-60
Aγ	Eferentes del huso muscular	1 – 6	2-30
Aδ	Aferentes de la piel (temperatura y dolor “rápido”)		
B	Pregangliónicos simpáticos (aferentes viscerales)	3	3-15
C	Aferentes de la piel (dolor “lento”)	0.5 – 1.5 (no mielinizado)	0.25-1.5

2.1.2 Médula espinal

La médula espinal es la vía de la información que conecta el encéfalo con el cuerpo. Es un cilindro que se extiende desde el foramen mágnum hasta la última vértebra sacra. De la médula espinal nacen 31 pares de nervios raquídeos. El primer par pasa entre el cráneo y la vértebra C1 y el resto lo hace a través de los agujeros intervertebrales. La médula espinal se divide en las regiones cervical, torácica, lumbar y sacra. En un adulto, mide entre 42 y 45 cm de largo. [3, pp. 51]

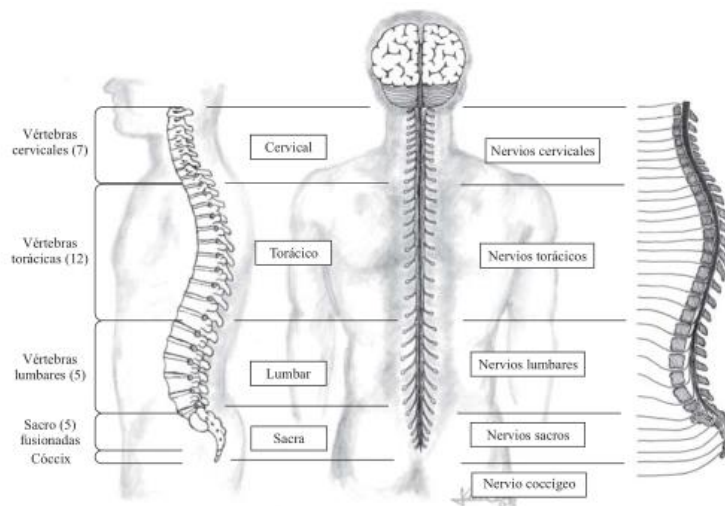


Figura 2. Médula espinal y nervios raquídeos [3]

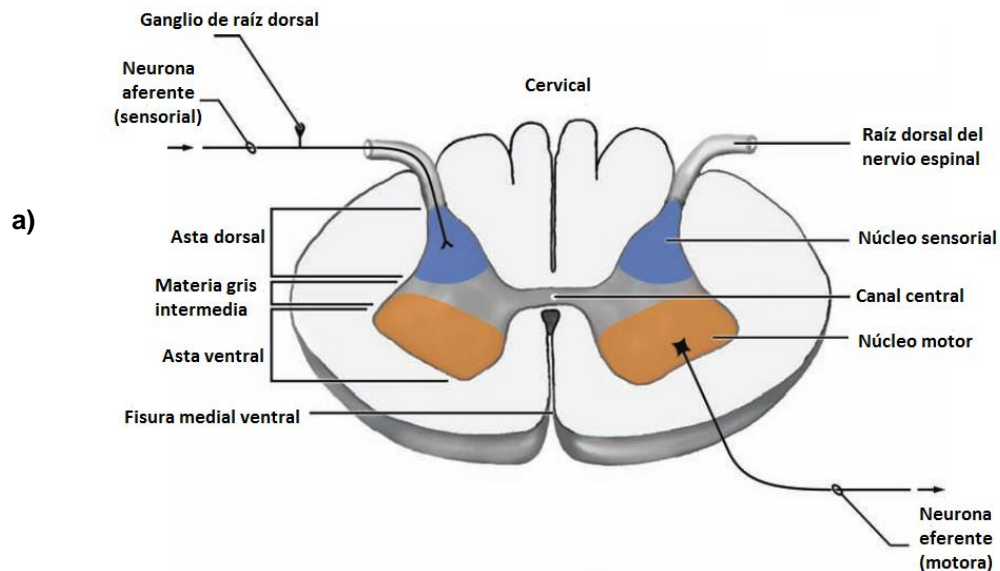
Un corte transversal en la **médula espinal** muestra dos zonas con diferente color, la porción oscura que tiene una forma de H o alas de mariposa, se conoce como sustancia gris, alrededor, el área más clara se llama materia blanca. La diferencia de color se debe a la mielina: la sustancia gris contiene poca mielina ya que concentra somas y dendritas, mientras que la sustancia blanca es abundante en mielina proveniente de los haces de axones.

La médula espinal y el encéfalo están cubiertos por tres membranas de tejido conjuntivo fibroso: las meninges, las cuales separan el tejido suave del sistema nervioso central de los huesos de las vértebras y el cráneo. Desde la más superficial a la profunda se nombran: duramadre, aracnoides y piamadre. [4, pp. 482]

Materia gris

La materia gris yace en el centro de la médula espinal, alrededor está cubierta de materia blanca la cual forma las conexiones desde y hacia toda la médula espinal. La cantidad de materia blanca disminuye conforme las secciones se alejan del cerebro. Los tractos que vienen desde el cerebro, descienden a la materia blanca para así entrar a la materia gris y hacer sinapsis con las motoneuronas. Las fibras sensoriales que entran a la médula, sección por sección, forman las vías ascendentes dentro de la materia blanca.

La materia gris se organiza en las astas dorsal y ventral (también referidos como cuernos anterior y posterior), en las vértebras C8-L2 hay una asta intermedia que contiene las neuronas sinápticas pregangliónicas.



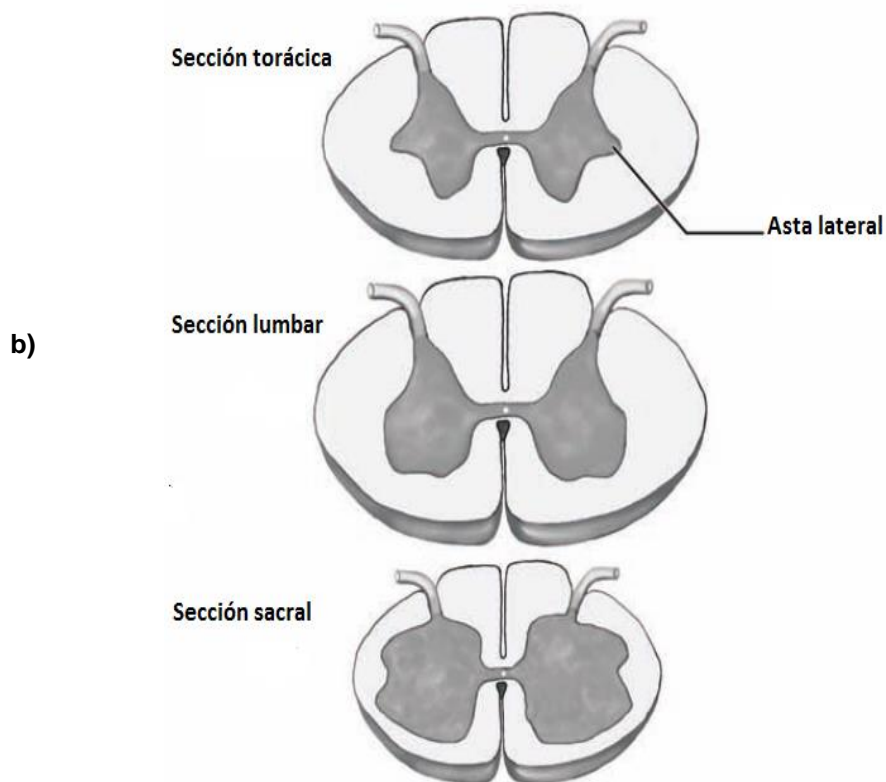


Figura 3. Corte transversal de médula espinal a) partes de la materia gris b) diferencia entre cortes a diferente nivel de la médula espinal [5]

Asta dorsal: la región dorsal de la materia gris, también llamada cuerno o asta posterior, se asocia con la raíz dorsal (de donde vienen fibras aferentes) y por lo tanto a las funciones sensoriales. El cuerpo celular de estas fibras sensoriales se localiza en el ganglio de raíz dorsal (figura 3 No aparecen los ganglios de la raíz dorsal).

Asta ventral: esta región también conocida como cuerno o asta anterior, es donde se localizan entre otras neuronas las motrices (motoneuronas), que se encarga de la activación de los músculos. Las motoneuronas en el asta ventral se comunican con los músculos por medio de fibras eferentes.

El área entre ambas regiones se llama gris intermedia y tiene una variedad de grupos celulares.

Asta lateral: se extiende a lo largo de la región torácica, desde la vértebra T1 hasta L2. En esta zona se alojan las neuronas simpáticas pregangliónicas [5].

Como los segmentos de la médula espinal se pueden reconocer de acuerdo a la cantidad o la forma de la materia gris, además de las áreas específicas que concentran cierto tipo de neuronas, **Rexed** propuso una organización por láminas. La materia gris es entonces dividida en 10 capas: 9 dentro de la medula espinal y una región delgada alrededor del canal central, de esta manera, el asta dorsal incluye a las láminas 1-6, la zona intermedia abarca la lámina 7, y el asta ventral abarca las láminas 8 y 9 [6].

El asta dorsal de la médula espinal tiene neuronas relacionadas inervadas por determinadas fibras aferentes sensoriales, en particular dolor y temperatura, así como tacto 'crudo' [7].

- **Núcleo posteromarginal:** Es el primer núcleo que se puede ubicar, en éste terminan algunos de los aferentes.
- **Sustancia gelatinosa:** Se compone de pequeñas células inervadas por neuronas sensoriales del tipo C, Aδ.
- **Núcleo sensorial propio:** Funciona como sitio de relevo para las fibras aferentes.
- **Fascículo dorsolateral (de Lissauer):** Es un tracto que lleva aferentes con información de dolor y temperatura hacia arriba y abajo de la médula espinal.
- **Núcleo dorsal (de Clarke):** Éste núcleo funciona de relevo para aferentes musculares que se proyectan hacia el cerebelo.

Los nervios que transportan la información sensorial hacia la médula espinal forman sinapsis que cruzan por la parte media de la materia blanca frente a la materia gris comisural (la materia gris que une las dos alas de mariposa), esta área se conoce como comisura blanca ventral.

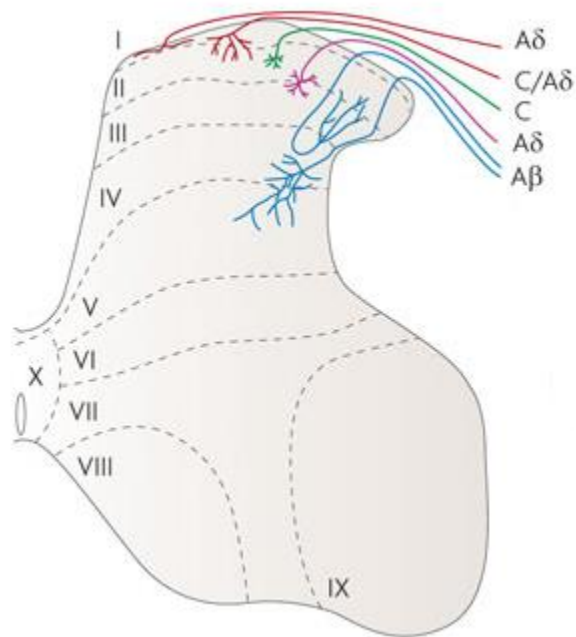
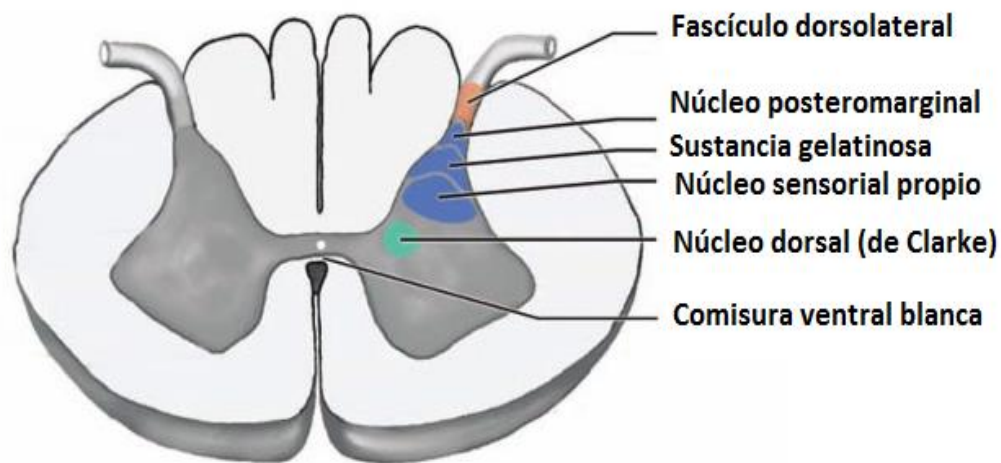


Figura 4. Distintos segmentos de materia gris en la médula espinal [5]

Raíces espinales

Como se vio anteriormente, la materia gris tiene áreas con diferentes tipos de células, de particular interés son las astas dorsal y ventral donde llegan o salen fibras nerviosas (aférentes y eférentes), dichos conjuntos de fibras se conocen como raíces espinales: las raíces ventrales son motoras y emergen de la médula; las raíces dorsales son

sensitivas y llegan hacia la médula. Cada raíz se conforma de un número de fibras convergentes y su disposición difiere de acuerdo al nivel de la médula que se considere. Las raíces anteriores y posteriores de un mismo segmento convergen, fuera de la médula, para formar el tronco del nervio es espinal (también llamado nervio raquídeo) [4, pp. 479-491].

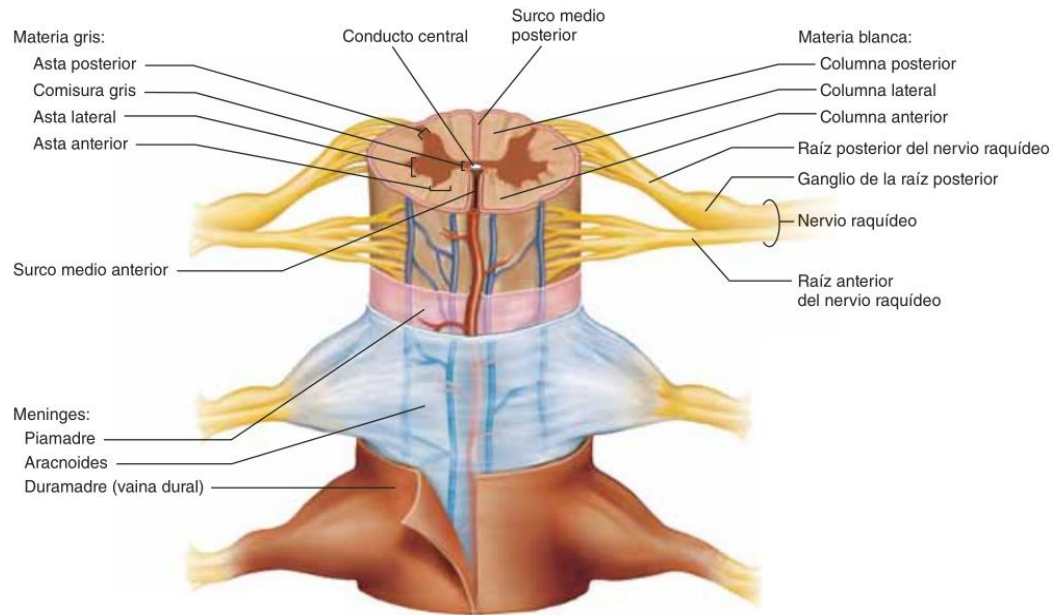


Figura 5. Diagrama de médula espinal mostrando raíces espinales y su ubicación anatómica [4]

La raíz dorsal es de interés para el estudio del dolor ya que las señales periféricas llegan a esta región. Fibras mielinizadas llevan información desde los ganglios dorsales favoreciendo los receptores somáticos, información de tacto, posición y vibración. Después de entrar a la médula, los axones se dividen en procesos ascendentes y descendentes formando ramos colaterales. Los axones mielinizados más grandes tienen terminales en la lámina VII. Las fibras que transportan información acerca de daños en tejido, temperatura y tacto ligero, entran al tracto de Lissauer. Los axones de Lissauer entran a las láminas de Rexed I, II y III [6, pp. 61-63].

Ganglio de raíz dorsal

Un ganglio es un grupo de neurosomas fuera del SNC y se halla envuelto en un epineurio (capa más externa del nervio) que se continúa con el del nervio. Entre los neurosomas hay haces de fibras nerviosas que entran y salen del ganglio. El ganglio nervioso de la raíz posterior contiene los somas de neuronas sensitivas unipolares que conducen señales de órganos de los sentidos periféricos hacia la médula espinal. [4, pp. 490].

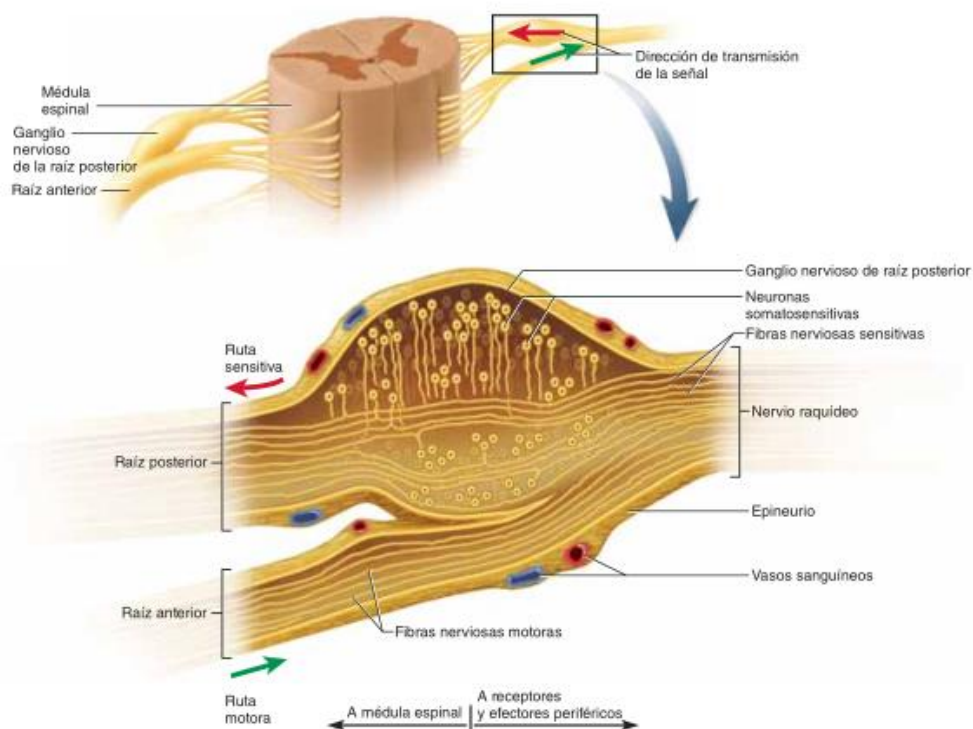


Figura 6. Ganglio de raíz dorsal [4]

Nociceptores

La información de los estímulos dolorosos es sensada por los nociceptores (del latín *noceo* que significa dañar y la palabra receptor), estos son terminales nerviosas especializadas carentes de células de Schwann que cubren piel, músculo, articulaciones, pulpa dental y viseras. Los nociceptores responden a varios estímulos

dañinos y debido a que hay varios tipos, pueden responder de diferente manera de acuerdo a diversos umbrales. Los dos nociceptores principales son los A δ mecánicos y los nociceptores C polimodales.

Los nociceptores mecánicos responden a estímulos mecánicos de alta intensidad, mientras que los polimodales responden a estímulos dañinos mecánicos, térmicos y químicos. Los nociceptores se nombran de acuerdo a los axones que entregan información al SNC.

Un estímulo repentino, como el caso de una quemadura, puede provocar dos formas de dolor diferentes en la piel, al principio, un dolor agudo (primer dolor), después, la sensación de quemazón (segundo dolor). Como se puede predecir, las respuestas de dolor descritas se deben a la diferente velocidad de conducción, de manera que las fibras A δ son responsables del primer dolor y las fibras C del segundo dolor.

En los experimentos de registro de señales en la médula espinal se evocan respuestas estimulando eléctricamente las fibras nerviosas.

Es importante por lo tanto conocer donde terminan las diferentes fibras en la materia gris, sin embargo, lo que se sabe hoy en día acerca de neuroanatomía se basa principalmente en experimentos en ratas, gatos y monos [8].

La bioquímica de los nociceptores y los mecanismos de inflamación neurogénica van más allá del alcance de este trabajo, sin embargo, son una parte importante en el estudio del dolor.

2.1.3 Reflejo de raíz dorsal

El reflejo de raíz dorsal (RRD) es una descarga de potenciales de acción antidrómicos que se activan en las terminales de las fibras aferentes que corren en las raíces dorsales. Éste fenómeno ha sido estudiado desde 1891 por Gotch y Horsley. La estimulación de raíces dorsales y fibras aferentes pueden producir los RRD que a su vez provocan ciertos efectos periféricos [9].

A lo largo de la historia, se han estudiado los efectos del reflejo de raíz dorsal y su papel en la inflamación neurogénica [10]. En un principio se creía que debía haber ciertas condiciones para que el fenómeno pudiera ocurrir (médula a temperatura más baja que la corporal, drogas, etc.), sin embargo, se ha demostrado que es posible registrar RRD a temperatura ambiente [11].

Los estudios que se realizan recientemente relacionados con los RRD buscan encontrar la relación del fenómeno con los efectos periféricos y los posibles neurotransmisores y fibras nerviosas involucradas.

El circuito de asta dorsal que produce los RRD involucran dos tipos de neuronas ubicadas en el asta dorsal: neuronas excitatorias (glutamatérgicas) e inhibitorias (GABAérgicas). Las vías de transmisión para información nociceptiva hacia las neuronas de proyección involucran receptores NMDA glutamatérgicos. La manera en la que se pueden registrar señales es exponiendo la médula espinal e introduciendo electrodos con los cuales las señales analógicas son procesadas y analizadas con equipos y software especializado.

La electro-estimulación se puede llevar a cabo en diversas fibras aferentes (A δ y C) exponiendo algún nervio (como por ejemplo el nervio tibial) para evocar un RRD.

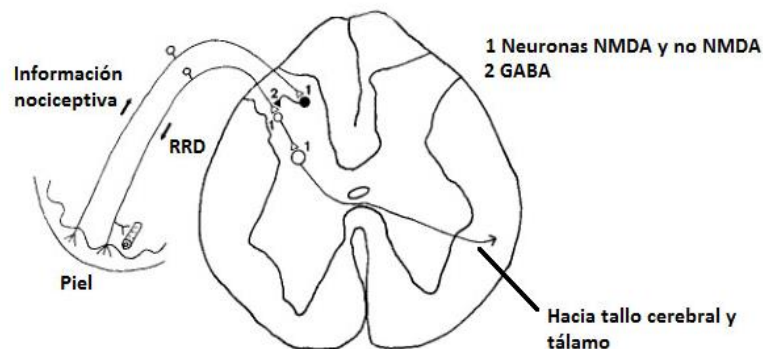


Figura 7. Diagrama con modelo de control periférico y transmisión de información nociceptiva

[12]

En la figura 7, se ilustran dos fibras nerviosas aferentes con, en particular, durante varios experimentos se utiliza una inyección de capsaicina, aunque es posible estimular eléctricamente a la fibra nerviosa en algún punto medio. En la figura se puede ver que una fibra aferente lleva una señal hacia la periferia (RRD).

Los experimentos realizados que sirven como motivación para este trabajo consisten en producir RRD por estimulación de fibras aferentes A β y C del nervio tibial. Los RRD se registran en las raíces dorsales 3, 4 y 6. Estos reflejos se facilitan cuando la temperatura del animal está por debajo de la fisiológica (37 °C). Por esta razón para estudiar estos reflejos en animales con dolor crónico es muy importante mantener el animal a una temperatura de 37 °C.

2.2 Control de temperatura

Sistema de control

Los sistemas de control se pueden encontrar en todas partes como por ejemplo los sistemas dentro del cuerpo humano para mantener homeóstasis, uno de ellos, la termorregulación en humanos es posible gracias a un sistema de control complejo regulado desde el hipotálamo [13].

Un sistema de control es aquel que tiene como propósito mantener una variable en un valor deseado (set-point) sin importar posibles perturbaciones, se basa en medir el valor de la variable a controlar y aplicar una señal de control en el sistema de actuadores de tal manera que se corrija o limite la desviación entre el valor medido y el valor deseado (a esta desviación se le llama *error*) [14].

