



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño de un sistema para  
controlar la temperatura de  
salida del agua de un  
calentador doméstico**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**INGENIERO MECATRÓNICO**

**P R E S E N T A N**

**CARLOS ALBERTO CUEVAS HERNÁNDEZ**

**ERIK GUTIÉRREZ ROSAS**

Que para obtener el título de

**INGENIERO MECÁNICO**

**P R E S E N T A**

**JESÚS OLIN ENRIQUEZ CHÁVEZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**M.I. BILLY ARTURO FLORES MEDERO**

**NAVARRO**



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**



# TESIS: Desarrollo y construcción de un calentador de agua con regulación de temperatura de salida

## ÍNDICE

ÍNDICE.....	I
AGRADECIMIENTOS:.....	III
Carlos Alberto Cuevas Hernández:.....	III
Erik Gutiérrez Rosas:.....	IV
Jesús Olin Enriquez Chávez:.....	V
<b>Introducción:.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: Antecedentes y especificaciones.....</b>	<b>4</b>
1.1 Historia de los calentadores de agua.....	4
1.2 Tipos de calentadores y sus capacidades .....	5
1.3 Tipos de encendido del quemador .....	12
1.4 Tipos de evacuación de los gases de combustión.....	13
1.5 Dispositivos contra falla de flama. ....	14
1.6 Escaldaduras y su relación con el agua caliente en el hogar.....	16
1.7 Hipotermias y problemas cardiacos: razones para usar agua caliente en la ducha .....	17
1.8 Mercado de los calentadores de agua hoy en día. ....	17
1.9 Especificaciones generales del proyecto.....	19
1.10 Diagrama general de funcionamiento .....	19
<b>Capítulo 2: Objetivo, alcances y especificaciones.....</b>	<b>20</b>
2.1 Problema observado.....	20
2.2 Hipótesis.....	20
2.3 Justificación.....	20
2.4 Objetivo general .....	20
2.5 Alcances u objetivos específicos .....	20
2.6 Requerimientos.....	20
2.7 Aviso sobre la información contenida dentro de este trabajo .....	22

<b>Capítulo 3: Diseño conceptual.....</b>	<b>23</b>
3.1 Sensores de temperatura .....	23
3.2 Válvulas .....	31
3.3 Microcontroladores:.....	34
3.4 Tipos de baterías:.....	34
3.5 Sistema de control .....	39
3.6 Interfaz de usuario .....	39
3.7 Instrucciones de la prueba del prototipo .....	39
<b>Capítulo 4: Diseño de detalle.....</b>	<b>42</b>
4.1 Características físicas y de trabajo del calentador a modificar .....	42
4.2 Diseño y manufactura de adaptador para termopar tipo k .....	43
4.3 Control automático del sistema de calentamiento de agua. ....	48
4.4 Gestión de la energía.....	57
4.5 Método de programación usado. ....	58
4.6 Pseudocódigo del programa. ....	58
<b>Capítulo 5: Análisis de resultados y conclusiones.....</b>	<b>61</b>
5.1 Captura de datos. ....	61
5.2 Ahorros energéticos. ....	64
5.3 Estadísticas de Temperaturas y Perdidas. ....	68
5.4 Conclusiones sobre el ahorro de gas.....	71
5.5 Conclusiones generales .....	71
<b>Bibliografía:.....</b>	<b>72</b>
<b>Referencias de imágenes:.....</b>	<b>74</b>

# **AGRADECIMIENTOS:**

## **Carlos Alberto Cuevas Hernández:**

Dedicada especialmente a mis padres y hermanos, quienes me han inspirado para ser una mejor persona y nunca dejaron de creer en mí, además de brindarme un apoyo incondicional a lo largo de mis estudios universitarios y durante el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores de la universidad, por compartir parte de su experiencia profesional y encaminarme en el mundo de la ingeniería.

A mi familia, amigos y compañeros, porque gracias a su convivencia, la universidad fue de las mejores experiencias de mi vida.

A Verónica, por permitirme compartir hermosos momentos a su lado e impulsarme a siempre seguir adelante.

Hago mención especial a mi abuelitas María†, Magdalena†, y Esther, y mi abuelo Lazaro† quienes fueron personas importantes a lo largo de mi infancia.

**Erik Gutiérrez Rosas:**

Con agradecimiento especial a mi madre Sofía, que en su trabajo duro y persistente encontré la fuerza e inspiración para desarrollar me a plenitud.

A mis hermanos, Janeth, Eduardo y Alan, por ser ejemplo de lo que el talento, sabiduría, dedicación y coraje pueden llevar a un individuo a superarse en todos los ámbitos y, sobre todo, por creer siempre los proyectos que emprendí.

A Ana, por el apoyo y cariño que me ha dado en todo momento, por enseñarme que no importa el tamaño de los problemas cuando se confía en uno mismo para solucionarlos.

A mis mejores amigos, que han llenado de mi vida de experiencias enriquecedoras y alegrías sin igual.

**Jesús Olin Enriquez Chávez:**

A mi madre, Norma, por todo el apoyo brindado a lo largo de toda mi formación. Por ser un ejemplo de superación y constancia.

A mi abuela, Sara, por creer en mi y estar siempre al pendiente de toda la familia.

A mi abuela, Aurora, por esas conversaciones tan amenas de temas tan diversos.

A mi familia por los consejos brindados y el apoyo recibido de su parte, por mostrarme que en la vida podrán faltar muchas cosas menos su apoyo.

A Dulce, por permitirme entrar en su vida para disfrutar del momento y compartir tantas risas y alegrías.

Dedico este trabajo a mi abuelo Delfino M. Chávez†, agradezco por ser un ejemplo de trabajo arduo y mostrarme que para salir adelante solo hace falta tener ganas de hacerlo.

# Introducción:

A lo largo de este trabajo se presenta parte de la forma de trabajo e investigación que culmina con el desarrollo de un prototipo funcional de un calentador de paso instantáneo con control de temperatura automatizado.

Para lograr dicho diseño funcional, se establece un método de diseño, ya que, como se menciona en el libro *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*: “Él diseño es un proceso iterativo con muchas fases interactivas” [23].

Existen diversos autores que clasifican las diferentes fases de diseño en ingeniería, de las cuales se presentan algunas.

Para Dixon, el proceso de diseño en ingeniería se divide en seis etapas:

- **Reconocimiento y comprensión de la meta u objetivo:** Dicha meta puede ser asignada o bien, impuesta por uno mismo. Sea cual sea el caso, la meta u objetivo establece lo que se debe satisfacer.
- **Descripción de una tarea:** Se refiere a las pequeñas tareas específicas que deben realizarse para lograr el objetivo o meta general
- **Análisis ingenieril:** Requiere que el ingeniero involucrado en el proceso de diseño tenga una idea, ya sea nueva o antigua, la cual pueda aplicarse con el fin de resolver su problema. Esta etapa requiere de imaginación e inventiva para lograr la implementación deseada, en otras ocasiones simplemente basta con una mera aplicación rutinaria o con la revisión de una idea existente.
- **Especificación de la solución:** Una vez que se encuentra y selecciona la idea para resolver el problema, el ingeniero debe analizar su idea. Para realizar dicha acción se requiere una clara definición del problema a resolverse y proceder a la construcción de un modelo, ya sea en planos, implementación en laboratorio, o una combinación de ambas, el cual se busca tenga una rápida elaboración y aporte resultados significantes. En dicho modelo se requiere que exista la aplicación de los principios físicos involucrados y que este aporte la obtención de resultados cuantificable, los cuales son sometidos a un proceso de comprobación, evaluación, generalización y optimización.
- **Producción:** Finalizado el análisis de resultados, si estos son favorables, el ingeniero debe transcribir su solución en términos de producción, siendo esta etapa la llamada especificación de la solución.
- **Distribución ventas y servicios:** El proceso de diseño se considera finalizado cuando se llega a la etapa de fabricación y distribución del producto, el cual presenta una mejora o innovación con respecto a lo que se encuentra en el mercado actual.

Otro autor sobre diseño es Earle, el cual establece el proceso de diseño de la siguiente manera:

- **Identificación del problema:** El fin de crear un diseño es la de satisfacer una necesidad, por ello, para comenzar con el diseño de algún producto o proceso, el diseñador debe conocer el problema o necesidad a resolver, ya sea mediante estadísticas, entrevistas, datos históricos, observaciones personales o proyecciones de conceptos actuales.
- **Ideas preliminares:** Ya conocido el problema de manera clara es necesario el recopilar ideas preliminares a partir de las cuales se logre asimilar los conceptos de diseño. En esta etapa se busca el recopilar la mayor cantidad de ideas, ya sea que estas impliquen adaptar ideas anteriores o bien el tomar en cuenta ideas nuevas
- **Perfeccionamiento del problema:** En esta etapa se analizan y evalúan las ideas obtenidas en el paso anterior, de esta manera se establecen los alcances y limitantes presentes, de manera que estas puedan combinarse y perfeccionarse con el fin de dar soluciones razonables al problema.
- **Análisis:** Establecidas las soluciones razonables, es necesario realizar un análisis minucioso tomando en cuenta factores tales como el humano, la apariencia comercial, la resistencia, formas de operación, cantidades físicas y economía dirigidos a satisfacer los requisitos de diseño. Lo anterior descrito puede realizarse mediante la implementación de modelos prototipo implementados a escala o bien tamaño natural.
- **Decisión:** Finalizado el análisis, llega el momento en que el proyecto debe ser aceptado o rechazado, ya sea en su totalidad o de manera parcial. De esta manera, se establece si el diseño es capaz de resolver de manera óptima el problema presentado, gracias a que ya se cuenta con experiencia técnica e información cuantificada.
- **Realización:** Llegada a esta etapa, el ingeniero encargado del diseño establece en planos y especificaciones finales para la construcción del diseño, en los cuales se deben de considerar puntos clave tales como los métodos de fabricación, materiales a utilizar, métodos de ensamblaje, entre otros.

Un autor más es George Dieter, el cual considera el proceso de diseño mediante los pasos mencionados a continuación:

- **Reconocimiento de una necesidad:** Se considera como necesidad a alguna insatisfacción presente en alguna situación existente. En una empresa, dicha necesidad es identificada desde muchos puntos de vista, ya sea durante el proceso de producción o bien a través de clientes y distribuidores.
- **Definición del problema:** Esta es la parte más crítica del diseño, y debido a que una mala definición de la problemática de manera correcta, el diseño llegara a soluciones inadecuadas.
- **Recopilación de la información:** Teniendo clara la problemática, es necesario recurrir a la recopilación de información que pueda aportar al diseño las acciones necesarias para resolver el problema observado. Deben considerarse fuentes más allá de los libros de texto, tales como artículos

académicos, documentos del gobierno, registros de patente, informes de analistas, consultorías externas, entre otros. De esta manera se obtiene un panorama más amplio sobre lo que el diseño resolverá, además de que se conocerán las posibles soluciones implementadas y nos obligara a buscar opciones que presenten una innovación o mejora considerable.

- **Conceptualización:** En este punto del diseño, nuestro conocimiento de la situación nos permite determinar los mecanismos, procesos o configuraciones que al combinarse nos proporcionan al diseño una satisfacción completa de las necesidades presentadas. En este punto es fundamental la inventiva y creatividad del diseñador para lograr la solución adecuada.
- **Evaluación:** En este punto, se requiere de una cuantificación que permita analizar a detalle el diseño. Generalmente se realiza mediante cálculos, simulaciones computarizadas, modelos analíticos o bien mediante la construcción de un modelo prototipo experimental.
- **Presentación del diseño:** Aquí se presentan los resultados obtenidos durante la evaluación, mediante una presentación oral apoyada por un trabajo escrito, el cual contiene los planos, programas de computadora y modelos que se crean convenientes.

Cabe mencionar que las definiciones antes mencionadas no deben tomarse como dogmas, e incluso se puede realizar un plan de acción combinando teorías de diseño de los autores antes mencionados.