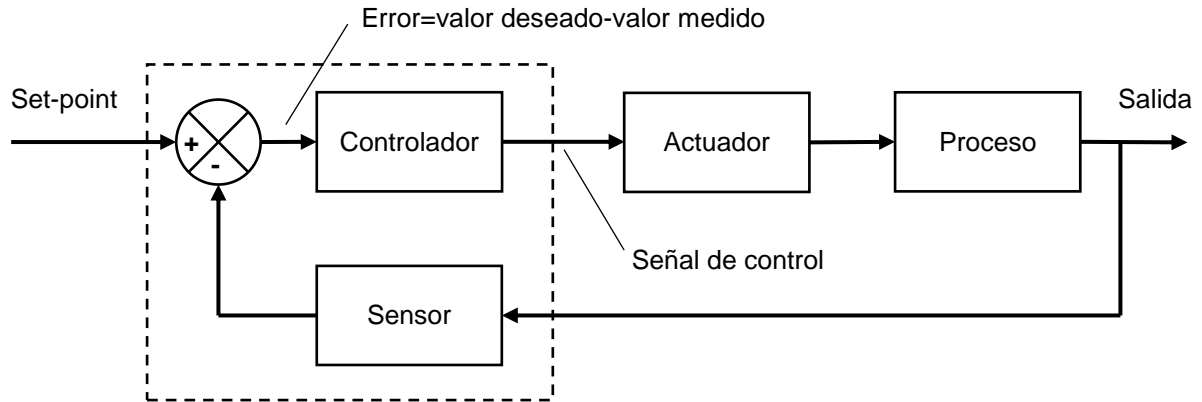


Figura 8. Diagrama de bloques de un sistema lazo cerrado

El diagrama de bloques de la figura 8 muestran gráficamente en que consiste un lazo de control cerrado ideal (no se consideran perturbaciones ni adaptadores de señal) típico. La salida se refiere a la variable a controlar, cuyo valor es retroalimentado al sistema comparándolo con el valor deseado para determinar un valor apropiado de la señal de control que gobierna a un actuador.

El controlador determina la señal de control basado en la señal de entrada y la señal de retroalimentación, existen diferentes métodos para determinar esta señal. Los controladores se pueden clasificar de acuerdo a la acción que realizan y el control clásico define los siguientes:

1. Controladores on-off
2. Controladores proporcionales
3. Controladores integrales
4. Controladores proporcionales-integrales (PI)
5. Controladores proporcionales-derivativos (PD)
6. Controladores proporcionales-proporcionales-integrales-derivativos (PID)

Actualmente existen además otras técnicas de control como los controladores difusos, y otras técnicas de inteligencia artificial, la decisión en cuanto a cuál utilizar depende de factores como el costo y la aplicación. Dado que actualmente se emplean

dispositivos de conversión analógico-digital, el diseño del controlador se puede hacer con ayuda de software especializado e implementarlo por medio de tarjetas especiales o programando un sistema embebido.

Calentadores y sensores

En el caso de un sistema de control de temperatura el proceso puede ser biológico, industrial, químico, etc. La manera en la que se puede controlar la temperatura es manipulando algún elemento actuador, puede tratarse de algún elemento que pueda influir en la manera en la que se genera o disipa calor, por ejemplo, un horno convencional puede calentar por medio de un quemador alimentado por un flujo de gas, éste flujo puede ser controlado manipulando alguna válvula, otro caso son los intercambiadores de calor, que dependen del flujo de fluidos como agua o aceite controlado a través de válvulas.

Los elementos eléctricos para generar calor que se basan en efecto el efecto Joule para convertir energía eléctrica en energía calorífica, y existen diversas tecnologías que aprovechan éste fenómeno para distribuir calor no sólo por convección, sino de forma radiación electromagnética. Estos elementos pueden controlarse a través de dispositivos electrónicos manejadores de potencia, por ejemplo, relevadores y transistores que limitan el flujo de corriente actuando como switch. Una forma de disipar calor común es utilizar ventiladores en el sistema permitiendo mejor desempeño del sistema.

La parte del monitoreo de temperatura es posible con el uso de sensores que se adecuen a las condiciones de operación como el área de trabajo, rangos de temperatura y versatilidad, los sensores más utilizados son:

- *Termistor*: sufre un cambio en el valor de resistencia cuando es expuesto a cambios de temperatura.

- *RTD*: al igual que el termistor, cambia su valor de resistencia en función de la temperatura, sin embargo, es de respuesta más lineal y menor sensibilidad térmica.
- *Termopar*: producen un voltaje que depende de la temperatura por efecto Seebeck. Este tipo de sensor tiene un rango de operación muy grande, además de respuesta rápida.

De los sensores antes mencionados, ninguno necesita estar en contacto directo con el fenómeno y cada uno posee diferentes rangos de operación y diferentes características como sensibilidad, precisión y exactitud entre otras. Debido a la gran cantidad de variantes, el diseñador debe consultar tablas y hojas de datos para el desarrollo de instrumentos de medición.

2.3 Equipos Comerciales

En el mercado existen gran variedad de equipos que cumplen con la función de controlar la temperatura, como se mencionó anteriormente, constan de dos elementos: controlador y calentador. Estos instrumentos se pueden adquirir en diferentes precios y diferentes marcas, cada equipo puede variar en cuanto a la manera en la que se lleva a cabo el control y la manera en la que se genera calor en la cama o “pad”.

Algunas marcas populares son: Kent Scientific, Stoelting y WPI, entre otras. En sus sitios web se puede acceder a varios catálogos de equipos para investigación en animales y encontrar equipos que se adecuen a las necesidades del investigador. Cabe mencionar que en ocasiones se debe recurrir a distribuidores autorizados ya que no disponen de venta individual, en sitios web como www.fishersci.com y www.parklandscientific.com se pueden encontrar diferentes marcas, como se ha mencionado, los distintos controladores y pads cuentan con diferentes tecnologías y técnicas para controlar la temperatura.

Controladores

Los controladores son los dispositivos que cuentan con entradas para sensores (sonda de monitoreo para temperatura interna del animal y sensor de pad) y salida de alimentación para los pads. Interpretan las señales provenientes de los sensores y emiten la señal de control adecuada. Los controladores difieren en el rango y resolución de temperatura que pueden monitorear (dependiente de los sensores utilizados), cantidad de sensores que soportan, la técnica de control, dimensiones, potencia y algunos otros factores eléctricos.

Tabla 1. Comparación de equipos comerciales

Marca	Stoelting	Auber Instruments	WPI	BASi	Kent Scientific
Modelo	53800R	HP-150	ATC2000	FHC-40908	RightTemp®
Rango de temperatura	25-45°C	5-50°C	Hasta 45°C	25°C-45°C	-60°- 150° C
Resolución	0.1°C	0.1°C	0.1°C	0.1°C	0.1°C
Alimentación	120/240VCA @50/60Hz	12 VCD	90/264VCA	No especificado	15/24VCD@2A
Voltaje de salida	24VDC@3Amax	12 VCD	10VCD@3A	No especificado	9/20VCD@4.5A
Dimensiones (largoxanchoxalto)	12.7 x 9.65 x 3.8 cm	8 x 3 x 10.7 cm	8.8 x 20.9 x 27.6 cm	No especificado	18.5 x 12.5 x 1.7mm
Exactitud	No disponible	+/- 0.1°C	+/- 0.3°C	No especificado	+/- 0.2° C
<i>Tipo de control</i>	On/Off	PID/PI/PD/P	PID	No especificado	No especificado
Tipo de sensor	No especificado	RTD	RTD/Termopar	Termistor	Termopar
Tipo de calentador	Silicona	Placa metálica	Silicona	Silicona	Calentador infrarrojo
Otras funciones	Si	Si	Si	No	Si
Precio	1,157.19 USD	335.00 USD	498 USD	1650.00 USD	1,975 USD

Cada equipo es compatible con dispositivos de la misma marca, los pad y los sensores varían notablemente y debido a que los equipos son calibrados para ciertos tipos de sensor es casi imposible encontrar instrumentos compatibles universalmente.

En la tabla 1 se comparan algunos de los dispositivos básicos para control de temperatura compatibles con roedores de algunas marcas en donde se pueden ver los precios y algunas características técnicas. Algunos cuentan con pantallas de monitoreo avanzadas y distintas opciones para monitoreo de una variedad de animales, existen otros con display numérico simple y botones para aumentar y disminuir el valor de temperatura deseada. Otra característica que se puede notar es el método de control, la mayoría empleando PID con auto-tuning ya que puede ser fácil de implementar y bastante económico cuando se implementa de manera digital.



Figura 9. Algunos equipos comerciales. De izquierda a derecha y de arriba abajo: FHC-40908, ATC2000, HP-150 y 53800R

Los pad más comunes son de silicona, aunque existen otros más sofisticados como los de aluminio galvanizado y los de calefacción por medio de radiación infrarroja. Generalmente se venden por separado y pueden variar en precio entre 200 - 1000 USD. Otros accesorios como las sondas varían en el rango de 100 – 400 USD.

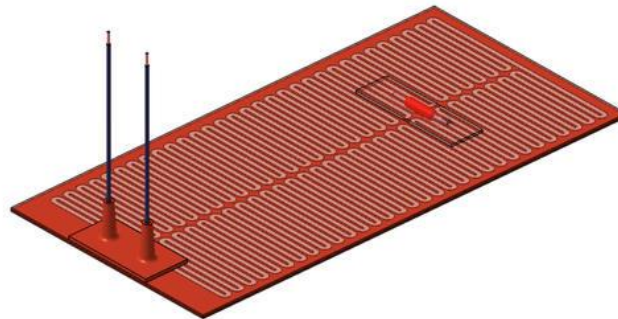


Figura 10. Calentador de silicona

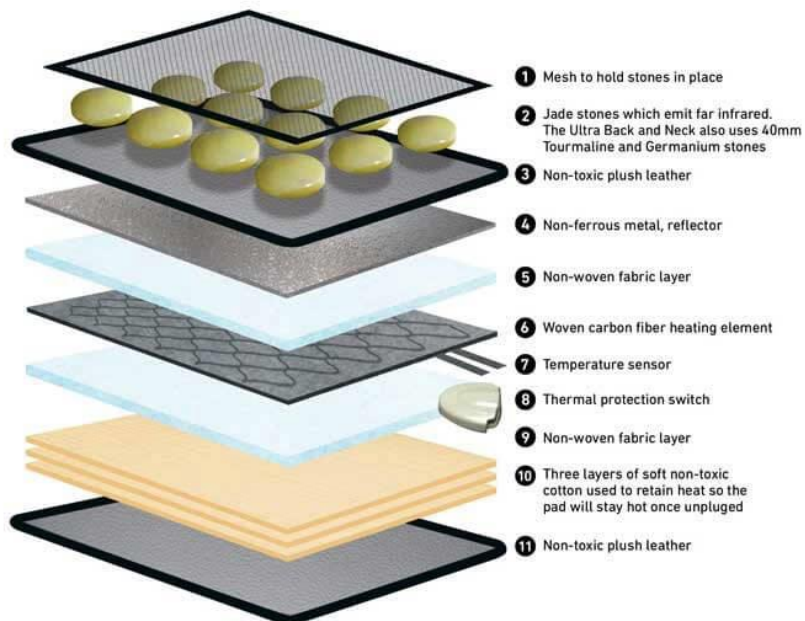


Figura 11. Diagrama de un calentador infrarrojo.

Existen además otras formas de controlar la temperatura por medio de flujo de agua, estos equipos poseen una bomba hidráulica, un sistema de control, display y botones

para seleccionar los parámetros, en la figura 12 se muestra un equipo de la marca kent scientific, modelo HTP-1500 de calentamiento por agua, estos equipos requieren pads especiales compatibles con líquido que pueden ser más económicos.



Figura 12. Controlador y bomba HTP-1500 y los pad compatibles

2.4 Control difuso

El control difuso es un tipo de control que emplea a la teoría de conjuntos difusos propuesta por Lotfi Zadeh en 1965. Es un intento por hacer que las computadoras “entiendan” lenguaje humano y operen de forma como lo haría un humano. Las aplicaciones van desde productos como cámaras, lavadoras, instrumentos biomédicos hasta sistemas inteligentes de soporte en toma de decisiones. La lógica difusa es casi sinónimo de la teoría de conjuntos difusos [15].

2.4.1 Introducción

Un controlador difuso al igual que un controlador clásico como lo es un PID es la parte de un sistema de control cuyo objetivo es mantener una variable en un valor deseado, esto se refleja en un mecanismo capaz de controlar el comportamiento de un objeto de manera automática, sin embargo, no depende de una ecuación establecida como (1), sino que se basa en reglas lingüísticas que se pueden definir por medio de condiciones “Sí-entonces” (if-then).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Donde:

$u(t)$ =señal de control

K_p =ganancia proporcional

$e(t)$ =error

T_i =tiempo de integral

T_d =tiempo derivativo

Las reglas son definidas con base a experiencia y conocimiento de operación del proceso a controlar, por ejemplo, para un proceso industrial se pueden definir reglas basadas en la experiencia del operador.

Si se considera un proceso cualquiera, el operador también conocido como “experto”, es quien toma la decisión sobre qué acción tomar basado en su observación del sistema, por ejemplo, en un sistema de control de nivel de líquido para un contenedor, el experto decide cuando girar una válvula de acuerdo a preguntas como “¿Es el nivel bajo?” o “¿Es el nivel adecuado?”, éstas preguntas pueden contestarse fácilmente por un humano, sin embargo, las computadoras necesitan una manera de entender e implementar términos lingüísticos.

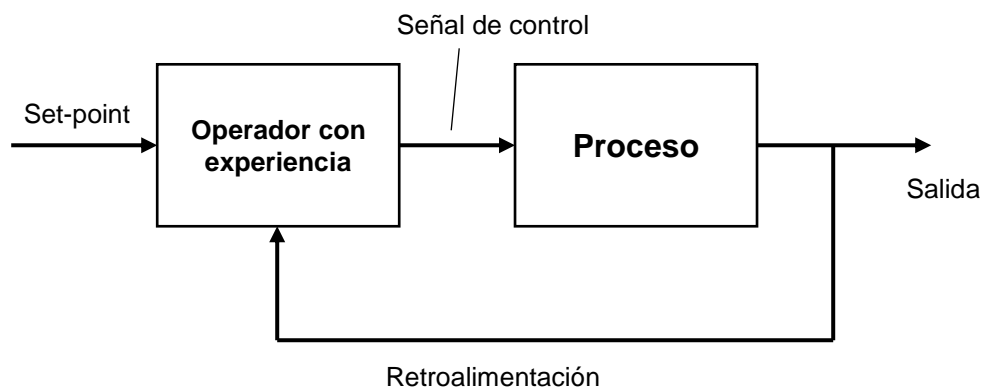


Figura 13. Diagrama a bloques de un sistema de control difuso

2.4.2 Lógica difusa

Los procesos que lleva a cabo una computadora se basan en operaciones lógicas binarias en las que la información es procesada como “verdadero-falso” o “0-1”, estas operaciones booleanas se basan en la teoría de conjuntos clásicos en la que se dice que “un objeto cualquiera o bien pertenece a un conjunto o bien no pertenece a él, no hay término medio”, el enunciado anterior se conoce como la ley del tercio excluso y es parte de los cimientos de la lógica de Aristóteles [16].

La lógica difusa es una extensión de la lógica multivaluada y puede considerarse sinónimo de la teoría de conjuntos difusos, que se refiere a elementos con fronteras de pertenencia “difuminadas” [16], esto quiere decir que un elemento puede pertenecer a un conjunto sólo en cierta medida y por lo tanto puede crear contradicciones presentes en la lógica clásica, por ejemplo, un valor de temperatura puede pertenecer al mismo tiempo al conjunto “templado” y al conjunto “cálido” en un cierto grado de pertenencia a cada uno.

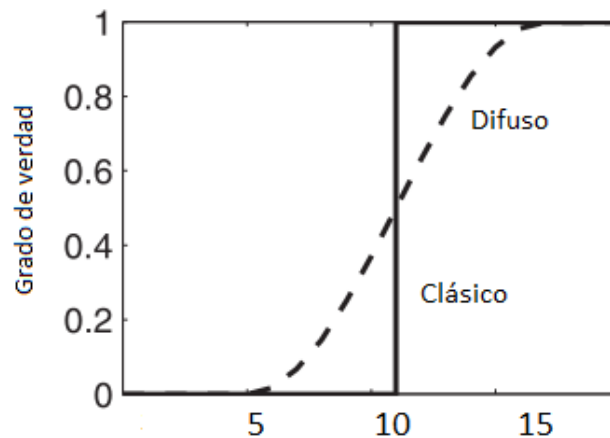


Figura 14. Esquema de conjunto clásico y difuso

Considerando la figura 14, un conjunto clásico define como miembro a los números mayores a 10 dejando fuera a los que sean menores, la frontera es nítida y sólo se puede pertenecer o no. El conjunto difuso por otro lado acepta en cierto grado a números mayores a 5, si se considera por ejemplo el número 8, se puede observar que pertenece al conjunto en un grado de verdad de aproximadamente 0.2, el número

10 tiene un grado de verdad de 0.5 y los números menores a 15 poseen un grado de verdad menor a 1.

2.4.3 Conjuntos difusos

Los conjuntos difusos son un desarrollo matemático que extiende la teoría de conjuntos y es la base de la lógica difusa.

En la teoría de conjuntos clásica se define un conjunto X como una colección de objetos definidos, los cuales es posible determinar si son, o no son, miembros de un conjunto. Los objetos definidos son distinguibles: dados un conjunto y sus miembros, debe ser posible determinar si cualquiera par de miembros son iguales o diferentes. Matemáticamente se pueden describir como $x \in X$, que quiere decir: x es miembro de X , de manera similar, si un objeto no es miembro de un conjunto, se escribe: $x \notin X$. Un conjunto A cuyos miembros son los números enteros en el rango 1-10 se define como:

$$A = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\}$$

En contraste, los conjuntos difusos son una colección de pares ordenados, dada una colección de objetos U , el conjunto difuso A se define como:

$$A \equiv \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (2)$$

Donde:

U : Colección de objetos

x : Objeto en U

$\mu_A(x)$: Función de membresía de x

El término “difuso” se refiere a una frontera que no es nítida, es decir, los miembros de un conjunto pertenecen en un cierto valor de verdad a dicho conjunto. En la figura 15 se muestra la comparación del grado de pertenencia de un objeto desde el punto de vista clásico y difuso.

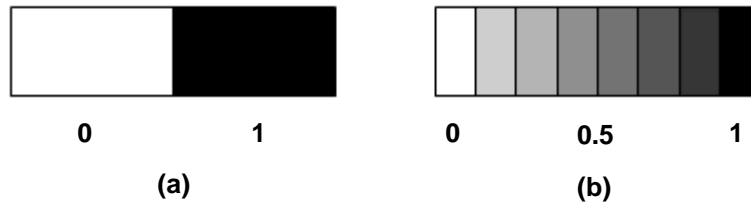


Figura 15. Pertenencia de un objeto en un conjunto clásico (a) y difuso (b).

De la expresión (2) se puede observar que el par ordenado $\langle x, \mu_A(x) \rangle$ corresponde a un objeto x y su respectivo valor de membresía. La función de membresía $\mu_A(x)$ para cada x es un número real en el intervalo $[0,1]$.

2.4.4 Operaciones de conjuntos difusos

Desde el punto de vista matemático, los enunciados se conectan con palabras como “y, o, sí, entonces” llamadas operadores lógicos o conectivos lógicos. Un enunciado precedido por la palabra “no” se llama *negación*. Los operadores ‘y’, ‘o’ unen dos oraciones para formar una conjunción o una disyunción respectivamente. Cuando se quiere implicar algo se utilizan los conectivos ‘sí-entonces’, por ejemplo, “sí hoy hace frío, entonces debo abrigarme”. La parte del enunciado después del ‘sí’ se conoce como el antecedente, la parte después del “entonces” se llama consiguiente.

Los símbolos que representan los conectivos lógicos son:

- \neg representa ‘no’
- \wedge representa ‘y’
- \vee representa ‘o’

Tal y como en el caso de la lógica binaria, en la lógica difusa al comparar dos valores se obtiene una tabla de verdad. Desde el punto de vista binario, una operación de disyunción se puede visualizar como:

Tabla 2. Tabla de verdad de disyunción lógica binaria

A	B	A∨B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Una disyunción difusa por otro lado no depende tan sólo de 0 y 1, en éste caso se tiene una serie de valores en el intervalo $[0,1]$, si se define que $0 \leq u \leq 0.5 \leq v \leq 1$ se puede obtener la tabla 3.

Tabla 3. Tabla de verdad de disyunción lógica difusa

		A∨B				
		B				
		0	u	0.5	v	1
A	0	0	u	0.5	v	1
	u	u	u	0.5	v	1
	0.5	0.5	0.5	0.5	v	1
	v	v	v	v	v	1
	1	1	1	1	1	1

De lo anterior se puede ver que existe cierto patrón, en dónde la comparación del valor A y B tiende al valor más grande o máximo.

Al hablar de conjuntos se habla de colecciones de objetos y las operaciones dependen de las funciones de membresía. A continuación, se presentan las operaciones correspondientes a intersección, unión y negación:

Intersección Difusa

Sea U un conjunto cualquiera y $\mu = [0,1]$ su conjunto asociado de membresía. La intersección difusa de dos conjuntos difusos, $A \in U$ y $B \in U$, se define como:

$$\mu_{A \wedge B}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)), \quad \text{para todo } u \in U \quad (3)$$

La intersección (o conjunción) difusa se lee como ‘y’ difusa, a partir de 2 valores de membresía, el resultado de la operación será igual al menor valor.

Unión difusa

Sea U un conjunto cualquiera y $\mu = [0, 1]$ su conjunto asociado de membresía. La unión difusa de dos conjuntos difusos, $A \in U$ y $B \in U$, se define como:

$$\mu_{A \vee B}(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)), \quad \text{para todo } u \in U \quad (4)$$

La unión o disyunción difusa se lee como ‘o’ difusa, como se vio anteriormente, corresponde al mayor valor entre 2 funciones de membresía.

Negación difusa

Sea U un conjunto cualquiera y $\mu = [0, 1]$ su conjunto asociado de membresía. La negación difusa un conjunto difuso $A \in U$, se define como:

$$\mu_{\neg A}(u) = 1 - \mu_A(u), \quad \text{para todo } u \in U \quad (5)$$

Al igual que la negación binaria, se cumple que $\neg(\neg A) = A$

2.4.5 Variables lingüísticas

Los humanos pueden clasificar cosas en términos lingüísticos como “personas altas” o “películas malas”, sin embargo, ¿Qué estatura es considerada “alto” ?, ¿Qué películas pueden ser calificadas como “malas” ?, la respuesta desde el punto de vista

clásico es decidir un valor de referencia, considerando el ejemplo de las estaturas se puede establecer una estatura de 1.80 m como punto de referencia para definir una persona alta, bajo esta premisa, ¿es una persona que mide 1.79 m, considerada alta?, en un sistema lógico binario 1.79 m no se considera alto, ya que no pertenece al conjunto de “personas altas”. El sentido común dice que, a simple vista, personas de 1.79 y 1.80 m son “altas”, para poder hacer que la computadora interprete esta información como lo haría un humano se emplea un conjunto difuso que asigne un valor de membresía a cada estatura en un intervalo razonable.

Se pueden crear un par de conjuntos, uno para definir estaturas medias y otro para estaturas altas, cada conjunto con sus respectivos pares ordenados:

$$\textit{Estatura media} = \{(1.4,0), (1.5,0.75), (1.6,1), (1.7,0.5), (1.8,0)\}$$

$$\textit{Estatura alta} = \{(1.6,0), (1.7,0.5), (1.8,1), (1.9,1), (2,1)\}$$

Con base a los conjuntos anteriores se puede notar que 1.7 m pertenece a ambos en un grado de verdad de 0.5 para cada uno. Si los mismos conjuntos se escribieran como clásicos se tiene:

$$\textit{Estatura media} = \{\dots, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7\}$$

$$\textit{Estatura alta} = \{1.8, 1.9, 2, \dots\}$$

En esta situación 1.7 m sólo puede pertenecer al conjunto de estatura media.

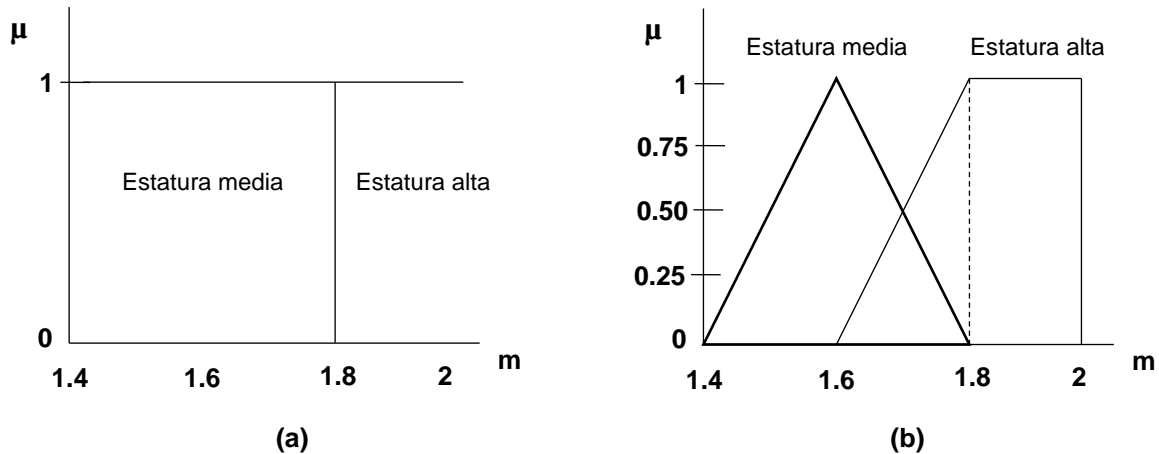


Figura 16. Funciones de membresía de los conjuntos de estaturas media y alta para conjuntos clásicos (a) y difusos (b).

Regresando a la situación en la que se analiza si 1.79 m es considerado un valor perteneciente al conjunto de estaturas altas, en la figura 9 se puede ver gráficamente la manera en la que se puede abordar el problema desde el punto de vista clásico y difuso, en el conjunto clásico la frontera es nítida, 1.79 m no pertenece al conjunto de estatura alta, mientras que, desde el punto de vista de conjuntos difusos, la misma estatura pertenece al conjunto de estatura alta con un grado de verdad muy cercano a 1. De esta manera es posible tener sistemas de control que puedan actuar en base a términos lingüísticos actuando como un sistema de inteligencia artificial.

2.4.6 Funciones de membresía

De la figura 16b se pueden observar 2 funciones de membresía que describen cada conjunto referente a la estatura. Existen diversas funciones de membresía cuyos parámetros pueden variar para ajustarse a la aplicación, algunas de las funciones más comunes son: triangular, trapezoidal y gaussiana. En un sistema de control, entradas y salidas son representadas por una o más funciones de membresía.

Función trapezoidal: es una función lineal que se define por medio de 4 parámetros $\{a,b,c,d\}$, los cuales están limitados de forma que $a \leq b \leq c \leq d$.

$$\mu_{Trapezoidal}(x; a, b, c, d) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & , x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & , a \leq x \leq b \\ 1 & , b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & , c \leq x \leq d \\ 0 & , d \leq x \end{array} \right\}, x \in \mathbb{R} \quad (6)$$

Función triangular: se trata de una variación de la función trapezoidal donde los parámetros b y c son iguales, por lo tanto, se define como:

$$\mu_{Triangular}(x; a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & , x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & , a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & , b \leq x \leq c \\ 0 & , c \leq x \end{array} \right\}, x \in \mathbb{R} \quad (7)$$

Función gaussiana: Se define por medio de 2 parámetros {c, σ}

$$\mu_{Gaussiana}(x; c, \sigma) = e^{-0.5\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (8)$$

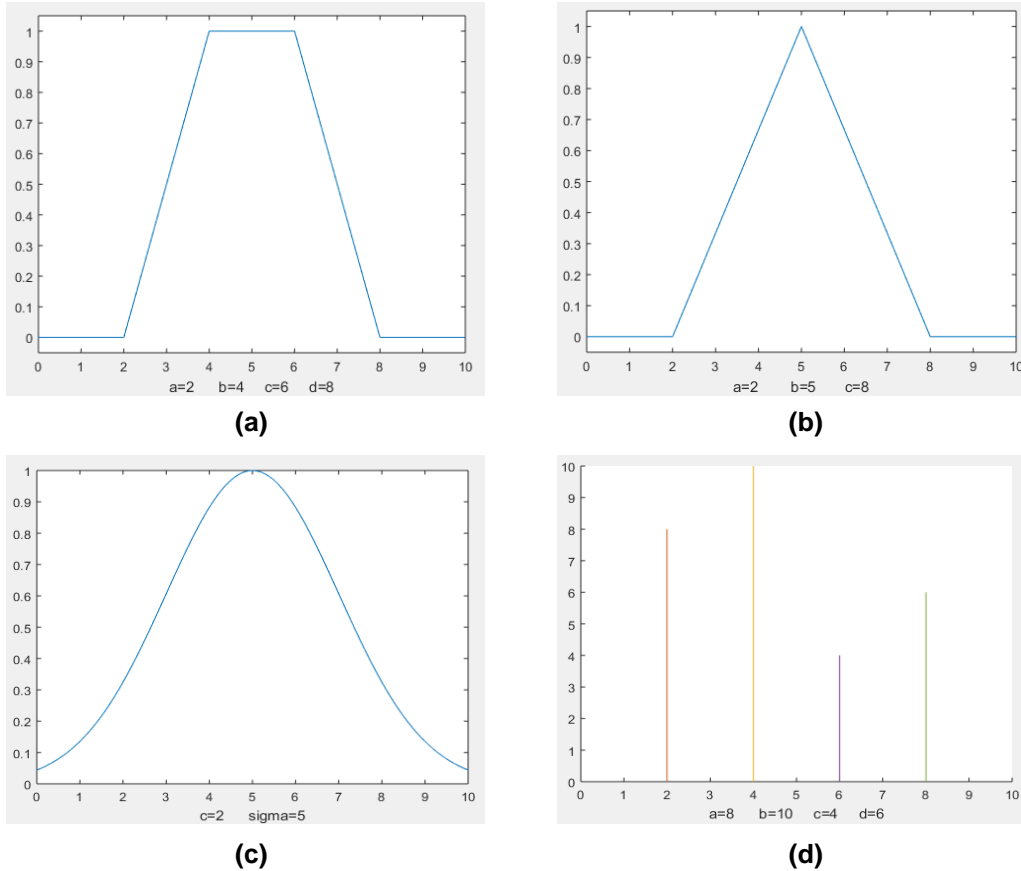


Figura 17. Funciones de membresía trapezoidal (a), triangular (b), gaussiana (c) y singleton (d).

La salida de un sistema puede representarse por líneas verticales conocidas como función singleton o impulsos (figura 17d).

2.4.6 Lógica difusa aplicada al control

El uso de la lógica difusa en los sistemas de control nace de la idea de modelar incertidumbres del comportamiento de un sistema por medio de conjuntos difusos y reglas empíricas e imprecisas. El control difuso se refiere al control a base de reglas, definiendo las variables de entrada y salida del sistema como términos lingüísticos (conjuntos difusos) es posible escribir las reglas de una manera natural de la forma “sí-entonces”.

El controlador difuso consta de tres pasos:

1. Fuzzificación
2. Inferencia
3. Defuzzificación

Se puede pensar en este controlador como trazar un mapa desde un espacio de entradas hacia un espacio de salidas, para ello, las entradas deben ser convertidas en una serie de conjuntos difusos de tal forma que se puedan aplicar reglas y técnicas de inferencia para obtener la salida adecuada. El resultado de la inferencia es otro grupo de conjuntos difusos que debe ser convertido a un valor que corresponda al tipo de señal que ocupe el proceso.

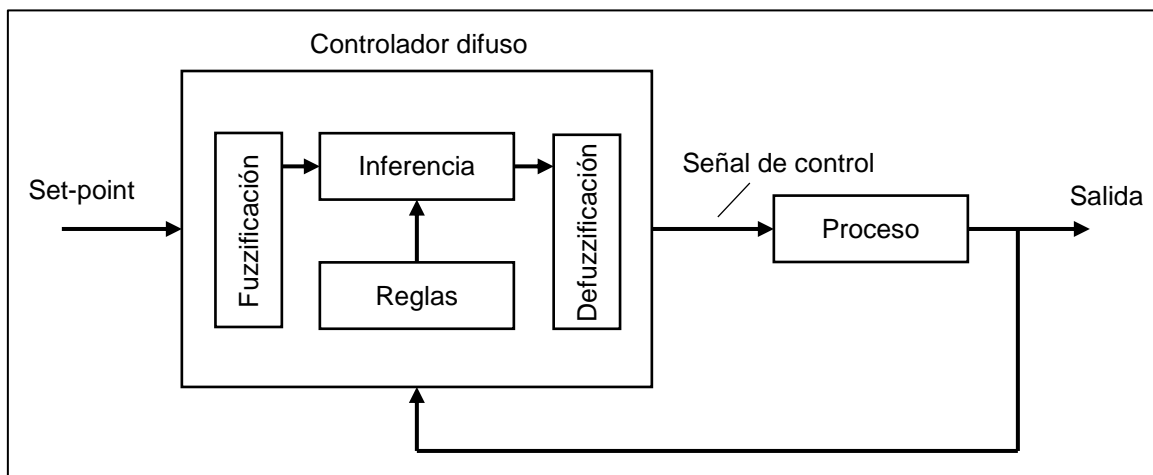


Figura 18. Diagrama a bloques de un sistema de control difuso. El controlador tiene a su vez bloques representando los pasos de Fuzzificación, inferencia y defuzzificación.

Fuzzificación

Las entradas del sistema se conocen como entradas "crisp" o rígidas, los valores provienen de algún subproceso de acondicionamiento de señal en el que los valores de voltaje o corriente representan alguna magnitud física como temperatura, nivel, flujo, etc. La fuzzificación es el proceso por el cual los valores rígidos sufren un cambio de dominio y pueden ser descritos como términos lingüísticos. Los valores que toma la variable rígida en el "dominio difuso" dependen de las funciones de membresía, esto

significa que el diseño del controlador considera un intervalo conocido de la variable de entrada para asignar etiquetas a cada función de membresía. Si, por ejemplo, se tiene una entrada en la que la variable es la velocidad, las funciones de membresía pueden ser “lento, normal y rápido” considerando qué valores de velocidad son los límites inferior y superior del sistema. El sistema puede tener varias entradas con múltiples funciones de membresía

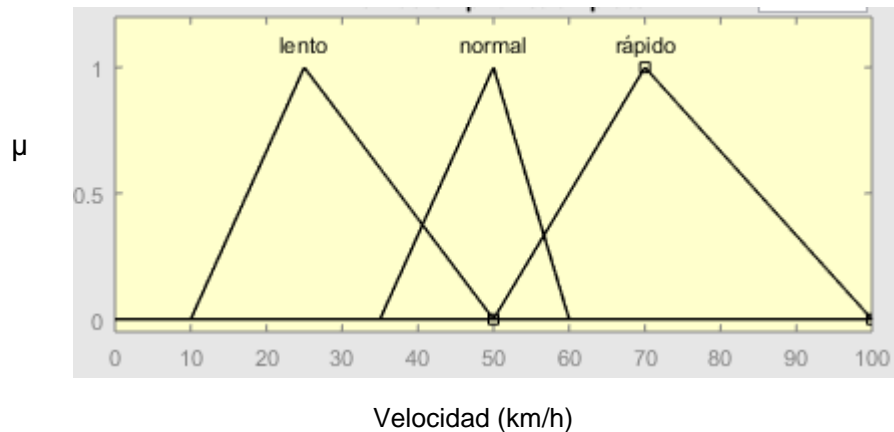


Figura 19. Funciones de membresía de la variable *velocidad*

Inferencia

En este paso se utilizan una serie de reglas lingüísticas establecidas por el diseñador de acuerdo al comportamiento que se desea en la salida. Se definen usando los conectivos lógicos “sí-entonces”, siendo las entradas difusas del sistema los antecedentes y la salida el consecuente. Se utilizan los operadores lógicos ‘y’, ‘o’, ‘no’ como parte de la sintaxis para escribir las reglas:

- “**Si** *A bajo* **y** *B bajo*, **entonces** *C alto*”
- “**Si** *A alto* **o** *B alto*, **entonces** *C medio*”
- “**Si** *A no es alto* **o** *B no es alto*, **entonces** *C medio*”

De las reglas anteriores, A y B son entradas cuyas funciones de membresía pueden ser “bajo” o “alto”, la salida C puede ser “alto” o “medio” de acuerdo a las condiciones establecidas en el antecedente.

La salida o salidas, a su vez, también cuentan con un grupo de funciones de membresía con un intervalo definido por los límites de la señal de control. Si la señal de salida corresponde al tiempo que un interruptor debe estar activado, las etiquetas que se pueden asignar son “corto, medio y largo”.

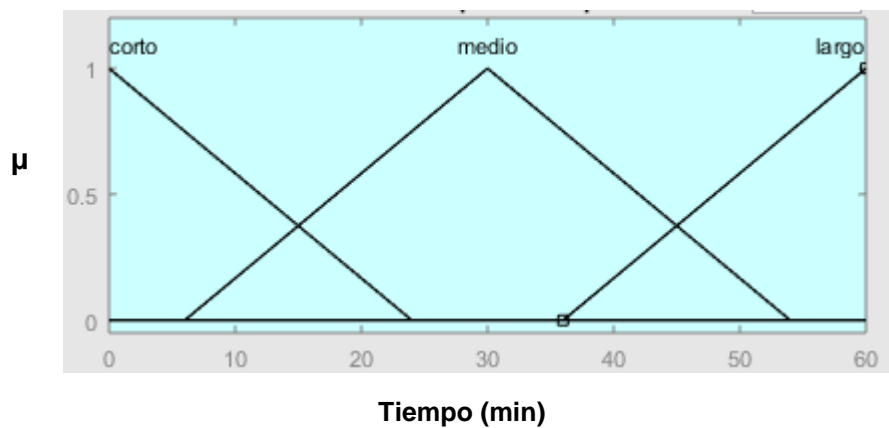


Figura 20. Función de membresía de salida para variable “*tiempo*”

Las operaciones lógicas difusas se pueden resolver con base a las ecuaciones (3), (4) y (5), de esta forma, cuando se comparan dos valores de membresía es posible obtener un valor final que definirá el valor de la regla.

Cuando se evalúan las entradas con la lista de reglas, cada regla termina haciendo referencia a una función de membresía de salida y su respectivo valor o grado de verdad. Dependiendo del método de inferencia es como se elige el valor de regla que gobierna el sistema. Considerando la figura 20, suponiendo que se evalúan 4 reglas, las cuales resultan en lo siguiente:

- Regla 1: Tiempo medio (0.75)
- Regla 2: Tiempo medio (0.25)
- Regla 3: Tiempo largo (0.25)
- Regla 4: Tiempo largo (0.75)

Si se utiliza la inferencia del tipo min-máx., para cada función de membresía de salida se emplea el mayor valor de cada una. Para “tiempo medio” y para “tiempo medio” se utilizaría 0.75. Esta inferencia se llama min-máx. ya que selecciona el mínimo de cada antecedente y el máximo de cada regla.

Defuzzificación

El conjunto difuso de salida obtenido en el proceso de inferencia debe ser convertido a un valor rígido, existen diversos métodos para llevar a cabo este proceso, sin embargo, el más utilizado y que da buenos resultados sin costar recursos computacionales es el método de centro de gravedad (CDG), cuya fórmula es:

$$CDG = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(x_i) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)} \quad (9)$$

Donde:

n : número de niveles de cuantificación

x_i : Valor de salida

$\mu(x_i)$: Valor de membresía correspondiente a la salida

Los valores de regla definen la región que se considera para la cuantificación de la salida rígida. Si se tiene una regla de salida para tiempo medio de 0.5 y una regla de 0.25 para tiempo largo a partir de la figura 20, las funciones de membresía de salida se cortan como en la figura 21.

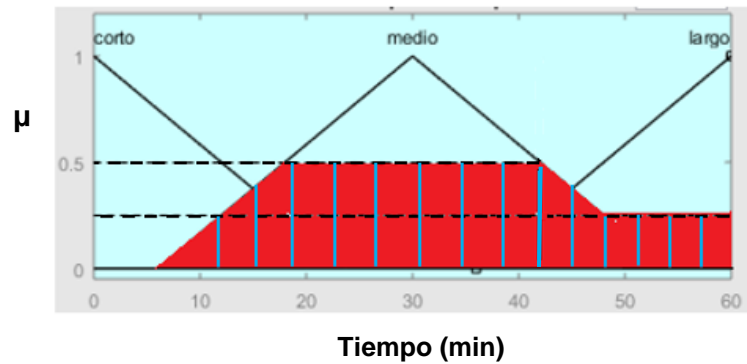


Figura 21. Función de membresía de salida limitada por valores de regla.

La exactitud de cuantificación depende de la cantidad de muestras, las líneas azules indican los valores que en la fórmula (9) corresponden a $\mu(x_i)$ (eje vertical) y x_i (eje horizontal).

2.5 Modulación de ancho de pulso

Modulación de ancho de pulso o PWM (del inglés Pulse-width Modulation) es una forma de entregar energía a través de una sucesión de pulsos en lugar de una señal analógica continua. La manera más básica de conseguir una señal de pulso modulado es utilizando un amplificador operacional comparando dos señales de tal forma que la señal de salida se mantenga en un nivel de saturación con respecto a la comparación de ambas.

La modulación de ancho de pulso permite cambiar la proporción que la señal se mantiene en nivel alto comparado con el nivel que está en el nivel bajo. Esta proporción se conoce como “duty cycle” (ciclo de trabajo). El duty cycle describe el tiempo que la señal está activa en un determinado periodo de tiempo. El periodo del duty cycle es equivalente a la frecuencia de la señal.

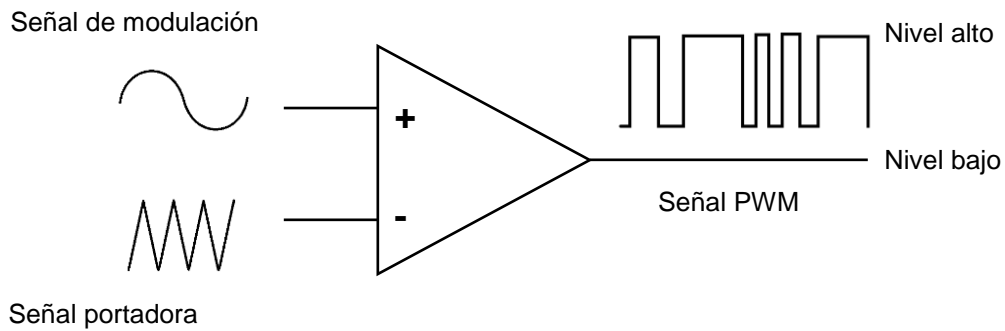


Figura 22. Funcionamiento de un PWM: Comparador de señal moduladora y señal portadora.

Debido a que señal de un PWM es una señal digital, su aplicación se extiende al control de LED's, motores, resistencias, audio y muchas otras, aunque es importante mencionar que es necesario un circuito manejador de potencia para muchas de estas aplicaciones. Actualmente, existen circuitos integrados que facilitan el manejo del PWM, además, gran cantidad de microcontroladores cuentan con módulos PWM para aplicaciones de control embebidas.

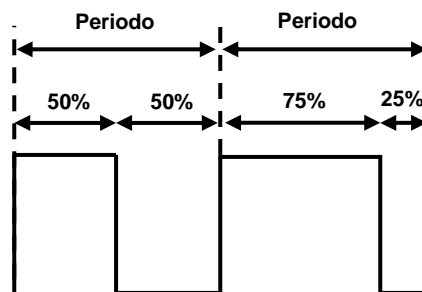


Figura 23. Duty Cycle.

El duty cycle se puede calcularse por medio de la siguiente ecuación:

$$Duty\ cycle = \frac{T_{on}}{(T_{on}+T_{off})} * 100\% \quad (10)$$

Donde:

T_{on} : Tiempo en nivel alto

T_{off} : Tiempo en nivel bajo

2.6 Alambre nicrom

El alambre nicrom (NiCr) es una aleación de níquel y cromo (normalmente también se utilizan otros metales como parte del proceso de aleación) que normalmente se utiliza como resistencia eléctrica. La aleación más común es un 80% níquel y 20% cromo. Su temperatura de fusión es cercana a los 1100 °C [18]. Posee gran dureza, ductilidad, resistencia a oxidación, estabilidad a altas temperaturas y su costo de producción es muy bajo.



Figura 24. Alambre nicrom

Una de sus aplicaciones más comunes es como elemento caliente; al hacer pasar una corriente a un voltaje controlado, el nicrom se calienta hasta llegar a cierta temperatura y puede utilizarse para sistemas de ignición, cortadores de unicel o el elemento que calienta en aire en una secadora.

Los diferentes valores de resistencia por unidad de longitud para diferentes calibres se pueden encontrar en tablas como la del anexo A.1.

Los cálculos para encontrar la corriente y voltaje para diferentes temperaturas se pueden resolver por simple ley de ohm. Dado un valor de resistencia se puede estimar un valor deseado de corriente de acuerdo a las tablas, por ejemplo, un alambre AWG 20 necesita una corriente de 3.8 A para llegar a 205 °C a partir de la temperatura ambiente 20 °C.

Restando la temperatura ambiente:

$$T = 205 - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T = 185 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Con base a lo anterior, se puede obtener una proporción de corriente y temperatura:

$$\text{Relación de temperatura y corriente} = \frac{3.8 \text{ A}}{185 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 0.2054 \text{ A/}^{\circ}\text{C}$$

Si se desea elevar la temperatura a 100 °C se puede obtener la corriente (I) por medio de un producto:

$$I = 0.2054 \frac{\text{A}}{\text{ }^{\circ}\text{C}} * 100^{\circ}\text{C} = 2.054 \text{ A}$$

Con base a la ley de ohm se puede calcular el voltaje de acuerdo a la resistencia del alambre con el que se trabaja:

$$V = \frac{2.054 \text{ A}}{10 \Omega} = 0.2054 \text{ V}$$

La aproximación anterior es útil como punto de partida, pero debido a que el alambre nicrom cambia su valor de resistencia con respecto a la temperatura, es importante hacer pruebas y experimentos para tomar datos apropiados y tener valores correctos.

2.7 Termistor

El término “termistor” es una combinación de las palabras “resistor” y “térmico”. Es un dispositivo electrónico, el cual sufre un cambio en su valor de resistencia con respecto a la temperatura. Existen dos versiones del termistor: NTC (Negative Temperature Coefficient) y PTC (Positive Temperature Coefficient). El termistor NTC disminuye su

resistencia conforme su temperatura aumenta, mientras que el PTC aumenta su valor de resistencia de manera directamente proporcional a la temperatura [19].

El termistor NTC es el más común y su curva de temperatura vs resistencia se muestra en la figura 25.

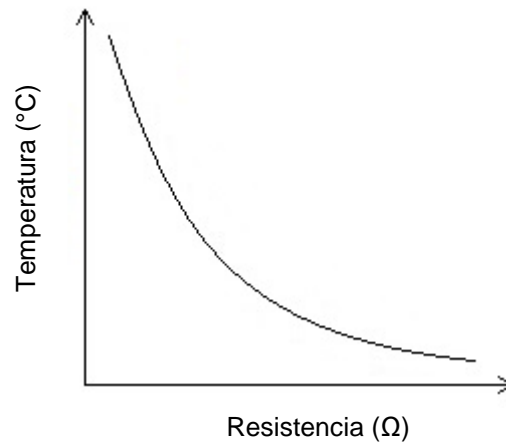


Figura 25. Curva de termistor NTC

El valor de temperatura como función de la resistencia del termistor se describe con la ecuación Steinhart-Hart, la cual es una aproximación que funciona para termistores NTC y PTC.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C \ln^3(R) \quad (11)$$

Donde:

T: temperatura en Kelvin

R: Resistencia del termistor

A, B y C: constantes obtenidas del fabricante

Una manera más común de obtener la relación de resistencia-temperatura es usando el modelo siguiente:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{Beta} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) + \frac{1}{T_0} \quad (12)$$

Donde:

T_0 : Temperatura inicial (ambiente normalmente 25° C)

R_0 : Valor de resistencia a temperatura T_0

$Beta$, T_0 y R_0 : Son valores que se encuentran en las hojas de datos para cada sensor

Re-escribiendo la ecuación (12) se obtiene una expresión para la resistencia R:

$$R = R_0 e^{Beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (13)$$

El termistor puede se conecta normalmente de manera que forme un divisor de voltaje cuando se tienen aplicaciones que utilizan un microcontrolador.

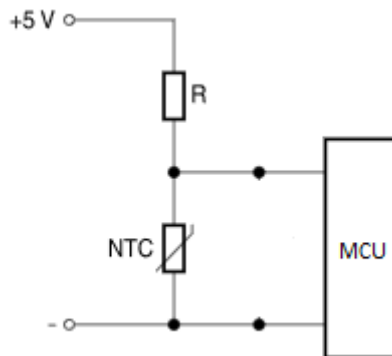


Figura 26. Conexión de termistor a un microcontrolador

Con respecto a la figura 26 y considerando que voltaje de salida se puede calcular con la ecuación del divisor de voltaje, la expresión se escribe como:

$$V_{salida} = \left(\frac{R_{NTC}}{R_{NTC} + R} \right) * V_{entrada}$$

Capítulo 3 DESARROLLO

3.1 Planteamiento del problema

Durante los registros de bio-potenciales en experimentos relacionados con el reflejo de la raíz dorsal en ratas, es necesario mantener la temperatura constante para el estudio del fenómeno descrito en el capítulo 2, en el que las descargas de las raíces aferentes desde la médula espinal como respuesta a estímulos a temperatura ambiente parecen ser una actividad anómala.

Bajo anestesia, los roedores presentan dificultad para regular su temperatura interna, por lo que es necesario tener una forma de llevar a cabo el monitoreo y control durante el experimento.

3.2 Justificación

Existen numerosos equipos disponibles en el mercado, sin embargo, su costo es muy elevado y en muchas ocasiones no son versátiles en cuanto a mantenimiento y repuestos.

El dispositivo que se describe a continuación es de bajo costo y presenta bajo ruido, tolerable para el registro del potencial proveniente del hasta dorsal durante los experimentos de estimulación del nervio tibial para el estudio del reflejo de raíz dorsal.

En cuanto a la decisión del tipo de control utilizado, se consideró que el sistema puede responder muy bien ante el fenómeno del cambio de temperatura basado en el análisis del modelo del sistema como sistema de primer orden y la respuesta obtenida en simulaciones con Simulink.

Controlador difuso vs PID

El objetivo de este apartado es demostrar que un controlador difuso resulta ser más fácil de implementar y llega a ser muy estable en comparación con un PID.

Partiendo del fenómeno de temperatura, esta se puede describir por medio de la ecuación de primer orden conocida como ley de enfriamiento de Newton:

$$\frac{dT}{dt} = k(T - T_s), \quad T(0) = T_0 \quad (14)$$

Donde:

k : constante de proporcionalidad

T_s : temperatura del ambiente

T : temperatura del cuerpo a estudiar

T_0 : temperatura inicial del cuerpo a estudiar

La solución a la ecuación (14) es:

$$T = (T_0 - T_s)e^{kt} + T_s \quad (15)$$

La solución es de la forma:

$$y(t) = y_0 e^{-kt}$$

Ya que si $k < 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{kt} = 0$

El sistema en un PID considera lo anterior para el mejor desempeño, aunque con la ecuación (1) es posible ajustar el sistema a base de prueba y error o un algoritmo de auto-tuning (auto ajuste de ganancias K_i , K_p y K_d).