En el caso de este trabajo de tesis, nuestra forma de acción se apega al método de diseño presentado por George Dieter. El cual podemos resumir de la siguiente manera:

- **Reconocimiento de una necesidad:** La necesidad es la de ofrecer agua caliente en el hogar, la cual se ve reflejada en el capítulo 1, ya que se habla de la evolución de calentadores de agua domésticos y los riesgos del uso de agua a altas temperaturas
- **Definición del problema:** Se observa que los calentadores se usan de manera tal que se gasta energía térmica al elevar la temperatura del agua por encima de la temperatura de uso. Esto ocasiona un gasto de combustible, además de los riesgos por altas temperaturas para el usuario. Todo esto se observa en el capítulo 2.
- **Recopilación de la información:** Se ha obtenido una semblanza sobre el mercado de los calentadores, por lo cual hemos conocido las acciones que se han tomado con respecto al problema mencionado anteriormente. Además, para lograr el objetivo se requiere de diversas tareas tales como instrumentación, manufactura y programación. Dicha información se observa en el capítulo 3.
- **Conceptualización:** La conceptualización de nuestro diseño es plasmada en el capítulo 4, ya que se consideran la información obtenida y presentada en capítulos anteriores, de manera que implementa el modelo prototipo.
- **Evaluación y presentación del diseño:** Esto se observa en el capítulo 5, ya que mostramos las cuantificaciones realizadas en el prototipo, además de plasmar los resultados obtenidos.

# Capítulo 1: Antecedentes y especificaciones

En esta tesis trataremos sobre los calentadores de agua de uso doméstico, ya que se pretende modificar uno de ellos. Para ello primero hablaremos sobre su evolución a lo largo de la historia además del riesgo de usar agua a temperaturas elevadas.

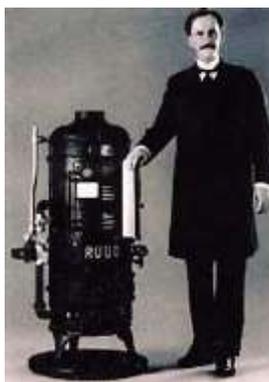
## 1.1 Historia de los calentadores de agua

A lo largo de la historia, los hábitos de higiene personal se han ido modificando de acuerdo a las épocas debido a que el hombre, en su búsqueda por una mejora en su bienestar personal, ha desarrollado diversos aparatos que han incorporado al hogar, tal como el calentador de agua.

Un calentador de agua, también conocido como boiler, es una máquina térmica que utiliza energía para elevar la temperatura del agua.

El primer calentador de agua hizo su aparición durante el siglo XIX [10] gracias al pintor londinense Benjamin Waddy Maughan, quien en 1868 patentó el primer calentador de agua instantáneo para uso residencial. Dicho modelo calentaba el agua mediante el uso de gas natural, pero no contaba con un conducto para la ventilación de los gases de vapor, lo cual lo hizo inseguro para su uso en interiores.

Para el año de 1889, el ingeniero mecánico Edwin Ruud [10] construyó el primer aparato a gas para calentar agua y el almacenamiento automático, el cual fue patentado al año siguiente. Para el año de 1897 funda la Ruud Manufacturing Company, con lo cual surgen gran cantidad de diseños y funcionalidades para este aparato.



*Ilustración 1. Edwin Ruud creador del primer calentador de agua patentado [1]*

A partir de ese momento, los calentadores de agua se han vuelto parte importante en la vida cotidiana, debido a que el uso del agua caliente dentro del hogar es muy variado, desde tibia para lavarse las manos, ducharse hasta hervirla para beber, entre otros usos.

En la actualidad existen diversos dispositivos para el calentamiento del preciado líquido, cuyas cualidades y características varían dependiendo del uso, la cantidad de servicios, la temperatura máxima que alcanzan, forma de realizar el calentamiento y condiciones de trabajo, las cuales son características a tomar en cuenta al tomar una decisión pertinente en la adquisición de dichos productos.

Numero de servicios simultáneos: *Es una estimación de la demanda de agua constante. La cantidad de servicios simultáneos se puede definir de la siguiente manera:*

TABLA 1. DEFINICIÓN DE LA CANTIDAD DE SERVICIOS SIMULTÁNEOS [VÉASE BIBLIOGRAFÍA 13]

<i>Cantidad de servicios</i>	<i>Definición</i>
<i>1/2 SERVICIO</i>	<i>LAVABO</i>
<i>1 SERVICIOS</i>	<i>REGADERA DE BAÑO</i>
<i>2 SERVICIOS</i>	<i>LAVADORA O BAÑO EN TINA</i>

*Presión de funcionamiento:* Antes de realizar la instalación de cualquier calentador se debe de tener en cuenta la presión hidráulica de trabajo. Esta se especifica dentro de las características técnicas del calentador y se dividen de la siguiente manera:

TABLA 2. PRESIONES DE TRABAJO DE LOS CALENTADORES DE AGUA [VÉASE BIBLIOGRAFÍA 14]

<b>Baja Presión</b>	<b>Media Presión</b>	<b>Alta presión</b>
Viviendas con abasto de agua por gravedad mediante un tinaco. Aplica en edificios de hasta 5 niveles	Viviendas con abasto de agua mediante bomba de agua o equipo hidroneumático de baja potencia.	Viviendas con abasto de agua mediante bomba de agua, equipo hidroneumático o directo de la toma municipal
Se debe usar calentador, regadera y accesorios para presiones de trabajo de 0.2 a 1 Kg/cm <sup>2</sup>	Se debe usar calentador, regadera y accesorios para presiones de trabajo de 1 a 3 Kg/cm <sup>2</sup>	Se debe usar calentador y regadera y accesorios para presiones de trabajo de 3 a 6 Kg/cm <sup>2</sup>

## 1.2 Tipos de calentadores y sus capacidades

Los calentadores de agua pueden ser clasificados [12] según el combustible de trabajo o la forma en que realizan el calentamiento. Cada uno de ellos cuenta con sus ventajas y desventajas, distintas capacidades de agua y formas de instalación, costos de mantenimiento y espacio a ocupar.

Estos detalles técnicos son muy necesarios de conocer para saber cuál es el calentador más indicado para satisfacer nuestras necesidades de agua caliente.

Para hablar de la capacidad de un calentador, es necesario conocer las características de trabajo que se deben de tomar en cuenta al momento de seleccionar el mejor equipo de acuerdo a las necesidades del cliente.

### 1.2.1 Calentador de agua de depósito (termo tanques)

Este tipo de calentadores poseen un contenedor donde se acumula el agua y se eleva su temperatura hasta alcanzar la temperatura seleccionada mediante el termostato. La capacidad del depósito es variable y existen desde modelos con capacidades desde 15 hasta 200 litros. Es ideal para su uso en lugares con bajas presiones de agua.

Este tipo de calentadores cuenta con modelos cuyo combustible de trabajo puede ser la electricidad, gas L.P. o gas natural. Con ellos es posible suministrar agua caliente a más de un servicio a la vez, siempre que su capacidad lo permita. Como ejemplo véase la tabla 3.

TABLA 3. TAMAÑO Y CARACTERÍSTICAS DE USO DE LOS CALENTADORES DE DEPÓSITO

[VÉASE BIBLIOGRAFÍA 13]

Número de personas	Número de servicion	Litros de agua
1	De 1 a 3	De 20 a 100
De 1 a 2	4	De 101 a 130
3	5	De 131 a 150
4	6	De 151 a 200
5 ó más	Más de 6	Más de 200

Otro de los aspectos a tomar en cuenta en este tipo de calentadores es el tiempo de recuperación, es decir la cantidad de litros por minuto que es capaz de calentar.



Ilustración 2. Calentador de depósito marca Calorex [2]

Una clara desventaja de usar este tipo de calentadores de agua es su tamaño, véase la ilustración 2, el cual va desde los 50 cm hasta los 120 cm, además de que los modelos de gas solo pueden ser instalados en exteriores debido a que emiten cantidades considerables de gases producto de la combustión.

El principio de operación del calentador de agua por depósito, véase la ilustración 3, consiste en la transferencia de calor de los gases producidos por la combustión al agua contenida en un depósito mediante mecanismos de convección natural, hasta alcanzar la temperatura máxima establecida en el termostato.

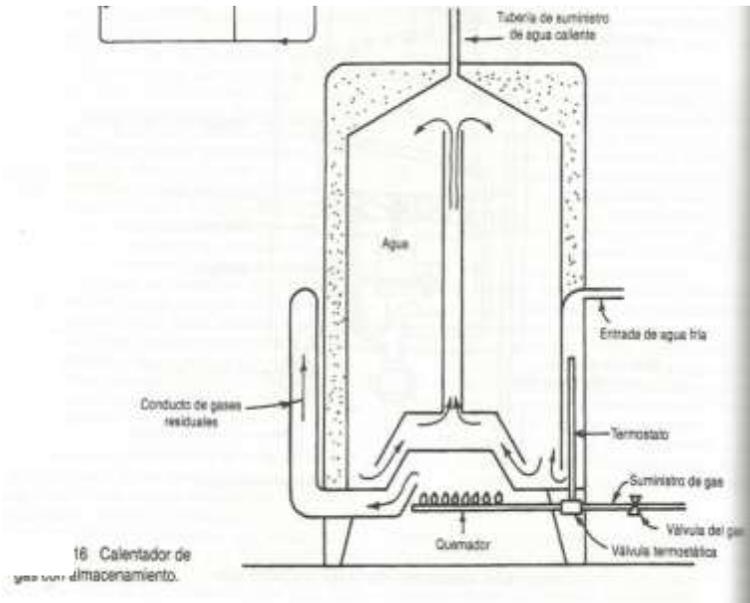


Ilustración 3. Ilustración del funcionamiento de un termotanque [3]

### 1.2.2 Calentador de agua de paso de rápida recuperación

Este tipo de calentador cuenta con un depósito de agua mucho más pequeño que el de los termo tanques, además de que el calentamiento no se realiza en el depósito, si no en un serpentín por el cual pasa el agua fría y desemboca en el almacenamiento, véase la ilustración 4.

La ventaja que presenta este tipo de calentador es que al momento de abrir la llave de agua caliente esta será tomada del tanque, lo cual asegura que, al momento de volver a demandar agua, está ya tendrá una temperatura mayor a la temperatura ambiente, dando un baño más confortable.

La capacidad de estos aparatos se mide en litros por minuto (l/min), lo cual depende de la presión de agua. Este es un dato que debe conocerse de manera correcta, ya que regularmente las placas de especificaciones son realizadas al nivel del mar, pero, por ejemplo, en la ciudad de México, la capacidad del calentador disminuye en dos litros.

Para elegir el tipo de calentador adecuado para el hogar es necesario conocer el número de servicios simultáneos, tal como se muestra en la tabla. 14

TABLA 4. CAPACIDAD DE CALENTADORES DE PASO POR SERVICIOS SIMULTÁNEOS  
[VÉASE BIBLIOGRAFIA13]

NÚMERO DE SERVICIOS	LITROS / MINUTO
1	Menos de 8
1 ½	De 9 a 10
2	De 11 a 15
2 ½	De 16 a 20
3	De 21 a 25



Ilustración 4. Calentador de paso rápida recuperación [4]

### 1.2.3 Calentador de agua de paso instantáneo

Este tipo de calentador se caracteriza por no contar con un depósito, véase ilustración 5, el calentamiento se realiza durante el paso recorrido del agua por el interior del aparato a través del serpentín. Del mismo modo que los calentadores de rápida recuperación, la capacidad de un instantáneo se mide en litros por minuto (l/min), de modo que para seleccionar el adecuado para las necesidades del hogar se debe de conocer el número de servicios simultáneos que se tendrán.

Las ventajas que este tipo de calentadores muestran con respecto a los anteriormente mencionados son las siguientes:

- Se obtiene agua caliente sin límite y con tiempo de espera mínimo.
- Ahorro de gas, debido a que solo se enciende el quemador en caso de que se le solicite agua caliente, además de que en el mercado existen modelos que ya no usan pilotos.
- Son compactos, su tamaño oscila regularmente entre los 50 y los 80 centímetros de altura.