Si se considera un sistema ideal en el cual no se consideran perturbaciones, el modelo simulado con Simulink (figura 27) permite ver la respuesta al escalon. La respuesta de

un PID para un sistema de primer orden cuando las ganancias no están ajustadas es relativamente inestable y tiene un sobretiro muy grande que en el peor de los casos se extiende hasta el máximo valor de la variable a controlar

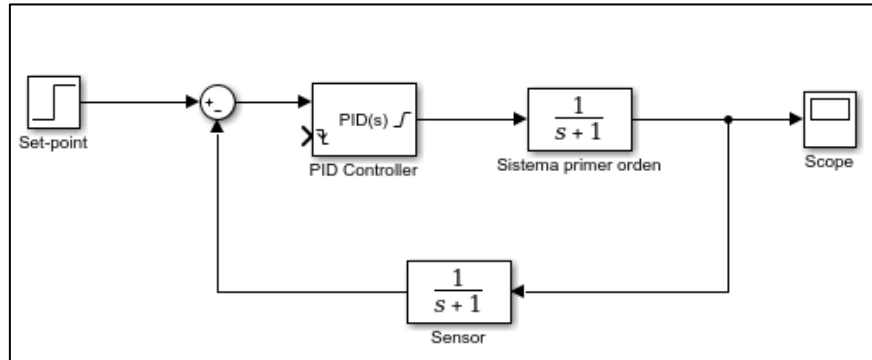


Figura 27. Modelo de control PID en Simuink para sistema de primer orden.

Una vez que se encuentran los valores correctos de ganancia, el sistema presenta un error de estado estacionario muy bajo y tiempo de estabilidad más corto. En la aplicación, la sintonización de un PID se puede hacer de varias formas, manualmente se varía primero K_p , después K_d y finalmente K_i .

En la siguiente figura se compara la respuesta del PID con un ganancias ajustadas y sin ajustar con un escalon de 39.6.

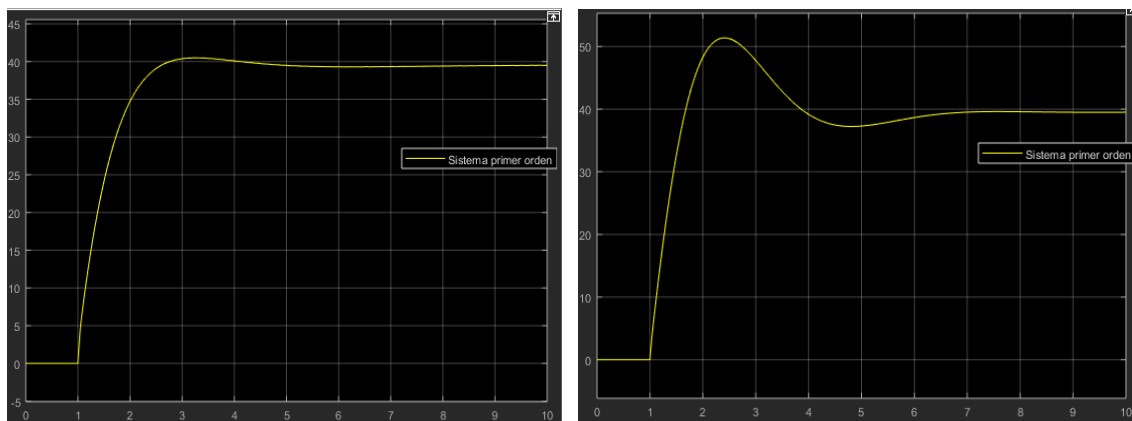


Figura 28. PID sintonizado (izquierda) y no sintonizado (derecha).

El controlador difuso por su parte puede lograr un resultado similar al PID sintonizado, en la siguiente figura se puede ver el modelo en Simulink para sistema de primer orden ideal con su respectiva gráfica de respuesta.

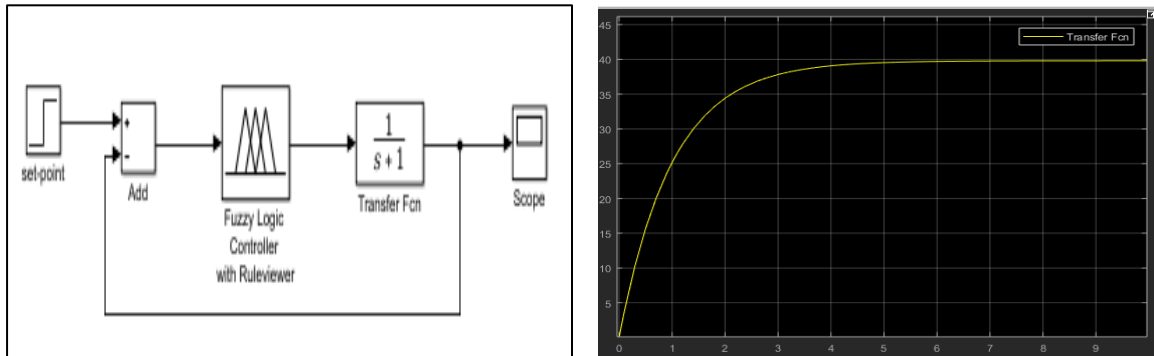


Figura 29. Simulación y respuesta de un controlador difuso para sistema de primer orden.

El control difuso tiene diversas ventajas como lo son:

1. Fácil de comprender
2. Flexible
3. Tolerancia a datos imprecisos
4. Permite modelar funciones no lineales o de complejidad arbitraria
5. Se basa en lenguaje natural del humano

En sistemas más complejos sea quizá necesario hacer uso de ambos tipos de control para tener una exactitud mayor, sin embargo, para muchas aplicaciones basta con implementar sólo uno.

3.2 Metodología

El equipo aquí descrito utiliza un controlador difuso que facilita la implementación en hardware, es versátil y tiene gran estabilidad en situaciones donde el sistema no es lineal como lo es la temperatura. A diferencia de un controlador PID, no se necesita hacer calibración de ganancias ni considerar tiempos de ejecución del MCU para garantizar exactitud y precisión del algoritmo de control.

El control difuso evita la necesidad de modelar el sistema y permite utilizar términos lingüísticos.

Para la construcción del dispositivo se consideran los elementos que conforman el sistema en su totalidad, y la manera en la que el usuario interactúa con el equipo. La tarjeta de control va dentro de un chasis que además incorpora la interface de entrada y salida.

El dispositivo cuenta con las siguientes etapas:

- Diseño electrónico
- Diseño del controlador
- Diseño de pad
- Montaje

3.2.1 Diseño electrónico

La parte central de la tarjeta es el MCU, a partir de ahí se consideran las posibles entradas y salidas y la manera en cómo interactúan con el microcontrolador. Con respecto al diagrama mostrado en la figura 22 se puede comenzar a hacer el circuito electrónico. Los componentes utilizados son:

- PIC16f877a
- MOSFET IRF523
- Cristal 4MHz
- Termistores NTC Dräger MX11000-11
- Capacitores (electrolíticos y de tantalio)
- Resistencias
- LCD HD44780
- Puentes rectificadores 2W06G (para fuente de 5V) y 450H KBL04 (fuente de 16 V)

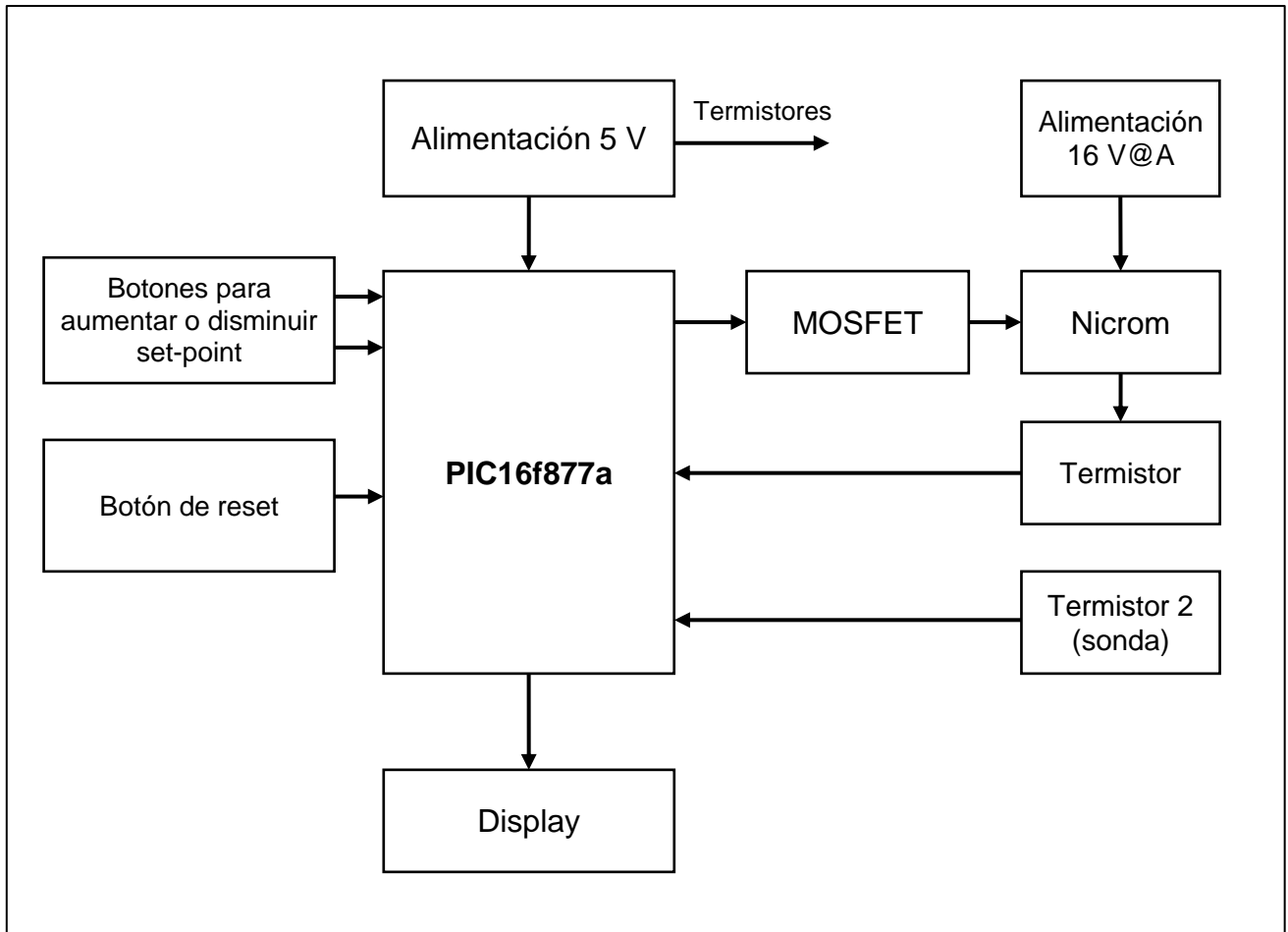


Figura 30 Diagrama a bloques del circuito

Para la fuente de alimentación de 5V se utiliza el circuito integrado LS7805. La alimentación de 16V utiliza solamente la parte de rectificación con un capacitor de 2500 μf para evitar pérdida de corriente.

Termistores

Para la conexión de los termistores, éstos se conectan en paralelo para tener un divisor de voltaje. Para el prototipo se utilizaron resistencias de precisión de 10k Ω , aunque idealmente se recomienda que sean de menor valor que la resistencia del termistor. En este caso no es necesario un cálculo riguroso ya que la calibración del sensor se basa en registro de temperatura comparando con un termómetro de referencia.

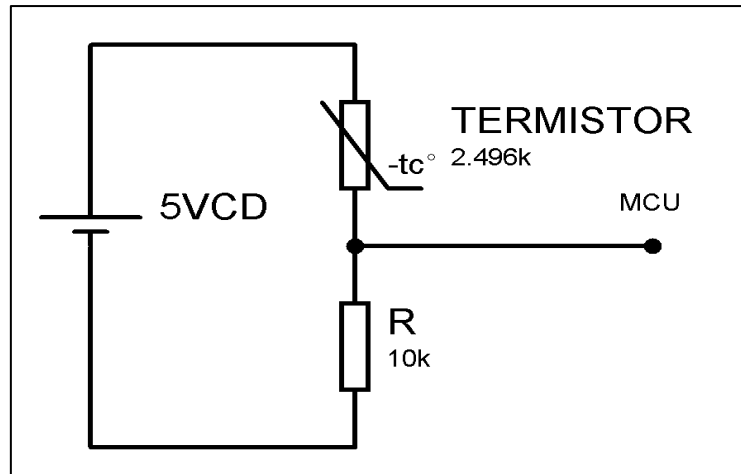


Figura 31. Diagrama de conexión de termistor del prototipo

El termistor a temperatura ambiente de 23 °C es de aproximadamente 2.5k, calculando el voltaje por medio de la ecuación del divisor de voltaje se tiene que:

$$V_{salida} = \left(\frac{10k}{10k + 2.5k} \right) * 5V = 3.33 V$$

De esta manera se puede tener una referencia para la calibración del sensor. Para este dispositivo se hizo un registro de los valores de palabra que corresponden a las diferentes temperaturas en un intervalo de 23 - 48°C, estos valores se ingresaron en MS Excel para su análisis y la obtención de una función que finalmente se utilizó en el sistema.

Alambre nicrom

El alambre nicrom se calienta al aplicar una corriente como cualquier resistencia y requiere cierta corriente para aumentar su temperatura hasta cierto nivel. El alambre utilizado es de calibre 21 ADW, la longitud total es de aproximadamente 3 m y su resistencia es de 8Ω. Con esta información, la tabla del anexo A.1 indica que para calentar éste alambre desde la temperatura ambiente promedio de 25 °C a 205 °C se necesitan 3.3 A. Como en este caso no es necesario llegar hasta una temperatura tan alta, un transformador de 2 A y 12 volts se ajustan bien; considerando que con el

puente rectificador el voltaje es de 16 V, por ley de ohm se tiene que la corriente máxima que puede consumir el nicrom es de 2 A.

Para controlar la corriente del nicrom se utilizó el MOSFET IRF523, un transistor de canal N que puede ser controlado con bajos niveles de voltaje. La selección de este tipo de transistor tiene como propósito permitir el control directamente con la señal PWM del microcontrolador, de esta manera no se necesita un circuito extra para manejar el MOSFET.

El MOSFET tiene tres terminales: gate, source y drain. Source se conecta al negativo o referencia del circuito, source se conecta a la carga o alimentación y gate a un circuito de control.

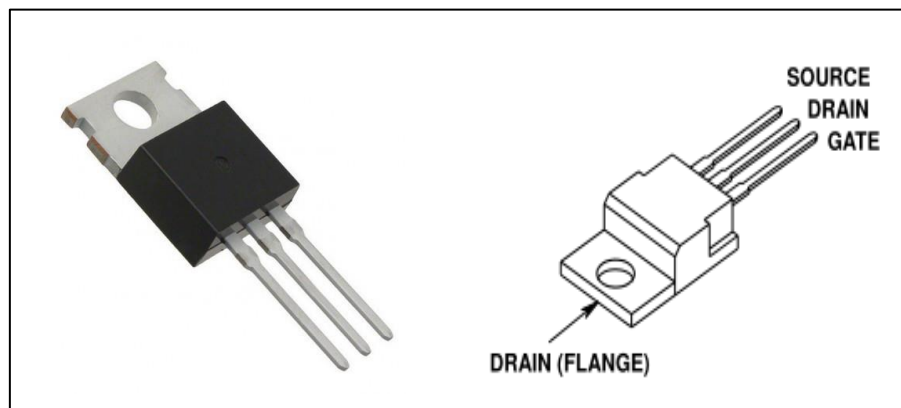


Figura 32. IRF523 a) foto b) configuración de terminales

El IRF523 soporta voltajes drain-to-source de hasta 80 V, corrientes de hasta 8 A, lo cual se adecua a la aplicación. El voltaje de control se encuentra en la hoja de datos como “gate to source voltage” (V_{GS}) y para éste dispositivo es ± 20 V. En la hoja de datos, un elemento importante es la gráfica del V_{GS} contra la corriente en “*Drain*”, de esta manera se puede saber si el transistor puede manejar la corriente que se requiere con el voltaje de salida del MCU.

Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

	IRF520	IRF521	IRF522	IRF523	UNITS
Drain to Source Breakdown Voltage (Note 1)	100	80	100	80	V
Drain to Gate Voltage ($R_{GS} = 20\text{k}\Omega$) (Note 1)	100	80	100	80	V
Continuous Drain Current	9.2	9.2	8	8	A
$T_C = 100^\circ\text{C}$	6.5	6.5	5.6	5.6	A
Pulsed Drain Current (Note 3)	37	37	32	32	A
Gate to Source Voltage	± 20	± 20	± 20	± 20	V
Maximum Power Dissipation	60	60	60	60	W
Dissipation Derating Factor	0.4	0.4	0.4	0.4	W/ $^\circ\text{C}$
Single Pulse Avalanche Energy Rating (Note 4)	36	36	36	36	mJ
Operating and Storage Temperature	-55 to 175	-55 to 175	-55 to 175	-55 to 175	$^\circ\text{C}$
Maximum Temperature for Soldering					
Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s	300	300	300	300	$^\circ\text{C}$
Package Body for 10s, See Techbrief 334	260	260	260	260	$^\circ\text{C}$

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

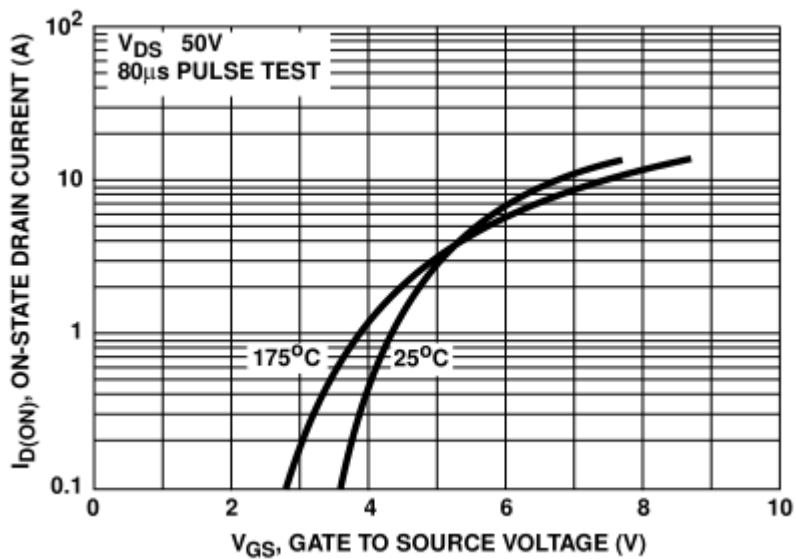


Figura 33. Especificaciones de interés y gráfica V_{GS} del IRF523

Como se puede ver en la gráfica, un voltaje de 5 V en V_{GS} permite una corriente de 3 A, suficiente para la corriente máxima de 2 A de la fuente de alimentación del nicrom. Cabe mencionar que éste tipo de dispositivos se consideran como “normalmente cerrado” y cada vez que recibe un pulso en la terminal “Gate”, el transistor actúa como switch cerrado.

Para asegurar que el MOSFET opere normalmente es indispensable agregar un resistor entre la Compuerta (Gate) y el microcontrolador, esto se debe a que la parte

del IRF523 correspondiente al FET genera una capacidad y la resistencia permite que haya un tiempo de carga y descarga.

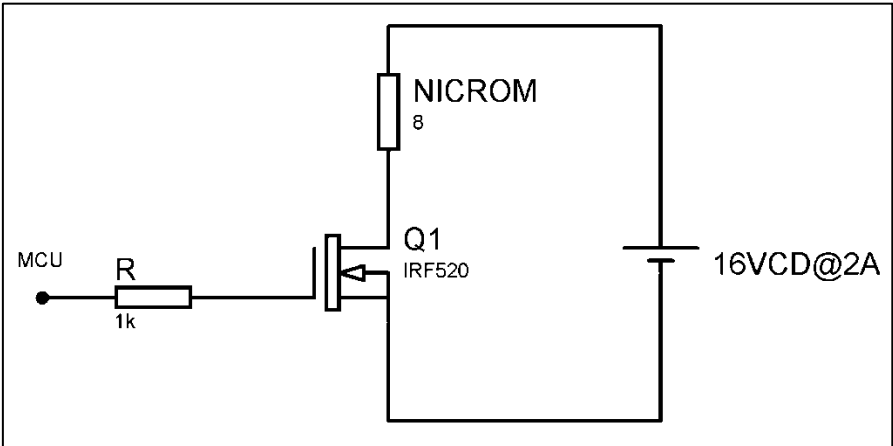


Figura 34. Circuito manejador para nicrom

LCD y botones

El LCD utilizado es el HD44780, puede ser controlado con 6 salidas del MCU de las cuales 4 son los bits de datos. El circuito simplemente requiere conectar siguiendo el orden ascendente de los pines.

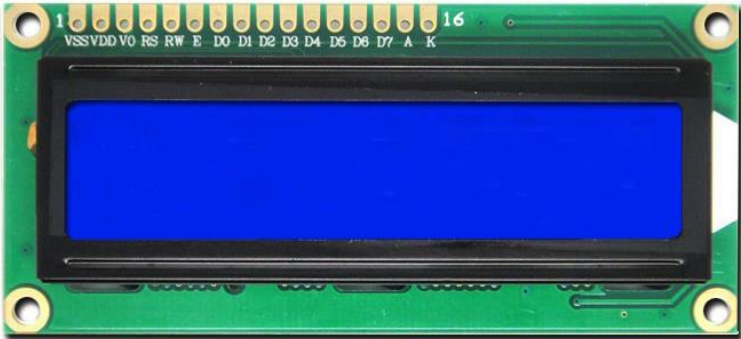


Figura 34. Foto de LCD HD44780

De la figura, se observan los pines D0 - D7, de los cuales del D4 al D7 son los bits de control.

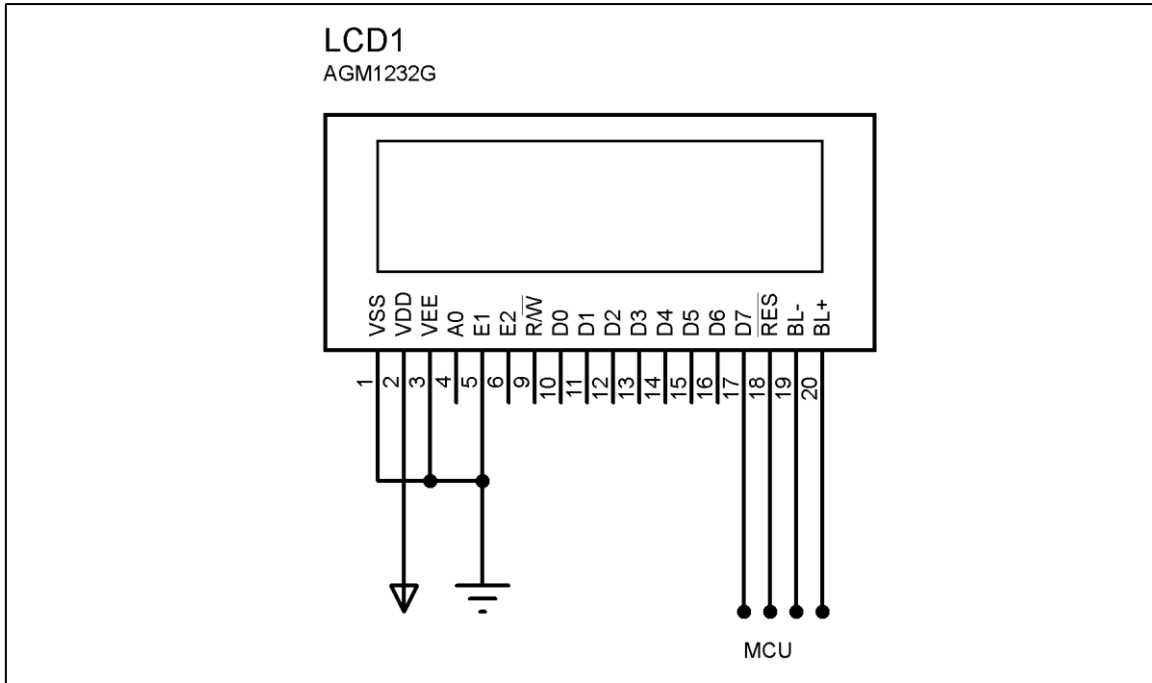


Figura 35. Diagrama del LCD

Para los botones que controlan la referencia y el reinicio (reset) del microcontrolador se utiliza un circuito para evitar rebotes utilizando un capacitor.

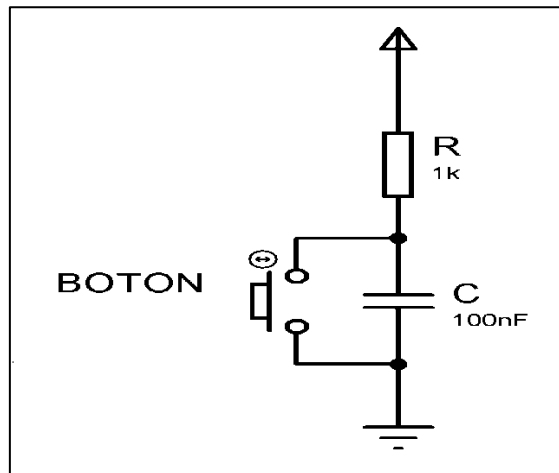


Figura 36. Diagrama de botón

Fuentes de alimentación

Las fuentes de alimentación emplean diferentes transformadores y diferentes puentes rectificadores. Para la fuente de 5V se utilizó un transformador con salida de 6 V@1A y un rectificador 2W06G.

Para la alimentación del calefactor (nicrom) se utilizó un transformador con salida de 12V@2A y un rectificador 450H KBL04.

Para ambos casos el circuito es un circuito rectificador de onda completa y cuyo circuito básico es el siguiente.

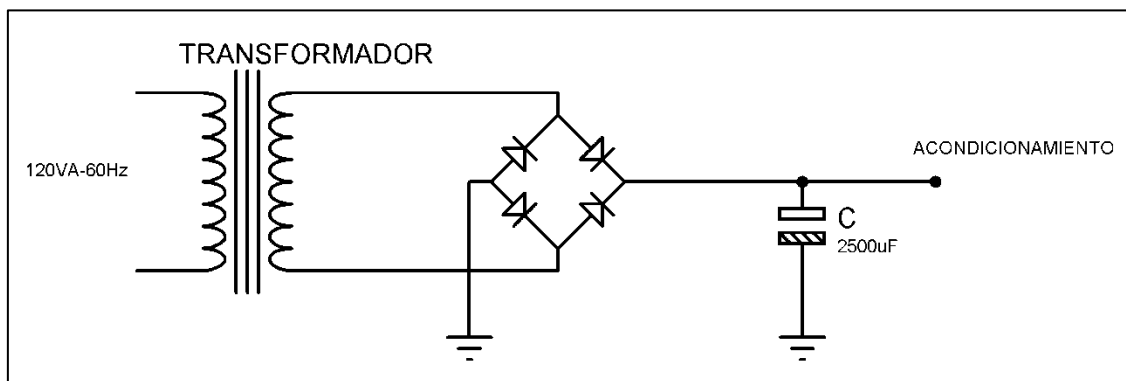


Figura 37. Circuito rectificador

El diagrama del circuito se realizó con el “software Proteus 8” y se puede ver en detalle en el anexo A.2.

3.2.2 Diseño de controlador

En este caso, el sistema es un sistema SISO (Single Sinput-Single Output) en el que la temperatura del sistema se utiliza como retroalimentación para determinar la acción de control. La señal de temperatura proveniente del termistor es equivalente a la entrada rígida, dicha señal debe fuzzificarse para llevar a cabo el proceso de inferencia y determinar el valor de salida correspondiente. La salida, es una señal de modulación

por ancho de pulso PWM cuyo ciclo de trabajo funciona como señal de control para manejar un MOSFET que funciona como interruptor.

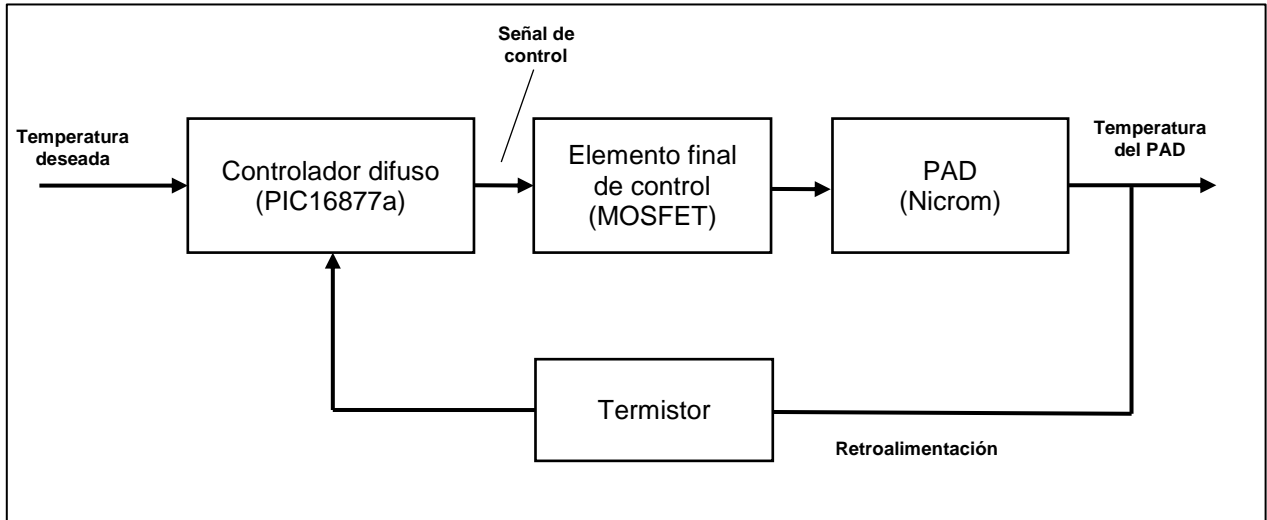


Figura 38. Diagrama de bloques del control de temperatura para el dispositivo propuesto.

Funciones de membresía y reglas lingüísticas

Variable de entrada

La temperatura de entrada es comparada constantemente contra el valor de referencia y en esta aplicación se busca que la temperatura se mantenga en un valor lo más exacto posible, por lo que se puede definir un intervalo de tolerancia en el que la temperatura pueda ser etiquetada como “frío”, “caliente” o “normal”.

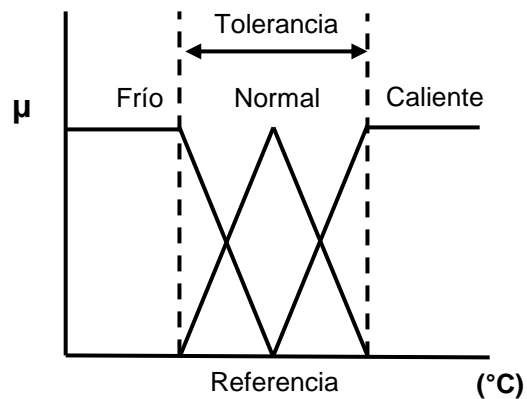


Figura 39. Posibles funciones de membresía para temperatura

Como se busca tener exactitud y el nicromo comenzará a enfriarse tan pronto se deja de aplicar una corriente de manera lenta, se puede considerar que el valor de referencia es el límite de temperatura máximo (una vez que se alcanza el valor deseado, el MOSFET se apaga para no seguir incrementando la temperatura), además, ya que la señal de control es un PWM, el intervalo detrás de la referencia es más bien una tolerancia para tratar de corregir el error una vez que el nicromo comienza a enfriarse.

Con el razonamiento anterior se pueden tener las funciones de membresía de la siguiente forma:

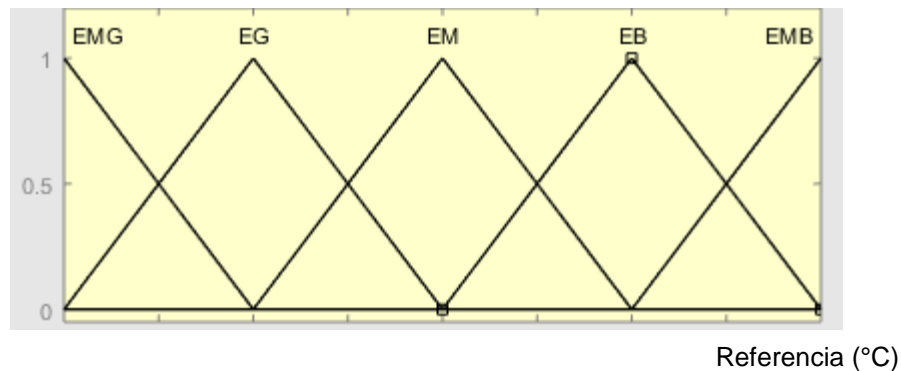


Figura 40. Funciones de membresía para el sistema

Las funciones de membresía propuestas son:

- EMG: Error Muy Grande
- EG: Error Grande
- EM: Error Medio
- EB: Error Bajo
- EMB: Error Muy bajo

De esta manera se tiene la referencia como límite superior y diversos tipos de error a lo largo del intervalo. Lo siguiente es definir los valores del intervalo y el dominio de cada función de membresía. Con un intervalo de 0.4 °C con respecto de la referencia

se pueden distribuir las 5 funciones de membresía con base a la ecuación (7) la cual se define por los parámetros {a,b,c}. Para la función EMG los valores menores al límite inferior 'a' son iguales a 1 por lo que se puede obtener la ecuación:

$$\mu_{Triangular}(x; a, b) = \begin{cases} 1 & , x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & , a \leq x \leq b \\ 0 & , b \leq x \end{cases}, x \in \mathbb{R} \quad (16)$$

El límite 'a' se puede expresar como:

$$a = referencia - intervalo$$

Donde el intervalo en este caso es 0.4. Para el límite superior 'b' se considera que la resolución es de 0.1 °C, así que se puede escribir como:

$$b = a + 0.1$$

Para EMB que corresponde al extremo superior se tiene:

$$\mu_{Triangular}(x; a, b) = \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ \frac{x-a}{x-b} & , a \leq x \leq b \\ 1 & , b \leq x \end{cases}, x \in \mathbb{R} \quad (17)$$

En este caso el límite inferior 'a' se puede representar como:

$$a = b - 0.1$$

Y el límite superior b como:

$$b = referencia$$

EG, EM y EB pueden ajustarse a lo largo del intervalo de manera que sus parámetros 'b' sean diferentes a los parámetros de EMG y EMB en donde el valor de membresía es 1. En este caso se pueden asignar como se muestra en la figura 34:

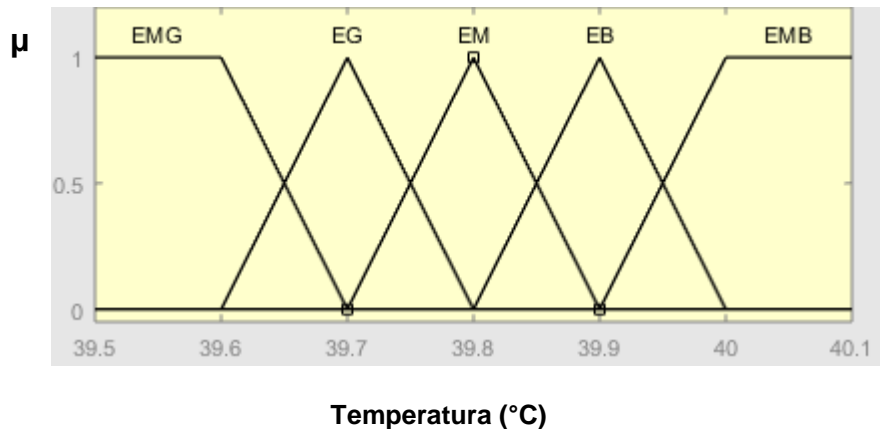


Figura 41. Funciones de membresía con valor de referencia igual a 40.

En la figura se muestra una referencia de 40 °C, a partir de este valor las funciones de membresía toman sus respectivos valores, para EG el parámetro 'b' es 39.7, para EM 39.8 y para EB 39.9.

Variable de salida

La salida corresponde al ciclo de trabajo de la señal PWM, de esta forma se tiene un intervalo [0,100] que correspondiendo al porcentaje. Para facilitar el cálculo del centro de gravedad con la que se obtiene la salida, se propone utilizar funciones tipo singleton de manera que sólo haya un número limitado de valores en la función de membresía. Si se utiliza una función de otro tipo, es necesario especificar la cantidad de muestras que se evaluarán para tener mejor exactitud.

Para esta aplicación se tienen 5 valores correspondientes a los ciclos de trabajo: 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Más que una función, las salidas singleton se pueden pensar como constantes ya que son valores constantes.

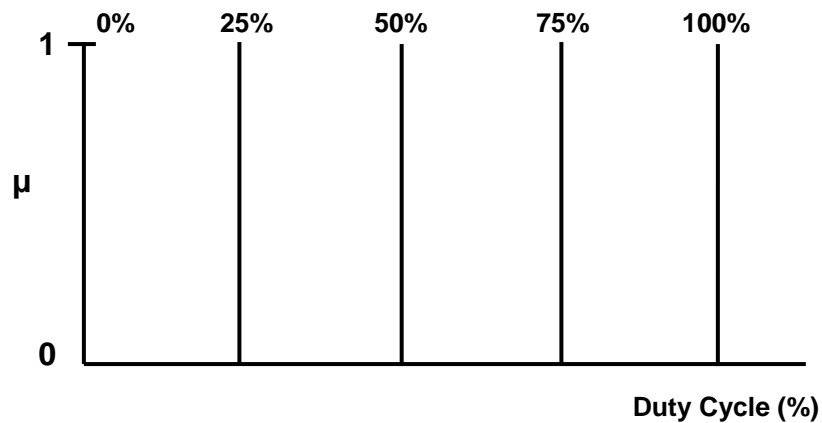


Figura 42. Funciones de membresía tipo Impulso (singleton) para la salida del sistema.

Reglas lingüísticas e inferencia

El sistema descrito es de una sola entrada, por lo que no hay una comparación con operadores lógicos, por esta razón, el valor de la regla es igual al valor de membresía.

Las reglas se pueden escribir como:

- “Si el **error** es **muy grande**, entonces **duty cycle** es igual a **100%**”
- “Si el **error** es **grande**, entonces **duty cycle** es igual a **75%**”
- “Si el **error** es **medio**, entonces **duty cycle** es igual a **50%**”
- “Si el **error** es **bajo**, entonces **duty cycle** es igual a **25%**”
- “Si el **error** es **muy bajo**, entonces **duty cycle** es igual a **0%**”

Con base a las reglas anteriores se puede ver que el valor de cada función de membresía de error multiplica directamente un valor único.

3.2.3 Implementación en PIC16f877a

El programa funciona de la siguiente manera, a través de dos canales analógicos del microcontrolador se toma la lectura de los sensores: en la rata y en el nicrom, la temperatura del nicrom se utiliza como retroalimentación para el sistema de control de manera que se mantenga a una temperatura deseada. El sensor en la rata informa al sistema si alcanzó la temperatura interna pre-programada de 37 °C, cuando se alcanza esta temperatura, el nicrom se apaga por completo ya que normalmente estará en un valor mayor a los 40 °C.

Operación general de entrada y salida

El código se escribió en lenguaje C para el compilador de “MikroC Pro”, éste cuenta con funciones predefinidas como las de control de LCD, PWM y ADC. El manager de proyectos permite preparar fácilmente la palabra de configuración del PIC sin necesidad de incluir código en lenguaje C en el archivo del programa o recurrir a la hoja de datos.

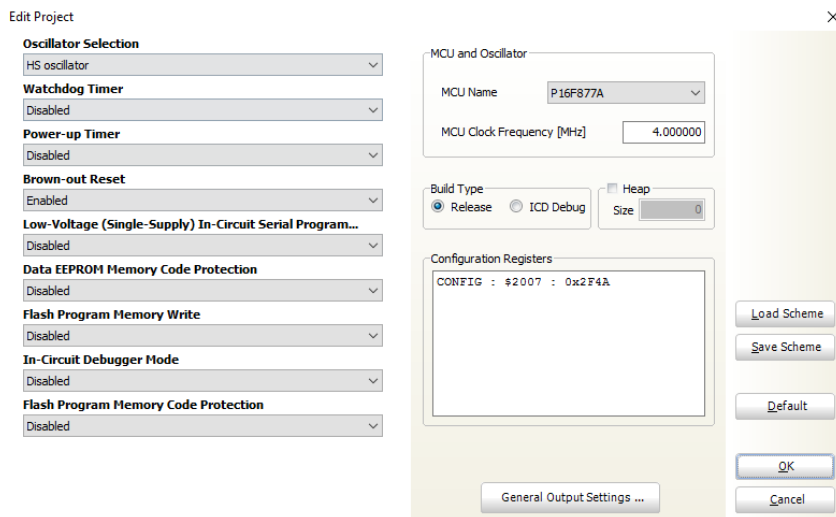


Figura 43. Ventana de configuración en MikroC PRO

Hasta ahora se tienen las funciones de membresía y las reglas que gobiernan el sistema de control, traducir las fórmulas en código para la implementación en hardware

requiere pensar en la manera en la que interactúa el MCU con las otras partes del sistema.

Con ayuda de un diagrama de flujo es más fácil deducir qué camino tomar para escribir el código. La primera parte, después de configurar el PIC es establecer variables y constantes, esto requiere regresar a las funciones de membresía y los elementos de entrada y salida para crear variables que se refieran a la información proveniente de los ADC, las palabras de salida en el LCD y otras variables de utilidad.

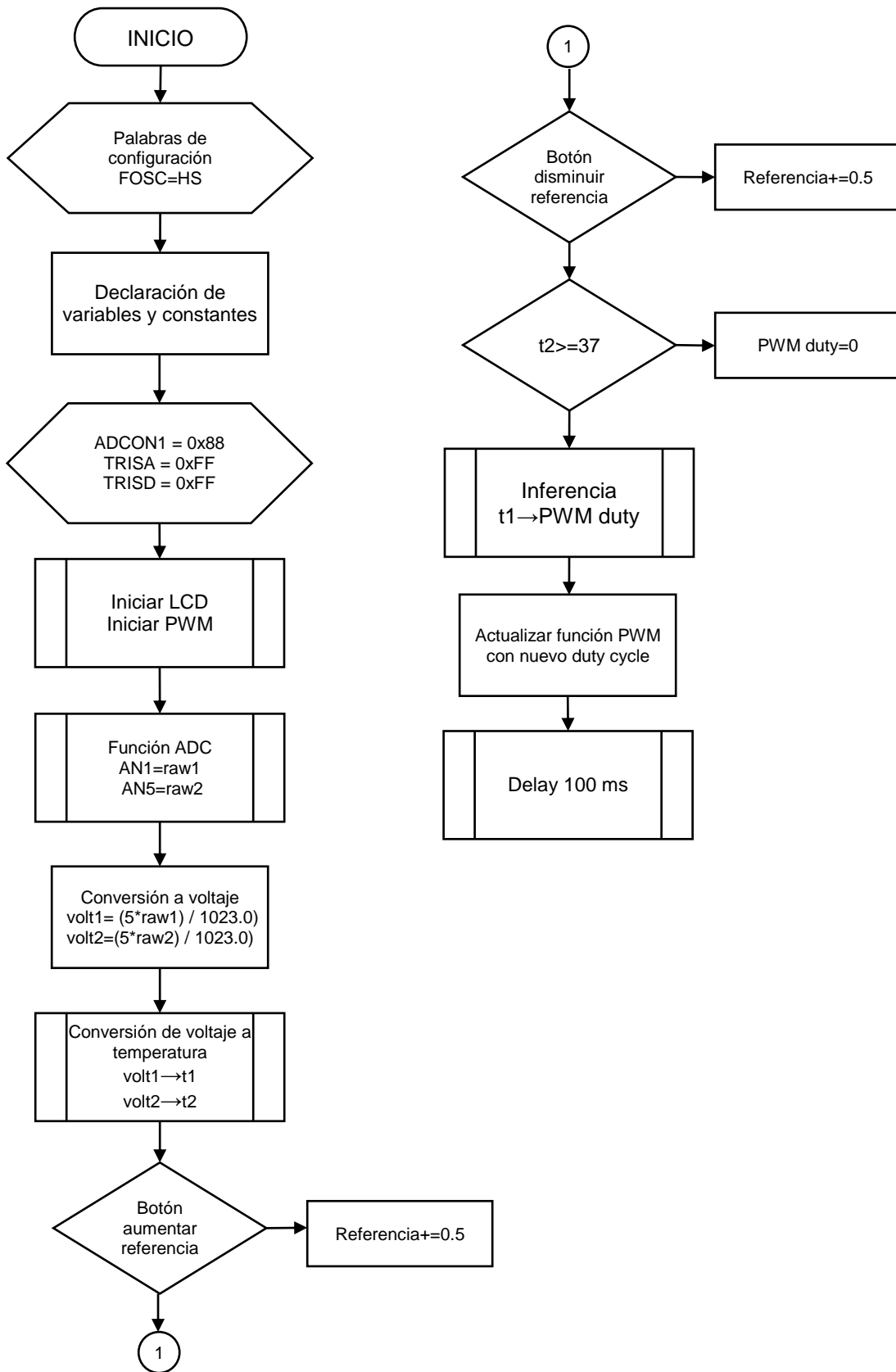


Figura 44. Diagrama de flujo del programa implementado en el PIC16f877a

Configuración de entradas y salidas

El PIC 16f877a cuenta con 40 pines y su configuración (figura 38) indica que el puerto A contiene los convertidores analógico-digital, distinguibles como AN0 - AN7, y el puerto C tiene las salidas del PWM definidas como CCP1 y CCP2.

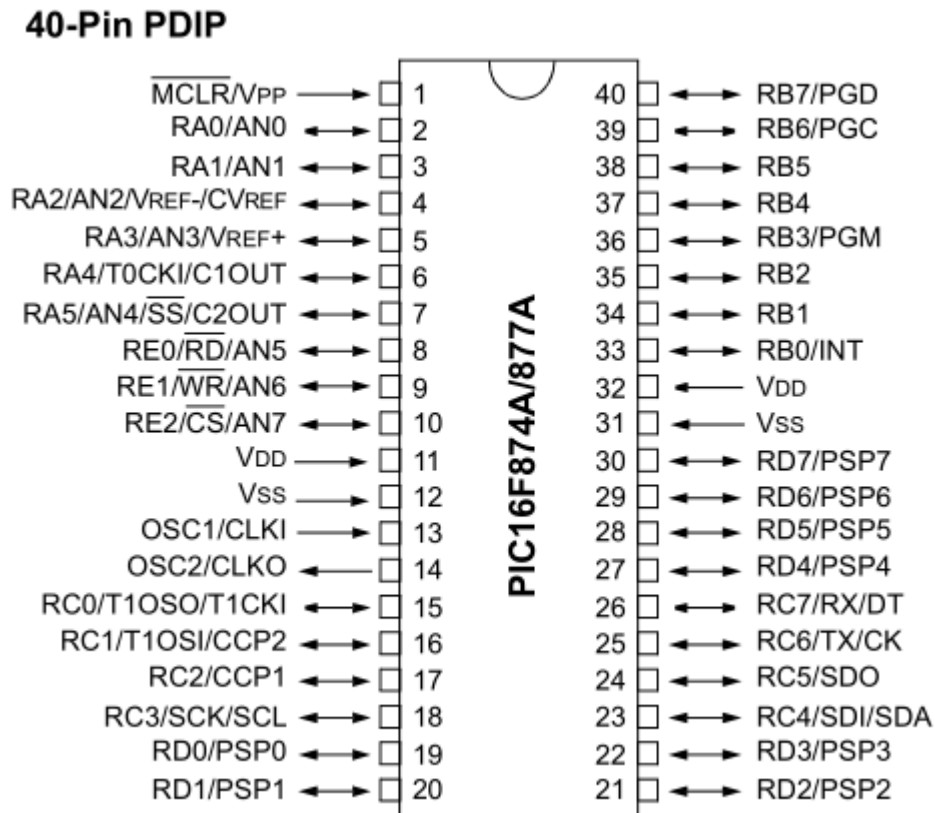


Figura 45. Configuración de pines del PIC

La programación del PIC requiere configurar diversos registros especificados en la hoja de datos, parte de este trabajo cae en el compilador de MikroC ya que algunos procesos de monitoreo y escritura de bits se realizan automáticamente por las funciones predefinidas, sin embargo, algunas configuraciones referentes a ciertas preferencias en cuanto a entradas y salidas requieren de atención especial.

El registro de cada puerto es importante para habilitar su función como entrada o salida. Para el prototipo se utilizan A y D como entradas y el puerto B como salida. Cada uno de los puertos cuenta con un registro llamado TRISx y su tamaño de palabra es igual a la cantidad de pines que posee. Si un bit se configura como '1', el pin correspondiente a ese bit se considera una entrada, si el bit es '0', el pin es una salida.

Tabla 4. Registros de puerto A

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other Resets
05h	PORTA	—	—	RA5	RA4	RA3	RA2	RA1	RA0	--0x 0000	--0u 0000
85h	TRISA	—	—	PORTA Data Direction Register						--11 1111	--11 1111

El registro puede programarse usando su nombre o dirección y puede usarse hexadecimal o binario:

```
TRISA=0xFF;
```

```
TRISA=0b11111111;
```

Para el puerto A, existen también registros que controlan los canales analógicos: ADCON0 y ADCON1, el registro ADCON0 se utiliza para el proceso de captura de señal y para ello la función ADC_Read() se encarga de manejarlo automáticamente. ADCON1 permite establecer los canales del puerto A que serán utilizados como entradas/salidas analógicas o digitales y configurar otras cosas como la frecuencia para el ADC.

El ADC del PIC tiene un tamaño de 10 bits distribuidos en dos registros de 8 bits: ADRESH y ADRESL, dependiendo la configuración del ADCON1 es la manera en la como se almacena la señal.

La siguiente imagen tomada de la hoja de datos muestra la configuración de los bits para ADCON.