Una clara desventaja de este tipo de calentadores es que se requiere de una presión de agua constante, lo cual hace necesario el instalar una bomba en el caso de que la presión se vea afectada por el suministro local de agua. Por esta razón gran parte de los fabricantes de calentadores de agua han realizado modelos que trabajan con una baja presión de agua, lo cual los hace una opción perfecta para uso en departamentos y casas con abastecimiento por tinaco.



Ilustración 5. Calentador de paso instantáneo [5]

El principio de funcionamiento consiste en un serpentín por el que fluye internamente agua expuesto a los gases producidos por la combustión, véase la ilustración 6.

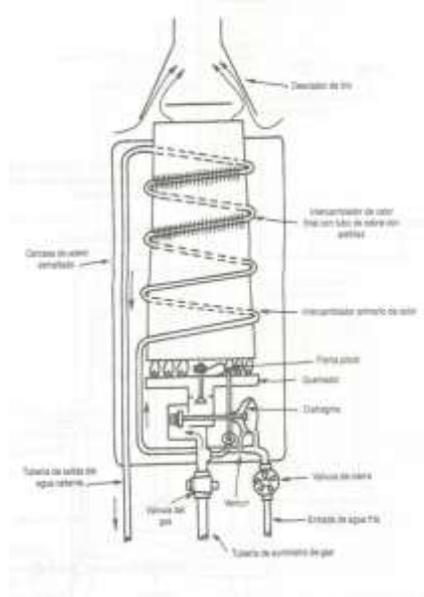


Ilustración 6. Funcionamiento de un calentador de gas de paso instantáneo [6]

#### 1.2.4 Calentador de agua solar.

Son calentadores que aprovechan la energía calorífica del sol para aumentar la temperatura del agua. Existen diversos tipos de calentadores solares, cada uno con su forma de trabajo y construcción definidos por la presión hidrostática a la que será sometido, véase la ilustración 7.

Este tipo de calentadores se dividen en cuatro partes:

- *Colector:* También conocido como captador solar o panel termo solar. Es el componente que se encarga de transferir la energía solar al agua. Consiste en un arreglo de tuberías por el cual fluye el agua. Este puede estar pintado de negro mate o cubierto con pinturas selectivas como el cromo negro para que este absorba la mayor cantidad de energía posible.

- **Contenedor:** Es el recipiente en donde se almacena el agua. Se conecta con la entrada y la salida del colector. Durante el día el agua se recircula una y otra vez entre el colector y el contenedor, debido a que el agua caliente se vuelve menos densa y tiende a ascender y dejar el agua fría debajo. Este debe de construirse con un buen aislante térmico para evitar pérdidas y mantener la temperatura del agua el mayor tiempo posible. Existen algunos modelos de calentadores solares domésticos que suelen incorporar un calentador eléctrico de apoyo, el cual se activa en caso de no alcanzar la temperatura de uso adecuada.
- **Sistema:** Se refiere a las tuberías, llaves, bombas y accesorios con los cuales cuenta el calentador para su uso.
- **Sustancia de trabajo:** Esta depende de la forma de calentamiento que se maneja en el calentador. Si se trata de un calentador directo, se trata del agua que se usara. En este caso, el agua se hace pasar por el colector para ser guardada en el contenedor. En el caso de calentamiento indirecto, el arreglo de tubos del colector contiene una mezcla de agua y glicol, el cual cede el calor mediante un intercambiador de calor colocado en el contenedor.

Este tipo de equipos dependen en gran medida del clima del lugar en que va a ser instalado, demostrando que puede disminuir el consumo de gas o electricidad desde un 50% hasta un 70% debido a que el aumento de la temperatura del agua ha llegado a ser considerable.

Como se menciona en un principio, se debe considerar si la instalación de agua del hogar será presurizada o no, de lo cual depende el tipo de calentador solar a usar.

Un calentador solar no presurizado se usa en casas donde el abasto se da por gravedad, es decir, se cuenta con un tinaco el cual abastece a las tuberías. En ellos el colector está construido a partir de tubos de vacío, los cuales en su interior contienen un tubo de metal, ilustración 8, el cual debe de tener la mínima propiedad de reflexión y gran capacidad de absorción de calor. En este modelo de calentadores, el agua llena los tubos de vidrio, es aquí en donde se realiza el aumento de temperatura del líquido. Debido al cambio de densidad, el agua de mayor temperatura es desplazada hacia arriba y vuelve al tanque de almacenamiento, mientras que el agua de menor temperatura entra a los tubos, realizando el proceso de manera natural mientras exista energía solar y toda el agua se caliente.



Ilustración 7 Funcionamiento de un calentador solar no presurizado. [7]



Ilustración 8. Tubo de vidrio al vacío para calentador no presurizado [8]

En caso de que se tenga que trabajar bajo presión, ya sea de una bomba o equipo hidroneumático, es necesario instalar un calentador solar presurizado, ilustración 9. Esto es debido a que los tubos de vidrio no soportan las altas presiones de trabajo, por ello es que la construcción y forma de trabajo de un tanque presurizado es distinta. En este caso, los tubos de vidrio al vacío son sustituidos por tubos tipo “heat pipe”, ilustración 10. El captador se forma por el arreglo de tubos *heat pipe*, los cuales en su interior cuentan con un tubo capilar lleno de glicol de bajo calor específico, el cual gracias a esta propiedad se calienta y evapora para subir a tubo de cobre, la cual se encuentra en contacto con el agua dentro del tanque de almacenamiento. Debido a esto, la energía calorífica es transferida del glicol al agua, realizando el calentamiento. Gracias al mismo proceso de termosifón presente en el calentador no presurizado, el agua fría desplaza al agua caliente y se detiene el proceso hasta que toda se encuentra a la misma temperatura, con lo cual se evita que el agua circule hacia los tubos y los dañe debido a la presión.



Ilustración 9. Funcionamiento calentador solar presurizado [9]

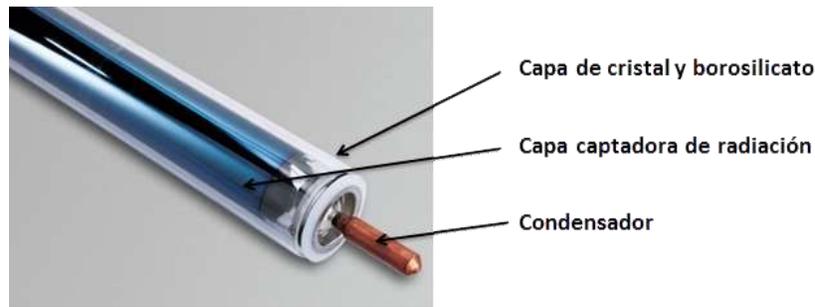


Ilustración 10. Heat pipe [10]

### 1.3 Tipos de encendido del quemador

En el apartado anterior se vio cada uno de los calentadores domésticos presentes en el mercado. A excepción del calentador solar, todos requieren alguna manera de encender el quemador, por lo cual existen distintos modelos en el mercado, cada uno ofreciendo una manera para realizar esta tarea.

- **Encendido por cerillo:** este tipo de encendido es el más sencillo, debido a que se requiere de encender una pequeña llama piloto mediante cerillo o un encendedor. Si este proceso no se realiza de manera correcta, el usuario puede provocar que se acumule una pequeña cantidad de gas dentro del calentador, la cual provocaría una combustión violenta y hasta daños al mismo. Por esta razón este tipo de encendido se ha ido sustituyendo.
- **Encendido por filamento:** este tipo de encendido fue el antecesor al encendido por chispa, por lo cual es raro encontrarlo hoy en día. Consiste en un filamento colocado en forma de bobina colocado junto a la llama piloto, véase la ilustración 11. Una vez que se hace circular la energía eléctrica, este elemento se pone al rojo vivo encendiendo la llama piloto.

La energía eléctrica necesaria para realizar este proceso puede ser tomada de la corriente eléctrica o bien de baterías de alto poder.

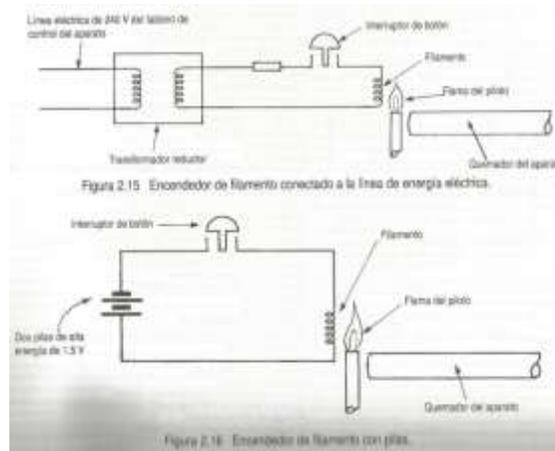


Ilustración 11. Ejemplos de encendido por filamento [11]

- **Encendido piezoeléctrico o tren de chispas:** este tipo de encendido pretende sustituir al cerillo por un tren de chispas, veasé la ilustración 12, el cual el usuario simplemente debe de presionar un botón para provocar la chispa y que esta encienda el piloto y el quemador. Al igual que el encendido por cerilla, se requiere de encender un piloto, con la ventaja de que aquí el usuario no requiere estar cerca de la flama.

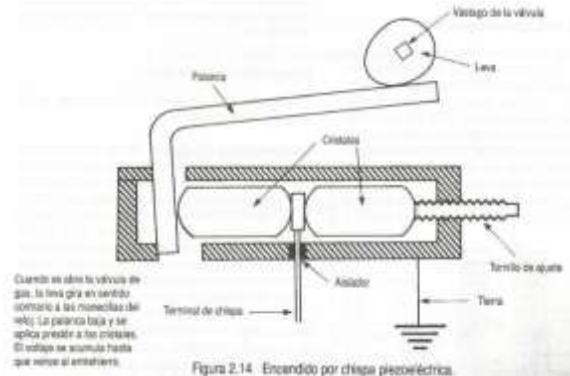


Ilustración 12. Diagrama de un encendido piezo-eléctrico [12]

- **Encendido automático o electrónico:** este tipo de encendido es el mejor en el mercado hasta el momento, debido a que enciende la llama sin necesidad de un piloto, por medio de bujías colocadas en el calentador, las cuales se activan cuando el termostato manda la orden. Debido a esto, funcionan con baterías o mediante una toma eléctrica, quedando su funcionamiento a disposición de esta energía.
- **Encendido automático por hidro-generador:** este tipo de encendido es relativamente nuevo. Del mismo modo que el encendido electrónico, este solo se activa y enciende el quemador en el momento en que se detecta demanda de agua, solo que en este caso no requiere de baterías ni electricidad, ya que el agua pasa por un dinamo, el cual aprovecha su fuerza para obtener la chispa que enciende el calentador. Este tipo de encendido es el que menor mantenimiento requiere, pero, si el agua que se usa tiene gran dureza, puede provocar que la turbina se llene de sales y otros contaminantes, logrando dañarla.

#### 1.4 Tipos de evacuación de los gases de combustión.

En el caso de los calentadores que funcionan mediante combustibles fósiles se generan gases nocivos para la salud, por lo cual es necesario tener en cuenta el lugar en que este se colocara, si el lugar se encuentra correctamente ventilado y si la salida de gases cumple la normativa vigente. Por esta razón existen diversos tipos de evacuación en los calentadores de agua a gas, cada uno hecho para diversas formas de trabajo:

- **Calentador de tiro natural o atmosférico:** este tipo de calentadores obtienen el aire para la combustión del lugar en que se encuentran y los gases son expulsados de manera natural.
- **Calentador de tiro forzado:** este tipo de calentadores cuentan con un pequeño ventilador, el cual se encarga de evacuar de manera correcta todos los gases producto de la combustión. Son usados cuando no se tiene la distancia reglamentaria para que estos se expulsen de manera natural.