ADCON1 REGISTER (ADDRESS 9Fh)

R/W-0	R/W-0	U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADFM	ADCS2	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
bit 7				bit 0			

bit 7 **ADFM:** A/D Result Format Select bit

1 = Right justified. Six (6) Most Significant bits of ADRESH are read as '0'.
 0 = Left justified. Six (6) Least Significant bits of ADRESL are read as '0'.

bit 6 **ADCS2:** A/D Conversion Clock Select bit (ADCON1 bits in shaded area and in **bold**)

ADCON1 <ADCS2>	ADCON0 <ADCS1:ADCS0>	Clock Conversion
0	00	Fosc/2
0	01	Fosc/8
0	10	Fosc/32
0	11	FRC (clock derived from the internal A/D RC oscillator)
1	00	Fosc/4
1	01	Fosc/16
1	10	Fosc/64
1	11	FRC (clock derived from the internal A/D RC oscillator)

bit 5-4 **Unimplemented:** Read as '0'

bit 3-0 **PCFG3:PCFG0:** A/D Port Configuration Control bits

PCFG <3:0>	AN7	AN6	AN5	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0	VREF+	VREF-	C/R
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	8/0
0001	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	7/1
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	VSS	5/0
0011	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	4/1
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	VSS	3/0
0101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	AN3	VSS	2/1
011x	D	D	D	D	D	D	D	D	—	—	0/0
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	6/2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	6/0
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	AN3	VSS	5/1
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	4/2
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	3/2
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	2/2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	VSS	1/0
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF-	D	A	AN3	AN2	1/2

A = Analog input D = Digital I/O

C/R = # of analog input channels/# of A/D voltage references

Legend:			
R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'	
- n = Value at POR	'1' = Bit is set	'0' = Bit is cleared	x = Bit is unknown

Figura 46. Captura de hoja de datos

La configuración del ADCON1 que se utilizó es 0x88 para tener justificación a la derecha y voltajes de referencia en AN2 y AN3, también se establece todo el puerto como canales analógicos.

Inicialización de PWM y LCD

Una vez que se han configurado las entradas y salidas se pueden llamar las funciones de inicialización de PWM y LCD para su subsecuente uso, para el PWM:

- PWM_Init()
- PWM_Start()

PWM_Init debe especificar la frecuencia del PWM en Hz, por ejemplo, para un PWM con una frecuencia de 3KHz la función se escribe: PWM_Init(3000).

El LCD utiliza las funciones de inicialización:

- Lcd_Init()
- Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR)
- Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF)

Más información se puede encontrar en la ayuda de Mikro C

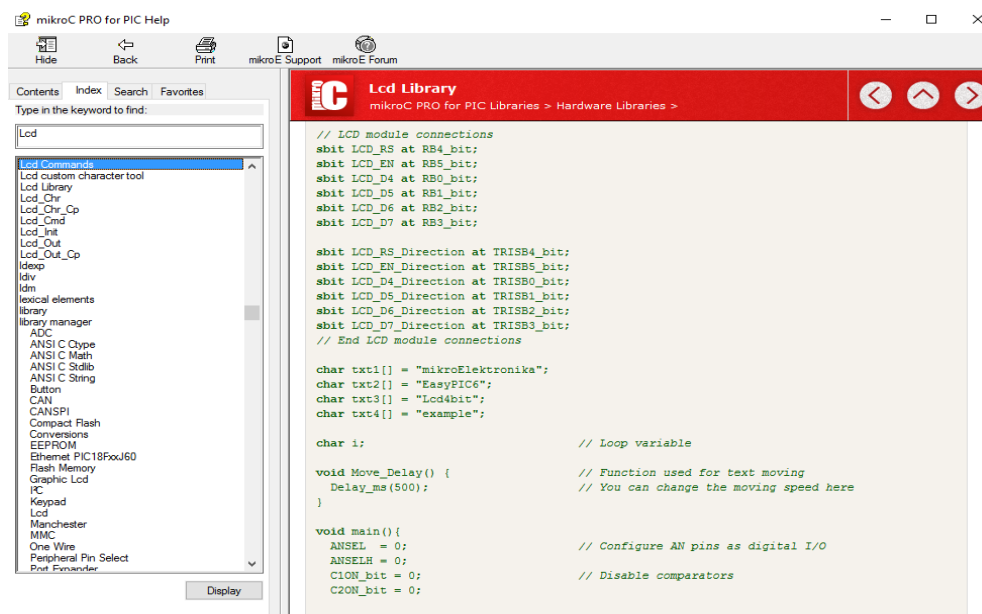


Figura 47. Ayuda de MikroC

ADC

De acuerdo al diagrama de flujo, lo primero que se hace es tomar el valor de las señales provenientes de los sensores de temperatura. Los sensores se conectaron a los pines AN5 y AN1, para almacenar el valor de la palabra (0 - 1023) en alguna variable se utiliza la función `ADC_Read()`, por ejemplo:

```
palabra = ADC_Read(1);
```

En este caso no es necesario escribir AN1, basta con escribir el número que corresponde al canal desde el cual se lee la información.

PWM

El PWM utiliza la función `PWMx_Set_Duty()`, el duty cycle que se envía a la función es un intervalo 0 – 255. El valor que se enviará es el resultado del centro de gravedad del controlador difuso, para la aplicación se utilizó el primer PWM correspondiente a CCP1

```
PWM1_Set_Duty(duty)
```

LCD

El LCD utiliza la función `Lcd_Out` (fila, columna, "texto"). Se debe considerar que el HD44780 tiene 2 filas de 16 columnas, el compilador comienza con el número '1' por lo que si se quiere comenzar a escribir en la esquina superior izquierda la función se escribía:

```
Lcd_Out(1, 1, "texto")
```

Programación del controlador difuso

La señal que se monitorea constantemente proviene del termistor en el “pad”, el valor de la señal se almacena como palabra en una variable llamada raw1, para tener valores más estables se promedian 30 muestras cada ciclo.

El pseudocódigo en C:

```
for i=0;i<=30;i++
    raw1+=raw1;
end
raw1=raw1/30;
```

El ADC tiene un voltaje de referencia de 5V, por esta razón la resolución considerando 10 bits es de aproximadamente 4.8 mV. Una manera de convertir el valor del adc a voltaje es con el siguiente código:

```
voltaje=raw1*(5/1023);
```

Con los valores de voltaje, se puede tener una función que convierta el valor obtenido en una temperatura equivalente:

Temperatura =función de temperatura con respecto al voltaje;

La función de temperatura se obtuvo a partir de diversas pruebas, los datos se ingresaron a MS Excel y se generó un polinomio de tercer orden para tener una función lo más parecida al fenómeno real.

$$y = 34.552x^3 - 414.77x^2 + 1689.7x - 2310.7 \quad (18)$$

Con el valor de temperatura se puede aplicar el algoritmo descrito en el diseño del controlador difuso. Las funciones de membresía son descritas con las ecuaciones: (7) del capítulo 2, y (16) y (17) del apartado 3.2.2.1 de éste capítulo. Las funciones se pueden escribir en C siguiendo la misma lógica.

La función trapezoidal se puede escribir con base al siguiente pseudocódigo:

Función trapezoidal izquierda(x,a,b)

```
if(x<a)
    return 1;
else
    if (x>=a && x<b)
        return (b-x)/(b-a);
    else
        return 0;
    end
end
```

'x' es la variable correspondiente a la temperatura de entrada y 'a' y 'b' los límites inferior y superior respectivamente.

Para el trapecio derecho:

Función trapezoidal derecha (x, a, b)

```
if(x<a)
    return 0;
else
    if (x>=a && x<b)
        return (x-a)/(b-a);
    else
        return 1;
    end
end
```

Finalmente, la función triangular:

Función triangular (x, a, b, c)

```
if (x>a&& x<=b)
    return (x-a)/(b-a);
else
    if (x>b && x<c)
        return (b-x)/(c-b);
    else
        return 0;
end
end
```

Para la función triangular, 'a' y 'c' son los límites inferior y superior, y 'b' es el punto medio donde la función tiene un valor igual a '1'.

El programa tiene una variable para cada una de las etiquetas de las funciones de membresía:

- EMG=función trapezoidal izquierda
- EG=función triangular
- EM=función triangular
- EB=función triangular
- EMB función trapezoidal derecha

Con respecto a las reglas lingüísticas, y a la ecuación (9) para calcular el centro de gravedad (CDG), el pseudocódigo se puede escribir de la siguiente manera:

$$CDG=(EMG*100 + EG*75 + EM*50 + EB*25 + EMB*0)/(EMG+EG+EM+EB+EMB);$$

El código del prototipo en su totalidad se encuentra en el anexo A.4.

3.2.4 Elaboración del pad

El pad debe tener un tamaño necesario para ajustarse a una rata de 18 x 7cm. Como se mencionó anteriormente, el nicrom utilizado es de una longitud de aproximadamente 3 m. Se enrolla de manera que se ajuste al tamaño del pad y haya mejor distribución de calor.

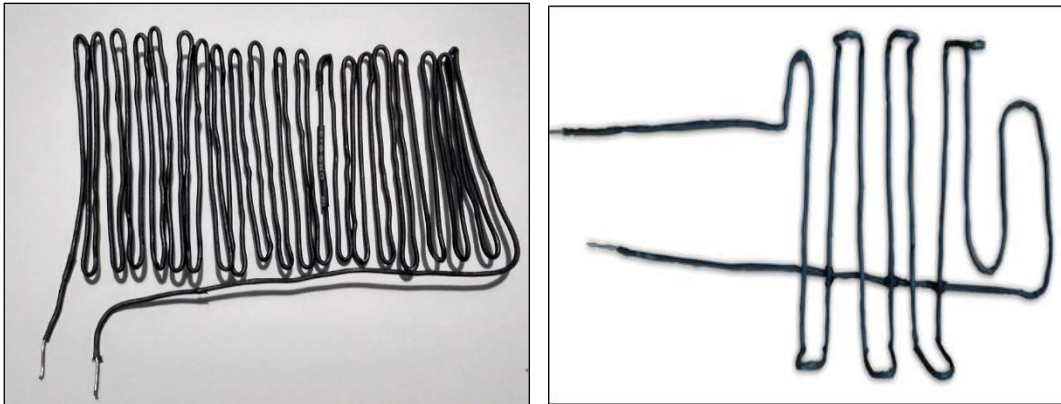


Figura 48. Alambre nicrom enrollado y cubierto con termofit, a la izquierda, la versión final, a la derecha, una de las primeras versiones

El alambre se recubrió primero con termofit para evitar conexión entre espiras y variación de resistencia. Durante varias pruebas se determinó que la mejor distribución es con espiras con mínima separación.

La almohadilla como tal, se elaboró con material plástico, con medidas de 23 x 10 cm. Se tomaron dos rectángulos a la medida y se cosieron con hilo cáñamo de manera que el nicrom quedara en medio.

El nicromo a su vez se envolvió con papel aluminio para tratar de quitar la mayoría posibles fugas de corriente. El papel aluminio se conectó a un cable que sirve como terminal a tierra.

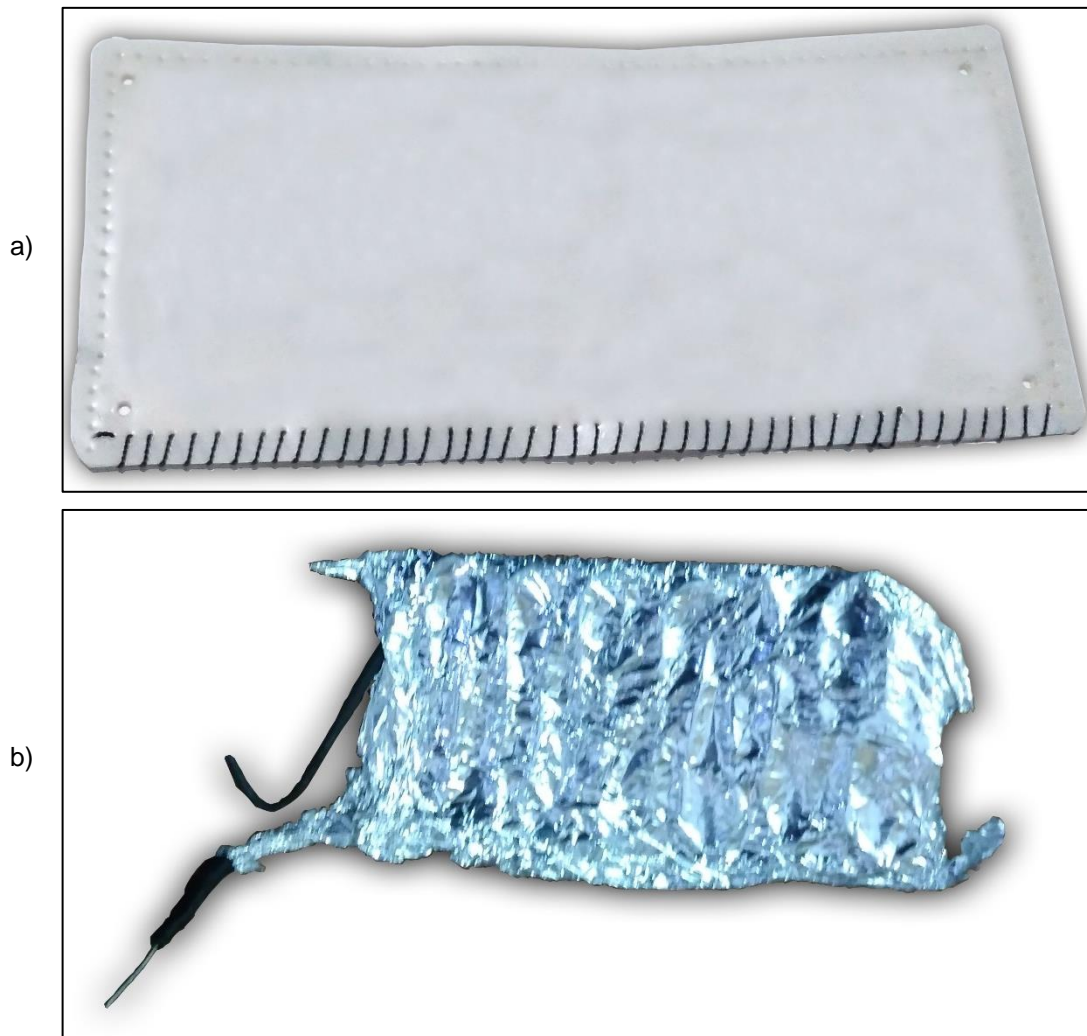


Figura 49. a) almohadilla b) nicrom envuelto en papel aluminio

La almohadilla se conecta a través de un cable blindado, al otro extremo consta de un conector RCA para conectarse al instrumento. Sobre el pad se colocó el sensor de temperatura que se utiliza para el control de temperatura, después, se cubrió con plástico para proteger contra agua y otros fluidos como orina y sangre. Finalmente, el pad se cubrió con una funda de tela con el fin de tener una mejor vista.



Figura 50. A la izquierda, primera versión del pad con cables ubicados a un costado, en medio, el pad con cables en la parte superior, a la derecha, cubierta de tela para mejor estética.

En la figura, se puede ver el sensor y parte del alambre nicrom cubierto con el papel aluminio, también se puede observar que existe una capa de plástico que provoca cierto brillo.

3.2.5 Chasis y ensamblaje

Se construyeron dos prototipos de chasis, uno de plástico y posteriormente uno de metal, ambos con las mismas dimensiones, pero con ligeros cambios en cuanto a la distribución de los componentes. El chasis se compone de dos partes: la base (donde se ubican la tarjeta y las fuentes) y la cubierta (donde se colocan los conectores y la pantalla LCD).

El chasis de metal, el cual se utilizó como prototipo final, cuenta con los siguientes elementos:

- 3 conectores RCA: para conectar 2 termistores y una salida para el nicrom
- 3 botones: botón de reset y dos botones para aumentar o disminuir la temperatura de referencia
- Pantalla LCD
- Botón de encendido
- Fusible
- Orificios para ventilación



Figura 51. Vista interior del equipo.

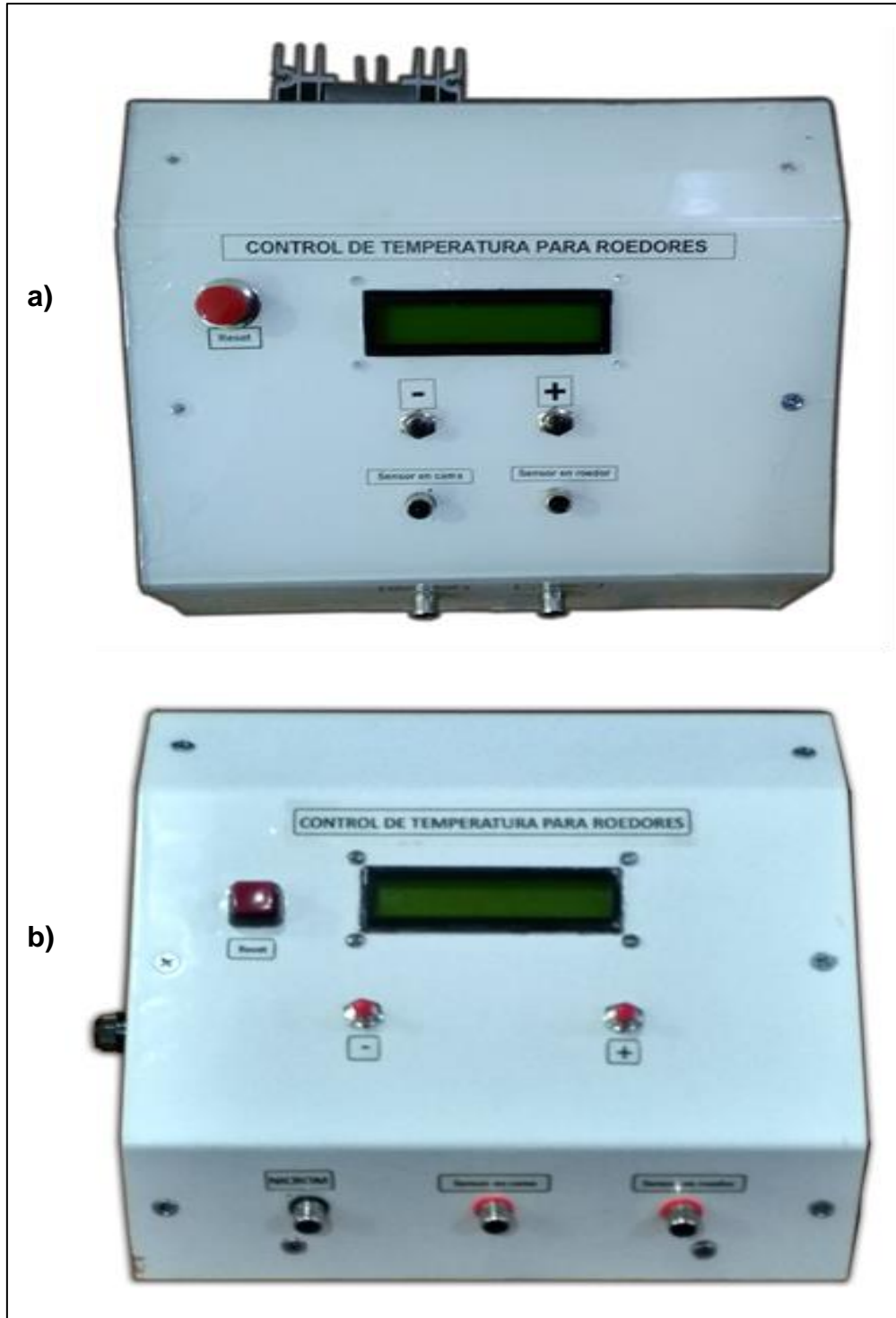


Figura 52. Cubiertas del chasis a) tapa de plástico, tiene 4 conectores RCA y un dissipador b) cubierta metálica, tiene diferente distribución de elementos y sólo 3 conectores

Capítulo 4 PRUEBAS

4.1 Pruebas del termistor

El termistor fue calibrado y probado comparándolo con un termómetro TPI 312C compatible con calibración de termostatos. Sus características principales se describen en la siguiente tabla:

Tabla 5. Características del termómetro TPIC 312C

Rango de temperatura	-50 a 150 °C
Resolución	0.1 °C
Exactitud	±1 °C
Tiempo de muestreo	1 lectura cada 1.5 segundos

Para las pruebas, se utilizó agua y se realizaron en la mañana de manera que se tuviera un valor de temperatura ambiente bajo. El termistor de control se acondicionó para poder sumergirse en agua.



Figura 53. TPI 312C

Las lecturas que se tomaron también se compararon con las tomadas por un termómetro de vidrio.

Tabla 6. Mediciones de temperatura con termómetro TPI y de líquido en vidrio.

T(°C)	TPI		VIDRIO	
	V	Digital	V	Digital
23.1	4.001	818	4.02	822
24.1	4.031	824	4.02	822
25.1	4.063	831	4.03	824
26.1	4.1	838	4.04	826
27.1	4.133	845	4.07	832
28.1	4.163	851	4.1	838
29.1	4.194	858	4.13	844
30.1	4.218	863	4.16	851
31.1	4.248	869	4.17	853
32.1	4.275	874	4.22	863
33.1	4.302	880	4.25	869
34.1	4.326	885	4.28	875
35.1	4.348	889	4.3	879
36.1	4.374	894	4.34	887
37.1	4.396	899	4.36	892
38.1	4.417	903	4.39	898
39.1	4.437	907	4.41	902
40.1	4.456	911	4.42	904
41.1	4.477	915	4.43	906
42.1	4.496	919	4.46	912
43.1	4.513	923	4.49	918
44.1	4.53	926	4.51	922
45.1	4.545	929	4.51	922
46.1	4.563	933	4.52	924
47.1	4.578	936	4.52	924
48.1	4.593	939	4.52	924

Ambas temperaturas arrojaron diferentes gráficas, el sistema se probó después con las funciones de ambas para comparar la temperatura del equipo y la temperatura del termómetro digital.

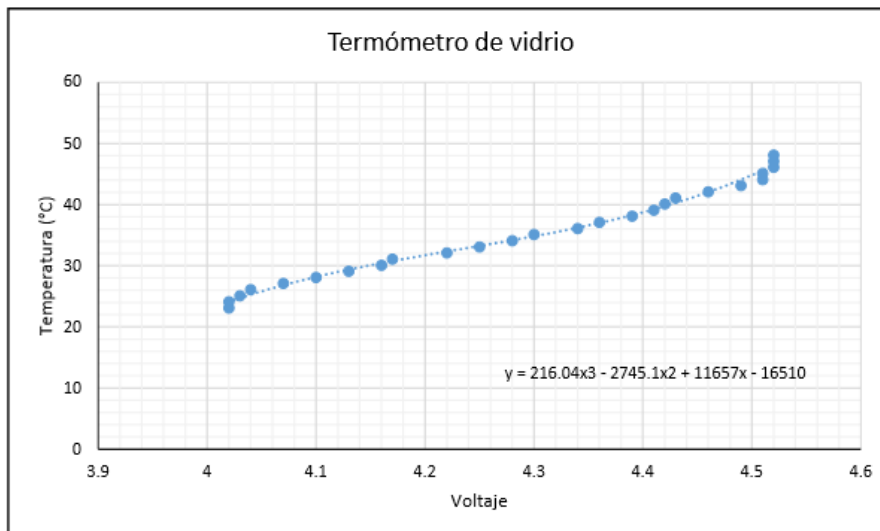
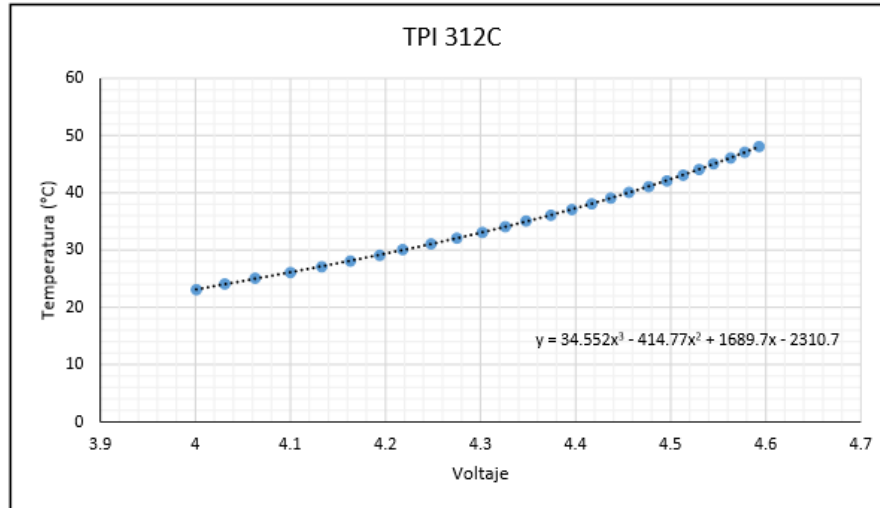


Figura 54. Gráficas de temperatura vs voltaje para los dos termómetros

Los polinomios que se grafican y se pueden ver en la figura 54 se programaron en el PIC para validar la temperatura que arrojó el sistema de calibración. Nuevamente, la prueba se llevó a cabo a temperatura ambiente (23 °C) durante la mañana, se agregó poco a poco agua caliente para aumentar la temperatura y se aseguró de mantener homogeneidad. La temperatura se aumentaba un grado a la vez y la lectura se llevó a cabo una vez se había alcanzado un equilibrio térmico.

En la siguiente tabla se ve el registro de temperatura con ambas funciones, el valor que se registró corresponde al valor promedio observado.

Tabla 7. Comparación de temperaturas obtenidas con respecto a las funciones generadas

Función		
T(°C)	Vidrio (°C)	TPI (°C)
23.1	23	23.1
24.1	24	24
25.1	26.5	25
26.1	28.2	26.1
27.1	29.4	27
28.1	30	28
29.1	31	29
30.1	32.4	30
31.1	33.3	30.9
32.1	33.9	31.9
33.1	34.4	33
34.1	35.5	33.9
35.1	36.6	35
36.1	37	35.9
37.1	38.8	37.2
38.1	39	38.2
39.1	40.9	39.2
40.1	41.4	39.9
41.1	43.4	41.2
42.1	44.1	41.9
43.1	45.6	42.9
44.1	47.1	44.1
45.1	48.1	44.8
46.1	50	46
47.1	52	47.1
48.1	53.2	47.9

Se puede observar que los resultados obtenidos con el polinomio correspondiente al termómetro de vidrio son muy diferentes a lo esperado, el error promedio para esta función es de aproximadamente 2 °C en promedio. El polinomio generado en base al termómetro digital por otro lado, muestra un error promedio de aproximadamente 0.1 °C, lo cual es adecuado para la aplicación.

Las causas de los resultados tan erróneos obtenidos con el termómetro de vidrio se deben a errores de paralaje durante la toma de información y la naturaleza tan lenta del transductor de la columna de mercurio.

4.2 Prueba del sistema de control

El sistema de control se puede probar en una simulación antes de probar el sistema real. La simulación del controlador se llevó a cabo con Proteus 8. La comparación de entrada y salida del controlador difuso se simuló en MATLAB con el toolbox de lógica difusa.

En MATLAB se puede utilizar el Fuzzy Logic Designer para establecer las funciones de membresía de entrada y salida, y crear la lista de reglas.

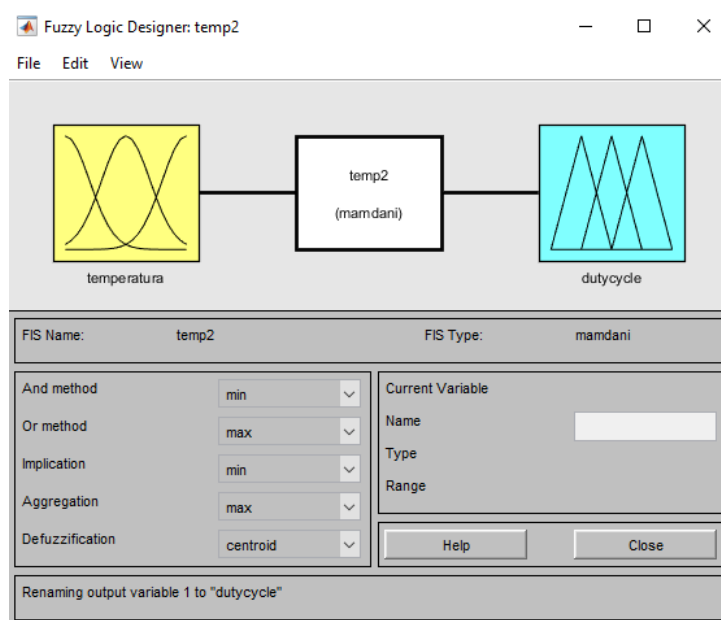


Figura 55. Ventana de Fuzzy Logic Designer

Como entradas sólo se tiene la temperatura y como salida se tiene el porcentaje del duty cycle para el PWM. En la ventana se ven algunos parámetros como el método de defuzzificación que por defecto es “centroid” (centro de gravedad) y la manera en cómo se hace la inferencia.

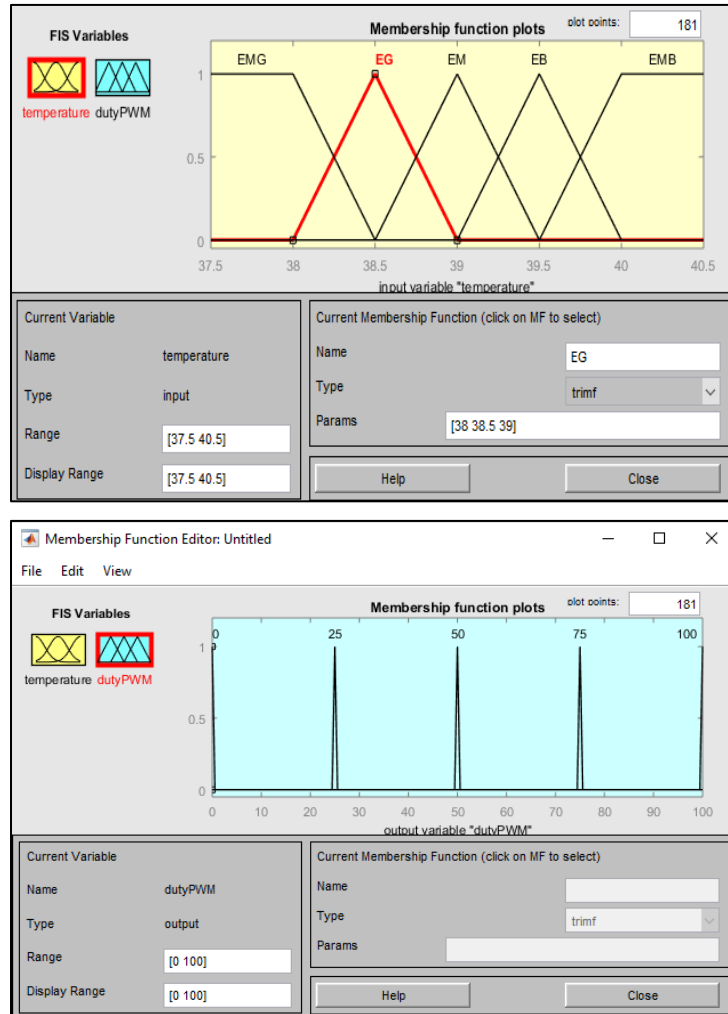


Figura 56. Funciones de membresía en el diseñador de MATLAB

Para esta prueba se consideró una temperatura de referencia de 40 °C y un intervalo de 2 °C para visualizar mejor la relación de reglas ya que el propósito es demostrar el desempeño del controlador difuso. Con ayuda del visor de reglas, es posible comparar los valores de salida con respecto a la entrada y analizar el resultado en el sistema de control.

En la ventana de visualización de reglas se observan las entradas a la izquierda y las salidas a la derecha. Una línea vertical roja puede deslizarse a lo largo de los valores de entrada para ver la salida correspondiente de manera dinámica. En la parte de debajo de la ventana hay una caja para introducir los valores específicos.



Figura 57. Visualizador de reglas con diferentes valores de entrada

Los valores de entrada de voltaje para el microcontrolador se obtienen por medio de la ecuación (18). Con ayuda de wólfam alpha se pueden obtener los valores, éstos para cada temperatura que se requiera.

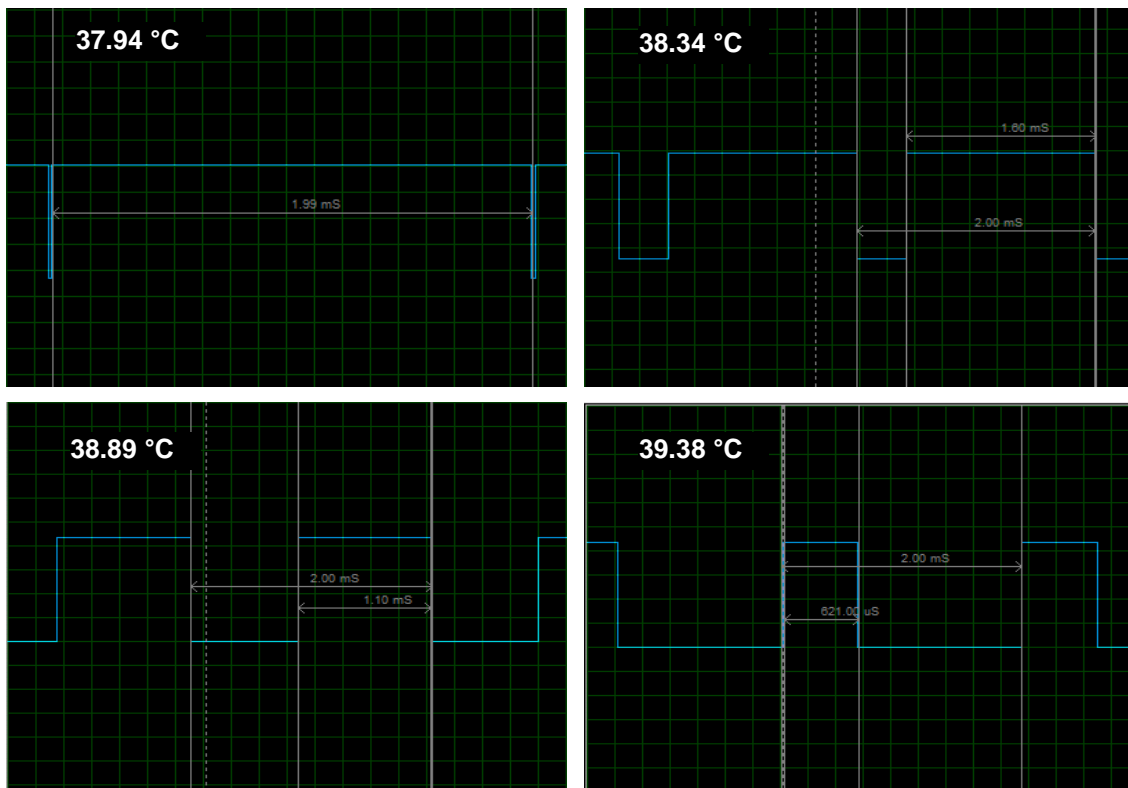
En Proteus se tiene el sistema completo, con un osciloscopio virtual se puede visualizar el ancho de pulso del PWM y compararlo con el resultado esperado.

La frecuencia del PWM es de 500Hz, a partir de éste dato y los resultados de la figura 49 se obtuvieron los datos para la tabla 8, en donde se registran los valores de PWM, voltaje, porcentaje de duty cycle y su valor en tiempo.

Tabla 8. Valores de voltaje, temperatura, duty cycle y su equivalente en segundos

Temperatura real(°C)	voltaje	Temperatura pic16f877a (°C)	%PWM	Tiempo(s)
38	4.414	37.94	100	0.002
38.5	4.425	38.34	83	0.00166
39	4.435	38.89	55.5	0.00111
39.5	4.445	39.38	31	0.00062
40	4.455	39.87	6.5	0.00013
40.5	4.464	40.37	0	0

En las siguientes imágenes se muestran los anchos de pulso que corresponden a lo predicho en la tabla anterior.



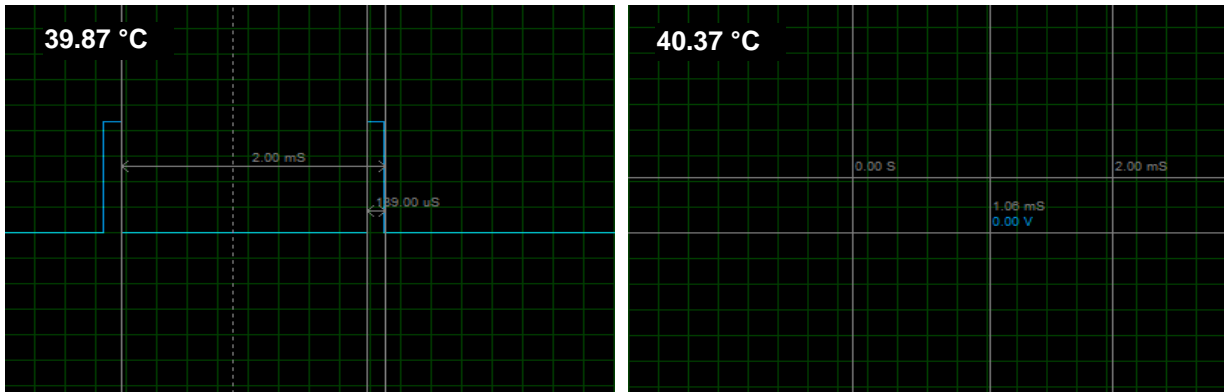


Figura 58. Capturas del osciloscopio digital en la simulación

4.3 Prueba de funcionamiento real

El equipo se probó para observar el comportamiento del sistema de control, cambiando valores de set-point y asegurándose que se mantuviera estable, también se observó el ruido durante los registros. Las observaciones de las primeras pruebas:

- El tiempo que tomó en alcanzar la temperatura deseada, fue de 2 minutos cuando se encendió por primera vez.
- Tuvo un error de aproximadamente ± 0.3 °C
- Presentó problema relacionado con la temperatura del MOSFET, por lo que se agregó un disipador con más capacidad de disipación.
- Se observó un ligero ruido que fue corregido aterrizando el pad y forrando la caja internamente con papel aluminio

La siguiente figura muestra la distribución de cómo se despliega en el LCD:

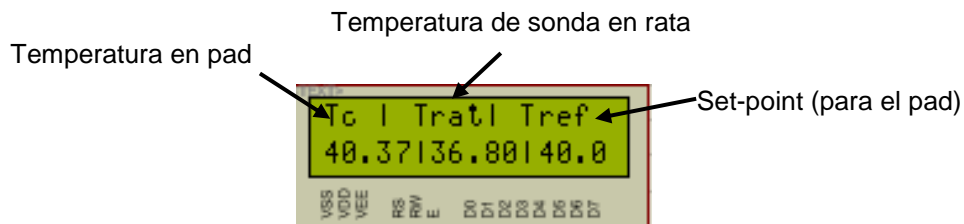


Figura 59. Distribución del LCD



Figura 60. Fotos del equipo funcionando. Se muestran diversos valores del sensor en el pad (Tc)

El ruido durante las primeras pruebas era demasiado grande; con la frecuencia de 60Hz y una amplitud exagerada, esto aún con el equipo apagado. Las medidas para arreglar este problema fueron las siguientes:

- Probar el sistema forrando el chasis con papel aluminio
- Evitar que los transformadores tuvieran contacto directo con el chasis
- Inspeccionar que el sistema no tuviera cables sueltos o corto-circuitos
- Aterrizar pad y chasis



Figura 61. Forro con papel aluminio.

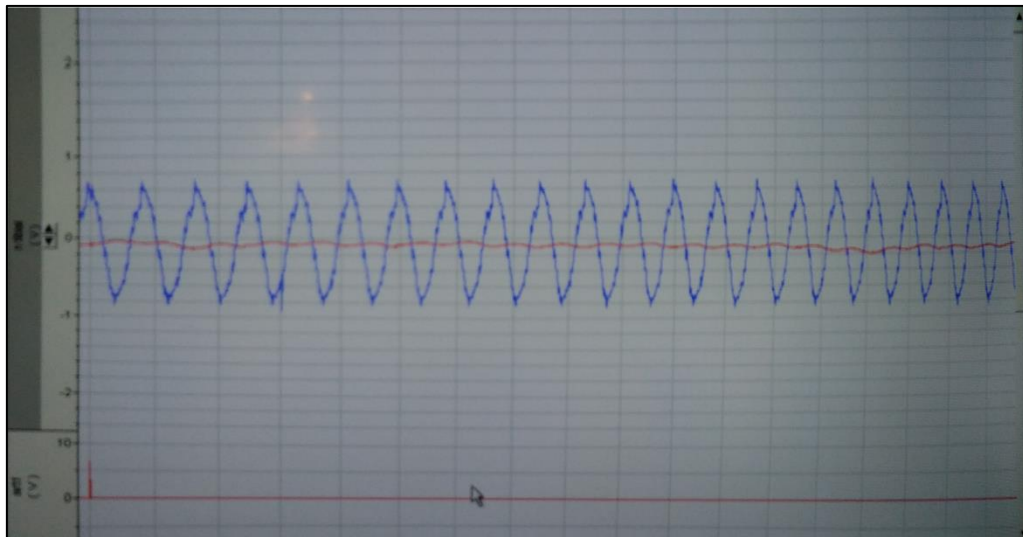


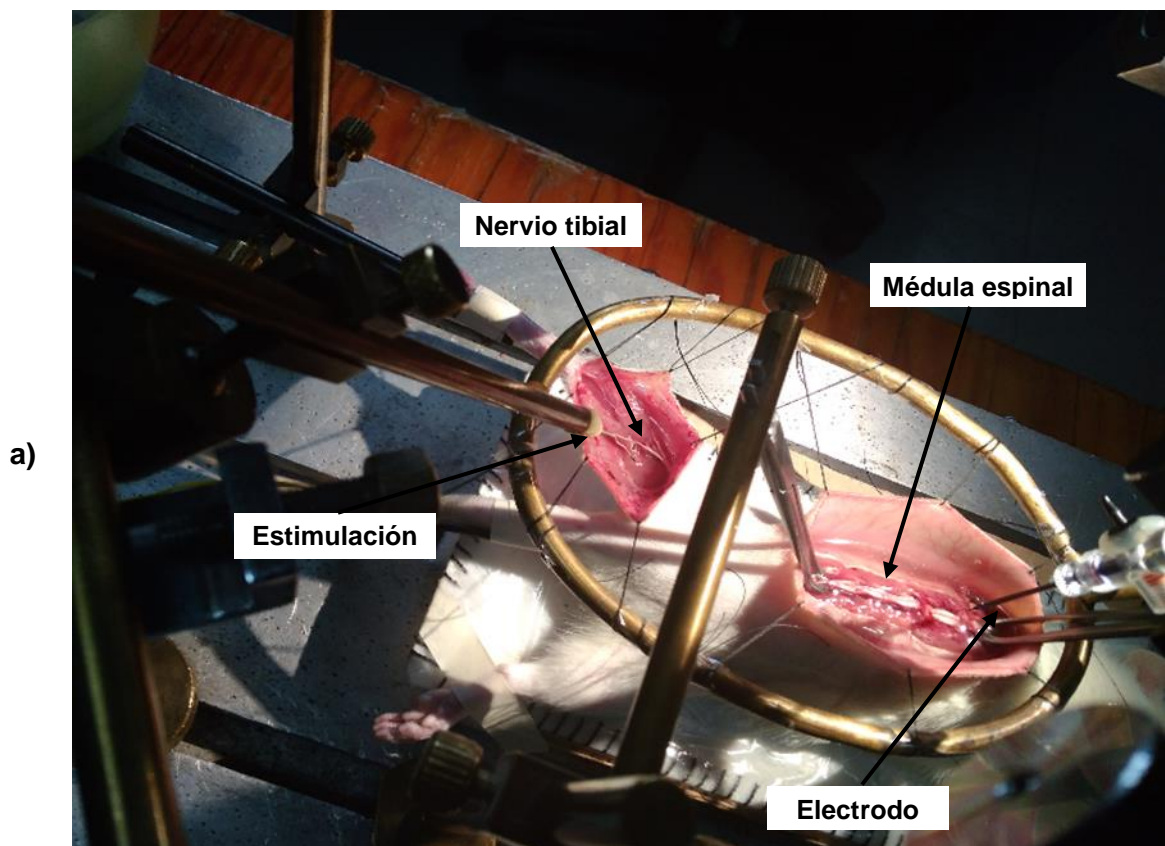
Figura 62. Ruido en el registro durante las primeras pruebas

Para el prototipo final, considerando los resultados después de forrar la tapa del chasis con papel aluminio, donde el ruido de alta amplitud fue eliminado, la tapa del chasis fue cambiada por una de tapa de aluminio.

Capítulo 5 RESULTADOS

El equipo se utilizó durante varios experimentos con ratas, durante los cuales se vigiló el control, la calibración de los sensores, el ruido y la facilidad de uso.

En los experimentos biológicos, a la rata se le hace una laminectomía para exponer la médula espinal, y un electrodo insertado en el asta dorsal, la cual registra potenciales evocados desde el nervio tibial (fibras C). La señal que se registra es de muy baja amplitud (orden de micro voltios) y baja frecuencia (alrededor de 50Hz), por esta razón es necesario asegurarse que haya la menor cantidad de ruido de 60 Hz posible.



b)

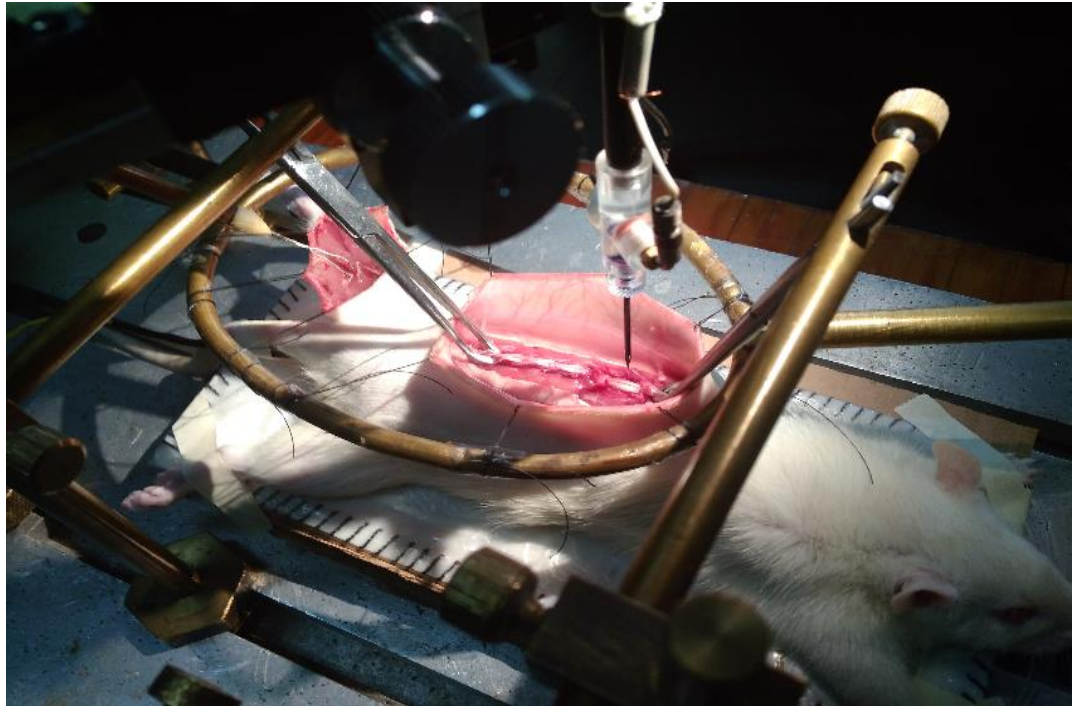


Figura 63. Fotografía de rata con médula expuesta, en la pierna izquierda se ha expuesto el nervio tibial. Se puede ver también el electrodo de registro y el estimulador

El ruido más difícil de eliminar es el de 60Hz, sin embargo, después de las correcciones en el dispositivo, eso depende de otros factores ajenos al equipo como la impedancia de electrodos, mala configuración de tierra, mal aislamiento, etc.

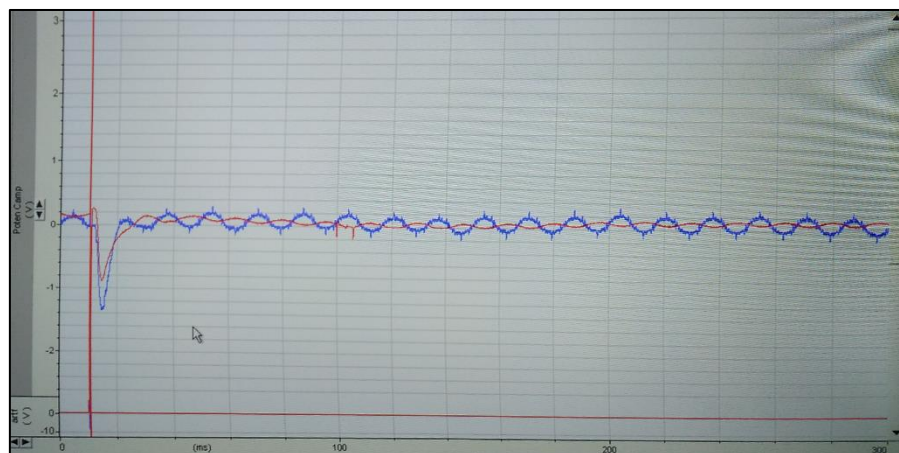


Figura 64. Señal con ruido de 60 Hz (trazo azul)

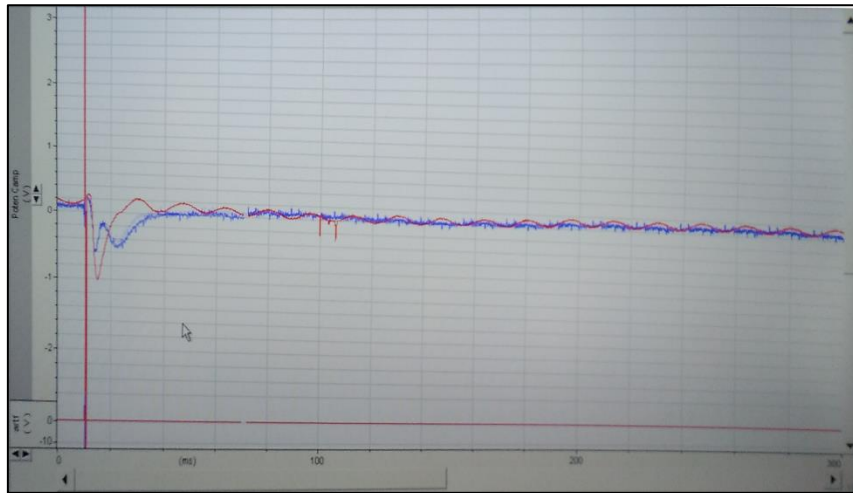


Figura 65. Señal sin ruido de 60Hz con transientes (trazo azul)

De las fotografías anteriores se puede apreciar la diferencia de la señal con ruido de 60Hz y la señal filtrada.