- **Calentador de circuito estanco:** diseño de calentadores que son colocados en estancias pequeñas y poco ventiladas, por lo cual es necesario obtener el aire del exterior, y del mismo modo expulsar los gases de combustión. En este tipo de calentadores se cuenta con un sistema de evacuación especial, por lo tanto, se cuenta con dos tubos, uno para admisión de aire y el otro para la expulsión de gas.

### 1.5 Dispositivos contra falla de flama.

Es indispensable que se cierre el paso del gas hacia el calentador en caso de que la flama del piloto se encuentre apagada, o bien en los dispositivos de encendido automático, no se presente flama en el quemador. Con esto se evita la posibilidad de una explosión, por ello un dispositivo contra falla de flama es indispensable. Los dispositivos más comunes se mencionan a continuación.

- **Dispositivo de vapor de mercurio:** Consiste en un elemento sensor, el cual contiene mercurio en su interior, y que se conecta a un diafragma por medio de un tubo capilar, ilustración 13. Cuando la flama piloto entra en contacto con el sensor, el mercurio se vaporiza, lo cual ocasiona que el vapor genere una presión sobre el diafragma, ocasionando que este se dilate y mueva una palanca que abre la válvula que permite el paso del gas al quemador.

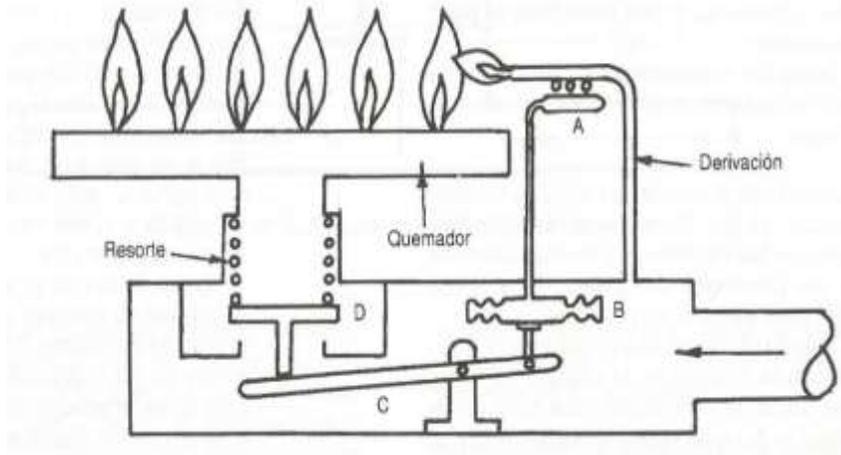


Ilustración 13. Diagrama de funcionamiento dispositivo a falla de flama de vapor de mercurio [13]

- **Dispositivo de cinta bimetálica:** Consiste en dos cintas metálicas hechas de diferentes aleaciones, unidas rígidamente y dobladas en forma de U, ilustración 14. Debido a los distintos coeficientes de dilatación térmica de cada aleación, al exponerse a la flama del piloto, el latón de la cinta exterior se dilata más que el del interior, lo cual ocasiona que esta se deforme. Dicho movimiento abre la válvula que permite el paso del gas al quemador, el cual se enciende con la flama piloto. En caso de que la flama piloto se apague, la cinta se enfría y deforma de manera que cierra el paso del gas.

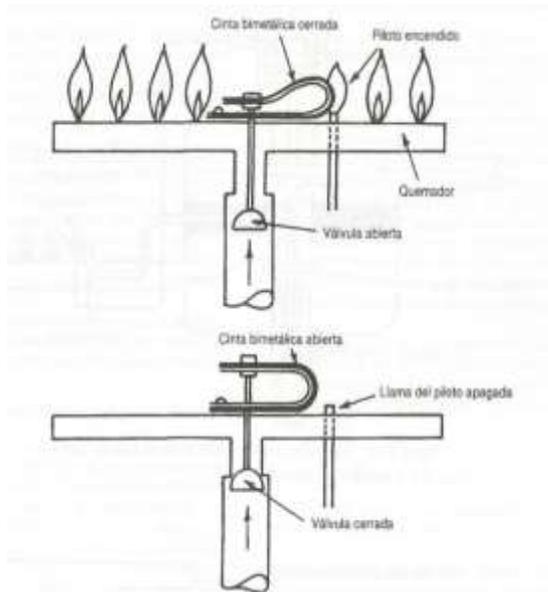


Ilustración 14. Dispositivo de cinta bimetálica para falla de flama [14]

- Dispositivo termo-eléctrico:** En este, un termopar funciona como elemento sensor. El termopar es un dispositivo formado por metales unidos en un extremo, el cual, al ser expuesto a la flama piloto, produce una pequeña corriente eléctrica, la cual se usa para accionar un electroimán y este a su vez abre la válvula de paso de gas hacia el quemador, ilustración 15.

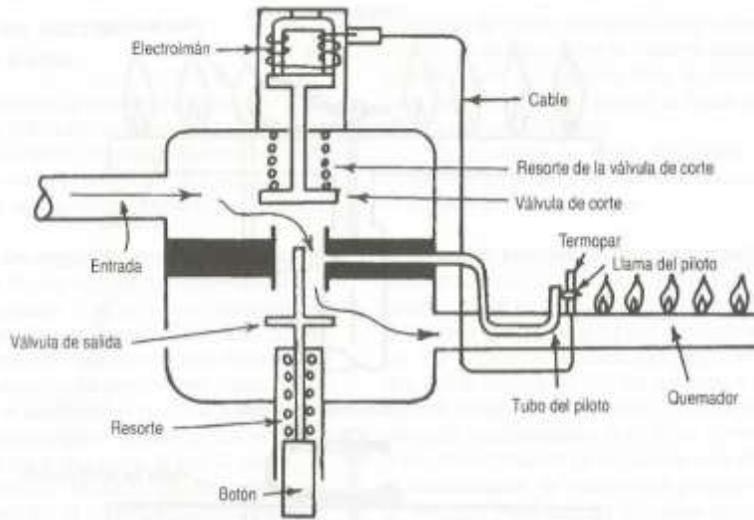


Ilustración 15. Dispositivo termo eléctrico a falla de flama [15]

## 1.6 Escaldaduras y su relación con el agua caliente en el hogar

Como ya se ha visto, existen diversas opciones para poder tener agua caliente dentro del hogar. Pero, debemos considerar que el agua caliente es uno de los muchos factores de riesgo dentro de los hogares, pues tan solo en México, los accidentes dentro del hogar ocupan la tercera causa de muerte, considerando al hogar como el sitio más peligroso.