Ruido de alta frecuencia durante las transiciones del MOSFET es visible durante algunos momentos, sin embargo, no interfieren con la forma de la onda que se pretende registrar y no aparecen todo el tiempo.

En cuanto al control de temperatura, considerando la sonda en la rata, la tabla 9 muestra la relación de la temperatura en el pad y la temperatura interna de la rata, con un set-point de 43 °C. La temperatura de 43 °C se eligió ya que no daña al animal y acelera el proceso de calentamiento. El valor de 37 °C, por su parte, es el valor normal al que debe estar el roedor para evitar hipotermia y garantizar que no haya anomalías durante el experimento.

La rata puede tomar hasta 40 minutos en alcanzar la temperatura interna de 37 °C. En la tabla 9 se muestra la relación entre la temperatura interna de la rata y la temperatura de la superficie del pad; las mediciones fueron tomadas una vez que el roedor alcanzó la temperatura interna deseada. Las mediciones subsecuentes también se realizaron en intervalos de dos minutos.

Tabla 9. Relación de temperatura interna y temperatura en el pad

Tempratura en el pad (°C)	Temperatura interna (°C)	Referencia (°C)
43	37.5	43
42.16	37.1	43
41	37.1	43
40.33	37	43
39	37	43
38.4	37.1	43
38.2	37.05	43
38	37.5	43
37.9	37.01	43
37.5	37.03	43
37.2	37.05	43
37	36.7	43

Una vez que el roedor disminuye la temperatura hasta cierto nivel, el sistema comienza a calentar tratando de llegar nuevamente a la referencia, la relación de temperaturas a partir del momento que comienza a aumentar nuevamente se registró en la siguiente tabla:

Tabla 10. Relación de temperatura interna y temperatura en el pad

Tempratura en el pad (°C)	Temperatura interna (°C)	Referencia (°C)
37	36.6	43
38	36.6	43
39	36.7	43
40	36.75	43
41	36.8	43
42	36.93	43
43	37.03	43

Con base a lo anterior, se observa que la exactitud del sistema en relación a la temperatura interna es de aproximadamente ± 0.4 °C. Aunque esto podría cambiar con respecto a factores como temperatura ambiente o tamaño del roedor.

En conclusión, el sistema presenta un control estable permitiendo monitorear y controlar la temperatura de los roedores, no interfiere con los registros de señal y es un dispositivo seguro ya que no daña al animal.

5.1 Discusión

El equipo funciona de acuerdo a lo que se esperaba, con algunas diferencias en comparación de los equipos más costosos, sin embargo, cumple bien con el objetivo. A diferencia de otros dispositivos en el mercado, éste presenta ciertas ventajas que se hacen evidentes desde el punto de vista práctico.

A continuación, se enlistan ventajas y desventajas del equipo actual, basándose en los resultados de diversas pruebas.

Las ventajas que presenta el equipo son:

- Facilidad de operación
- Muy bajo costo
- Mantenimiento es relativamente sencillo (no requiere de componentes especiales difíciles de conseguir)
- Por su diseño, se puede adaptar a otros sensores y métodos para calentar

Las desventajas que presenta:

- Ruido por transientes (algunas aplicaciones)
- Tamaño (en comparación con otros equipos comerciales)
- Opciones limitadas

El diseño del equipo en general es versátil ya que permite mejoras en el futuro. De gran relevancia es el sistema de control, el cual es estable y no requiere de ajustes complejos en programación para adaptar nuevos sensores (en caso de que se tengan que cambiar) o dispositivos actuadores (como cambiar el nicrom).

Capítulo 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El dispositivo es útil para los experimentos cuyas características fueron consideradas en el momento de realizar el diseño. A lo largo de este trabajo se puede ver que el equipo es fácil de modificar y mejorar. La experiencia obtenida con las pruebas permite visualizar las posibilidades para futuras mejoras de manera que sea más parecido a un equipo comercial de gama alta.

El control de temperatura es muy estable debido a que se basa en lógica difusa, no requiere de modelos matemáticos complejos ni de ciertas consideraciones relacionadas al sistema embebido que serían necesarias para un control PID. Problemas relacionados con el ruido resultan ser mínimos y pueden ser corregidos de diversas maneras en caso de que se requiera emplear para una aplicación más especializada.

El mantenimiento de este equipo es una gran ventaja en comparación con otros equipos ya que se puede realizar rápidamente y con una mínima cantidad de componentes. El hecho de que el componente más propenso a fallar sea el MOSFET hace que la detección de fallas sea muy simple.

La operación del equipo es sencilla, con una cantidad de elementos mínimos, lo cual facilita su manipulación en general del sistema, además, no necesita de conocimientos especializados ni manuales complejos para poder ser utilizado por los investigadores.

7.1 Trabajo futuro

Como se mencionó anteriormente, este equipo presenta la posibilidad de mejorar de diversas formas, cosas simples que no requieren hacer cambios grandes sobre el proyecto actual pueden ser:

- Cambiar el alambre nicrom y todo el pad por un calentador de silicón
- Cambiar conectores y cables (aspecto estético)

- Mejorar las fuentes (más pequeñas y más eficientes)
- Análisis de ruido de alta frecuencia.

De las mejoras anteriores, la más sencilla es reemplazar el pad por un calentador de silicón (ver capítulo 1), esto además permitiría reducir la potencia y posiblemente el ruido en general ya que ese tipo de calentadores son de corriente directa y voltajes entre 12 - 24V.

Otras de las mejoras mencionadas son más bien referentes a la estética del equipo, ya que el prototipo final fue elaborado con materiales simples y económicos. Si se piensa en reducir el tamaño del equipo, podría rediseñarse la tarjeta (PCB) e implementar fuentes más pequeñas.

Mejoras relacionadas con agregar más funciones, considerando la idea de un equipo capaz de controlar y monitorear variables vitales en general, podrían ser agregar el monitoreo de presión y frecuencia cardíaca en el roedor, sin embargo, esto depende de la aplicación en la que se utilice el equipo, hacer modificaciones de este tipo implican aumentar la complejidad del equipo además de requerir componentes óptimos para diversos fines como: obtención y procesamiento de señales, transmisión de datos y otras características especiales.

Referencias

- [1] C. R. Skoglund, B. Uvnäs, "Some Inhibitory Phenomena in the Dorsal Root Reflex", *Acta Physiologica*, vol. 6, no. 2, pp. 149-159, Oct. 1943.
- [2] D. FitzMiller, "Monitoring Vital Signs of Laboratory Mice and Rats During Surgery," [Online]. Available: https://kentscientific.com/images/customer-files/PhysioSuite_Withe.pdf. [Accesed: Ene. 24, 2018].
- [3] E. M. Cuenca, *Fundamentos de fisiología*, Madrid: Thomson Editores Spain, 2006.
- [4] K. S. Saladin, *Anatomía y Fisiología*, México, D. F: McGraw-Hill Interamericana, 2012.
- [5] W. J. Hendelman, *Atlas of Functional Neuroanatomy*, Boca Raton, FLA: CRC Press, 2006, pp. 19, 90-91.
- [6] S. Jacobson, E. M. Marcus, *Neuroanatomy for the Neuroscientist*, Boston, MA: Springer, 2008, pp. 59 – 63, 98.
- [7] M. Latarjet, A. R. Liard, *Anatomía Humana*, Bs. As: Médica Panamericana, 2011, pp. 143-147.
- [8] J. K. Mai, G. Paxinos, *The Human Nervous System*, San Diego, CA: Elsevier Academic Press, 2004, pp. 1144-1153.
- [9] C. M. Brooks, K. Koizumi, "Origin of the dorsal root reflex," *Journal of Neurophysiology*, vol. 19, no. 1, pp. 61-74, Ene. 1956.
- [10] K. A. Sluka, W. D. Willis, K.N. Westlund, "The role of dorsal root reflexes in neurogenic inflammation," *Pain Forum*, vol. 4. no. 3, pp. 141-149, Otoño 1995.
- [11] W. D. Willis Jr., "Dorsal root potentials and dorsal root reflexes: a double edged sword," *Experimental Brain Research*, vol. 124, no. 4, pp. 395 – 421, Feb. 1999.
- [12] Q. Lin, J. Wu, W. D. Willis "Dorsal Root Reflexes and Cutaneous Neurogenic Inflammation After Intradermal Injection of Capsaicin in Rats", *Journal of Neurophysiology*, vol. 82, no. 5, pp. 2602-2611, Nov. 1999.
- [13] K. E. Cooper, M. A. M. Sc. M. B. B. S, "Temperature regulation and the hypothalamus", *British Medical Bulletin*, vol. 22, no. 3, pp. 238-242, Sep. 1966.
- [14] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Naucalpan, Edo. de Méx: Prentice-Hall, 1998, pp. 1-8.

- [15] Fuzzy Logic Toolbox User's Guide, 2nd ed., Mathworks, Natick, MA, 2009.
- [16] L. R. Horn, "The Stanford Encyclopedia of Philosophy". Internet: <https://plato.stanford.edu/entries/contradiction/>, Jun. 28, 2006 [Ene. 15, 1018].
- [17] J. Jantzen, *Foundations of Fuzzy Control*, The Atrium, Chichester: John Wiley, 2007, pp. 25-35.
- [18] H. Fraser, *The Electric Kiln*, PA: University of Pennsylvania Press, 2002, pp. 53.
- [19] P. Scherz, S. Monk, *Practical Electronics for Inventors*, NY: McGraw-Hill, pp. 530, 2016.

Anexos

A.1 Tabla de referencia para nicrom

Tabla 11. Tabla de valores de corriente para calendar alambre nicrom

		Approximate Amperes to Heat NiChrome Wire									
Gauge Wire	Diameter (mm)	°F	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
		°C	205	316	427	538	649	760	871	982	1093
10	2.591		16.2	23.3	29.7	37.5	46.0	56.0	68.0	80.0	92.0
11	2.311		13.8	19.2	24.8	31.5	39.0	48.0	57.0	67.0	78.0
12	2.057		11.6	16.1	20.8	26.5	33.5	40.8	48.0	56.0	65.0
13	1.829		9.80	13.6	17.6	22.5	28.2	34.2	41.0	48.0	55.0
14	1.626		8.40	11.6	15.0	18.8	23.5	29.0	34.6	40.5	46.0
15	1.448		7.20	10.0	12.8	16.1	20.0	24.5	29.4	34.3	39.2
16	1.295		6.40	8.70	10.9	13.7	17.0	20.9	25.1	29.4	33.6
17	1.143		5.50	7.50	9.50	11.7	14.5	17.6	21.1	24.6	28.1
18	1.016		4.80	6.50	8.20	10.1	12.2	14.8	17.7	20.7	23.7
19	0.914		4.30	5.80	7.20	8.70	10.6	12.7	15.2	17.8	20.5
20	0.813		3.80	5.10	6.30	7.60	9.10	11.0	13.0	15.2	17.5
21	0.7239		3.30	4.30	5.30	6.50	7.80	9.40	11.0	12.9	14.8
22	0.6426		2.90	3.70	4.50	5.60	6.80	8.20	9.60	11.0	12.5
23	0.5740		2.58	3.30	4.00	4.90	5.90	7.00	8.30	9.60	11.0
24	0.5105		2.21	2.90	3.40	4.20	5.10	6.00	7.10	8.20	9.40
25	0.4547		1.92	2.52	3.00	3.60	4.30	5.20	6.10	7.10	8.00
26	0.4039		1.67	2.14	2.60	3.20	3.80	4.50	5.30	6.10	6.90
27	0.3607		1.44	1.84	2.25	2.73	3.30	3.90	4.60	5.30	6.00
28	0.3200		1.24	1.61	1.95	2.38	2.85	3.40	3.90	4.50	5.10
29	0.2870		1.08	1.41	1.73	2.10	2.51	2.95	3.40	3.90	4.40
30	0.2540		0.92	1.19	1.47	1.78	2.14	2.52	2.90	3.30	3.70
31	0.2261		0.77	1.03	1.28	1.54	1.84	2.17	2.52	2.85	3.2
32	0.2032		0.68	0.90	1.13	1.36	1.62	1.89	2.18	2.46	2.76
33	0.1803		0.59	0.79	0.97	1.17	1.40	1.62	1.86	2.12	2.35
34	0.1600		0.50	0.68	0.83	1.00	1.20	1.41	1.60	1.80	1.99
35	0.1422		0.43	0.57	0.72	0.87	1.03	1.21	1.38	1.54	1.71
36	0.1270		0.38	0.52	0.63	0.77	0.89	1.04	1.19	1.33	1.48
37	0.1143		0.35	0.46	0.57	0.68	0.78	0.9	1.03	1.16	1.29
38	0.1016		0.30	0.41	0.50	0.59	0.68	0.78	0.88	0.98	1.09
39	0.0889		0.27	0.36	0.42	0.49	0.58	0.66	0.75	0.84	0.92
40	0.0787		0.24	0.31	0.36	0.43	0.50	0.57	0.64	0.72	0.79

A.2 Tarjeta principal: circuito y PCB

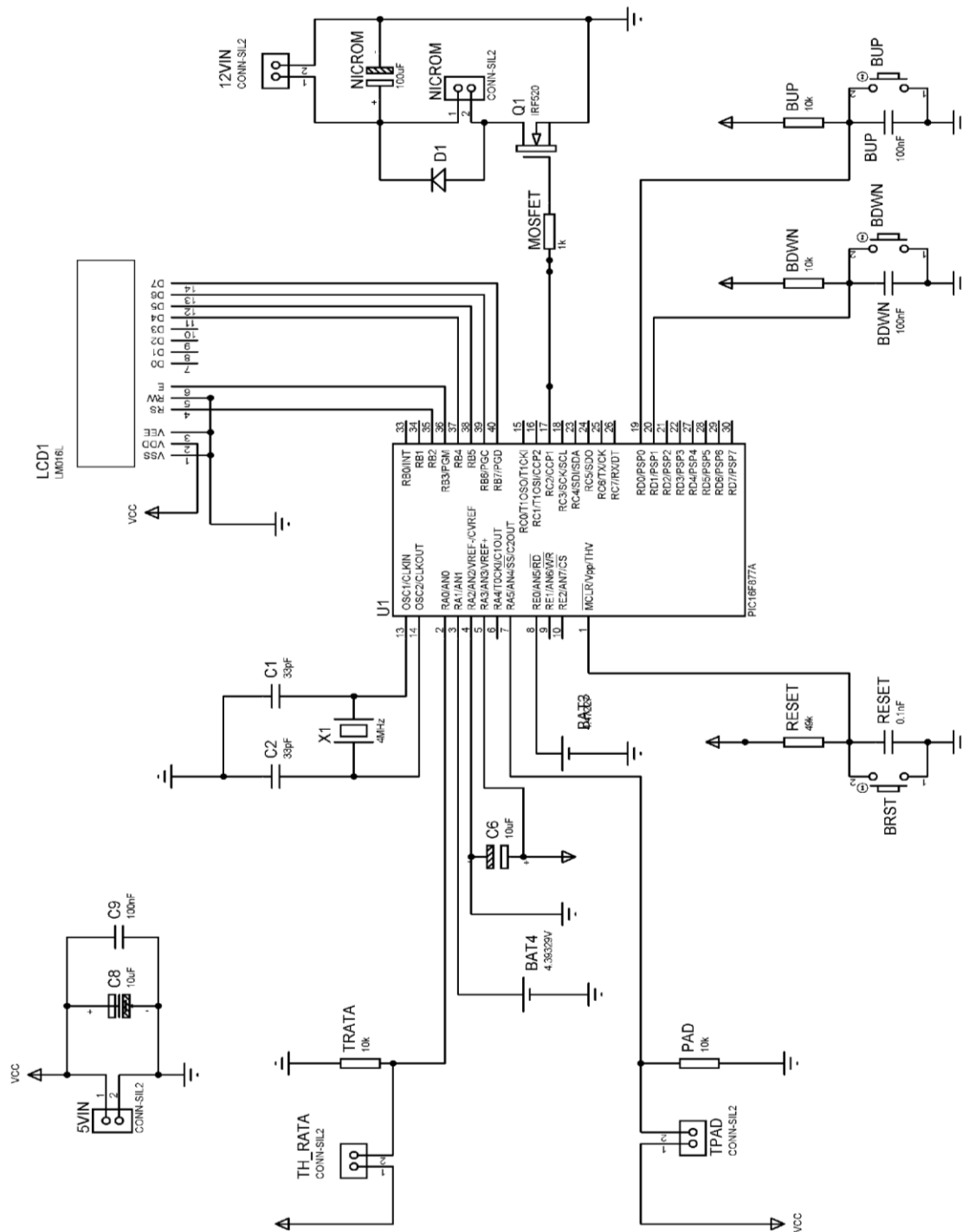


Figura 66. Circuito de la tarjeta principal.

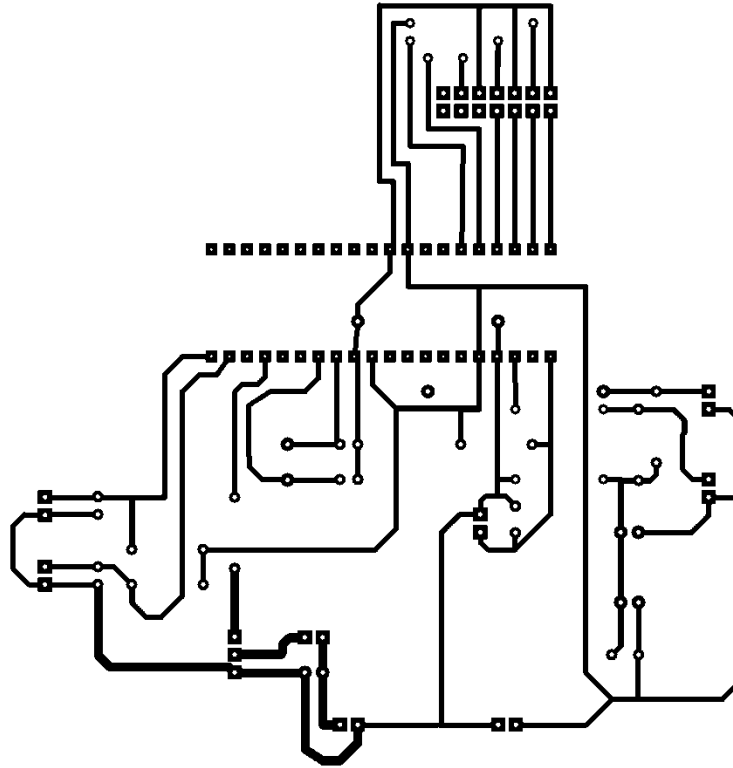


Figura 67. PCB de la tarjeta principal.

A.3 Circuitos de las fuentes

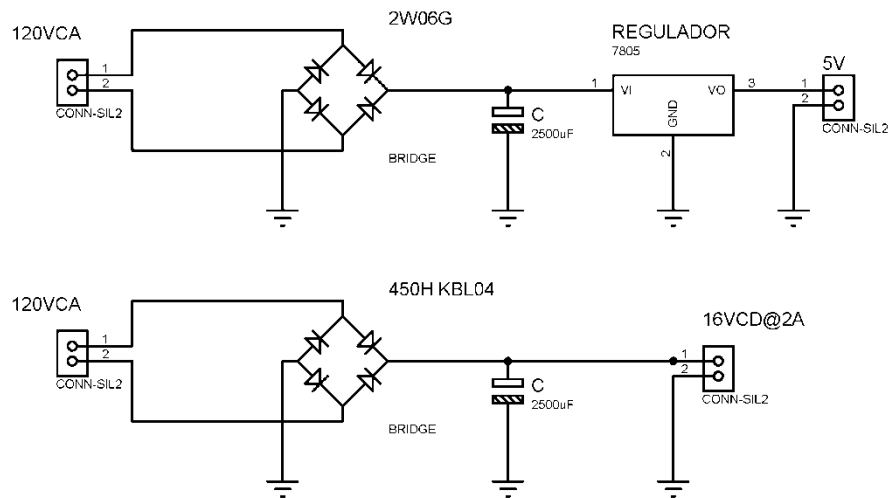


Figura 68. Circuitos usados para las dos fuentes.

A.3 Código del PIC

```
//Constante con número de muestras a promediar
```

```
#define SAMPLES 30
```

```
// LCD module connections
```

```
sbit LCD_RS at RB2_bit;
```

```
sbit LCD_EN at RB3_bit;
```

```
sbit LCD_D4 at RB4_bit;
```

```
sbit LCD_D5 at RB5_bit;
```

```
sbit LCD_D6 at RB6_bit;
```

```
sbit LCD_D7 at RB7_bit;
```

```
sbit LCD_RS_Direction at TRISB2_bit;
```

```
sbit LCD_EN_Direction at TRISB3_bit;
```

```
sbit LCD_D4_Direction at TRISB4_bit;
```

```
sbit LCD_D5_Direction at TRISB5_bit;
```

```
sbit LCD_D6_Direction at TRISB6_bit;
```

```
sbit LCD_D7_Direction at TRISB7_bit;
```

```
// End LCD module connections
```

```
//Variables
```

```
char i;
```

```
float temp_pad,temp_rat;
```

```
char txt1[15], txt2[15], txt3[15];
```

```
float raw1, raw2, volt1,volt2;
```

```
float EMG,EG,EM,EB,EMB;
```

```
float pwm_percent;
```

```
const float pwm_singleton[5]={0.0,25.0,50.0,75.0,100.0};
```

```
unsigned int display_count=0;
```

```
unsigned int duty;
```

```
//Display con sólo 5 caracteres
```

```

void FloatPrint(int row, int col, char *txtin)
{
    int j;
    char txtout[5];          //cadena con texto a desplegar
    for (j=0; j<5; j++ ) {
        txtout[j]=txtin[j];
    }
    LCD_Out(row,col,txtout); //despliegue en LCD
}

//Cálculo de temperatura
float tmp_val(float voltx)
{
    float tx;
    tx= 34.552*(voltx*voltx*voltx) - 414.77*(voltx*voltx) + 1689.7*voltx - 2310.7;

    return tx;
}

//funciones trapezoidales
float trap_inferior(float x,float a, float b)
{
    if(x<a)
        return 1.0;
    else
    {
        if (x>=a && x<b)
            return (b-x)/(b-a);
        else
            return 0.0;
    }
}

```

```
}
```

```
float trap_superior(float x,float a, float b)
```

```
{  
    if(x<a)  
        return 0.0;  
    else  
    {  
        if (x>=a && x<b)  
            return (x-a)/(b-a);  
        else  
            return 1.0;  
    }  
}
```

```
//función triangular
```

```
float triangular(float x,float a, float b, float c)
```

```
{  
    if(x>a && x<=b)  
        return (x-a)/(b-a);  
    else  
    {  
        if(x>b && x<c)  
            return(c-x)/(c-b);  
        else  
            return 0.0;  
    }  
}
```

```
//inferencia y defuzzificación
```

```

float inference(float x, float ref)
{
float CDG=0;
    EMG=trap_inferior(x,ref-0.4,ref-0.3);        // Error muy grande
    EG=triangular(x,ref-0.4,ref-0.3,ref-0.2);    // Error grande
    EM=triangular(x,ref-0.3,ref-0.2,ref-0.1);    // Error medio
    EB=triangular(x,ref-0.2,ref-0.1,ref);        // Error bajo
    EMB=trap_superior(x,ref-0.1,ref);            // Error muy bajo
    CDG =pwm_singleton[4]*EMG + pwm_singleton[3]*EG +
        pwm_singleton[2]*EM + pwm_singleton[1]*EB +
        pwm_singleton[0]*EMB;
    return CDG;
}
//Programa principal
void main()
{
float temp_ref=43.01;    //was 41
ADCON1 = 0x88;          //Control de adc, Vref y puerto A
TRISA = 0xFF;           //Puerto A como entradas
TRISD = 0xFF;           //Puerto D como entradas
PWM1_Init(10000);      //was 20000
PWM1_Start();
Lcd_Init();            // Initialize LCD
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);   // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off

while(1) {
    raw1=0;
    raw2=0;
    for(i=0;i<SAMPLES;i++)
        {

```



```

        raw1+=ADC_Read(5);
        raw2+=ADC_Read(1);
    }
    raw1=raw1/SAMPLES; //promedio de muestras
    raw2=raw2/SAMPLES;

    volt1=raw1*(5/1023.0);
    volt2=raw2*(5/1023.0);

    temp_pad= tmp_val(volt1);
    temp_rat= tmp_val(volt2);

    if (Button(&PORTD, 0, 50, 0))
        temp_ref+=0.5;
    if (Button(&PORTD, 1, 50, 0))
        temp_ref-=0.5;

    Lcd_Out(1,1,"Tc | Trat| Tref");

    if(display_count>5) //despliegue de otras temperaturas (evitar
    variacion en el despliegue)
    {
        FloatToStr(temp_pad,txt2);
        FloatToStr(temp_rat,txt3);
        FloatToStr(temp_ref,txt1);

        FloatPrint(2,1,txt2);
        Lcd_Out(2,6,"|");
        FloatPrint(2,7,txt3);
        Lcd_Out(2,12,"|");
        FloatPrint(2,13,txt1);
    }

```

```
    display_count=0;
}
display_count++;
if(temp_rat>=37.1)    //was 37
    PWM1_set_Duty(0);
else
{
    pwm_percent=inference(temp_pad,temp_ref);
    duty=pwm_percent*2.55;
    PWM1_Set_Duty(duty);
}

Delay_ms(100);
}
}
```