Según datos de la *American Burn Association* [14], tan solo en Estados Unidos se presentan hasta 4,000 muertes al año por incendios y quemaduras, mientras que 25,000 personas son hospitalizadas en centro de tratamiento de quemaduras, y se tratan 600,000 casos de quemaduras en las salas de emergencia de los hospitales, siendo una tercera parte de estas escaldaduras.

Una escaldadura, ilustración 16, es una lesión en la piel que se presenta cuando ocurre el contacto con agua o vapor a altas temperaturas, lo cual ocasiona una lesión en la piel. En el hogar, las fuentes que pueden provocar escaldaduras son el agua de los grifos, bebidas calientes, comida caliente y el vapor. Aquellos que se ven afectados en mayor medida por este tipo de lesiones, suelen ser los niños, adultos mayores y personas con discapacidad.



Ilustración 16. Ejemplo de una escaldadura [16]

Las escaldaduras son un tema importante a tratar, ya que, según datos recopilados por el *National Center for health Statistics*, en Estados Unidos, el 60% de los casos de daño por escaldaduras en niños se presenta en la población con edad entre los 0 y los 4 años, mientras que de los casos de quemaduras que se presentan el 75% de estos eran escaldaduras [19], lo cual nos arroja un factor de riesgo importante.

Al controlar la temperatura de salida de los calentadores de agua, podemos reducir el riesgo de sufrir una escaldadura dentro del hogar al usar el agua caliente en baños y cocinas. De aquí la importancia del proyecto, ya que no solo resuelve un problema de energía, si no que da más herramientas para la prevención de accidentes dentro del hogar.

Gracias a estudios realizados por la *American Burn Association*, se tienen datos sobre las temperaturas recomendadas para evitar este tipo de lesiones. Dicha información se presenta en la tabla 5.

Cabe señalar, que esta tabla de temperaturas se hizo con base a registros con personas sanas, tiempo es menor en desarrollarse una quemadura en niños, personas mayores o personas que sufren de piel sensible.

TABLA 5. TEMPERATURA DEL AGUA Y TIEMPO EN QUE TARDA EN FORMARSE UNA QUEMADURA DE TERCER GRADO  
[VÉASE BIBLIOGRAFÍA 19]

Temperatura del agua en °F	Temperatura del agua en °C	Tiempo requerido para que ocurra una quemadura
155°	68°	1 segundo
148°	64°	2 segundos
140°	60°	5 segundos
133°	56°	15 segundos
127°	52°	1 minuto
124°	51°	3 minutos
120°	48°	5 minutos
100°	37°	Temperatura segura para bañarse

Para poder disminuir el riesgo de sufrir una escaldadura, la *U.S. Consumer Product Safety Commission*, ha establecido la recomendación de que la temperatura máxima que debe alcanzar un calentador de agua debe ser de 48°C (120°F), e incluso algunas regulaciones estatales o locales de los Estados Unidos establecen que en hogares de ancianos y guarderías la temperatura máxima establecida es de 43°C (110°F).

### 1.7 Hipotermias y problemas cardiacos: razones para usar agua caliente en la ducha

El uso de agua caliente en la ducha no es solo un lujo o capricho, sino una necesidad. Esto es debido a que el agua a bajas temperaturas puede causar graves problemas de salud en las personas.

Médicos y especialistas del deporte recomiendan las duchas de agua fría, debido a que mejoran la actividad cardiovascular, ayudan a mejorar el sistema inmunológico y relajan los músculos después de las sesiones de ejercicio. Sin embargo, estas deben darse por solo unos segundos de exposición, además de que se requiere de un tiempo de adaptación que se lleva a cabo de manera paulatina y deben evitarse si es que la persona sufre de problemas cardiacos.

La recomendación que se puede dar, es que el rango de temperaturas mínimas al que se puede exponer el cuerpo se encuentra entre los 21°C y los 26°C.

### 1.8 Mercado de los calentadores de agua hoy en día.

En la búsqueda de ofrecer opciones de calentadores para el hogar que den al usuario un mayor confort y seguridad, las empresas han realizado grandes avances tecnológicos y ofrecen un gran catálogo de productos que satisfacen esta necesidad. A continuación, se mencionan algunos de los calentadores de paso instantáneos más avanzados en el mercado, algunos de los cuales no se distribuyen en México.

- **Calorex Instantaneo COXDPI-XX:** Este modelo de calentador instantáneo de la marca Calorex cuenta con un modelo de 6 y otro de 13 litros de capacidad. Tiene un encendido automático activado por la demanda de agua y cuenta con un *display* que muestra la temperatura de salida del agua caliente. Cuenta con modelos para trabajo con gas LP y gas natural. Funciona con una presión hidráulica mínima de 0.1 Kg/cm<sup>2</sup> (1 m<sub>H2O</sub>) soportando hasta 4.5 Kg/cm<sup>2</sup> (45 m<sub>H2O</sub>)
- **Bosch Confort de baja presión:** Este modelo de calentador instantáneo de la marca Bosch cuenta con modelos de 6, 10 y 13 litros de capacidad. Tiene un encendido automático activado

por la demanda de agua y cuenta con limitador de temperatura. Cuenta con modelos para trabajo con gas LP y gas natural. Funciona con una presión hidráulica mínima de 0.1 Kg/cm<sup>2</sup> (1 m<sub>H2O</sub>).

- **Calentadores Instantáneos Rheem:** La empresa Rheem cuenta con calentadores instantáneos de 8, 13 y 16 litros de capacidad. Todos cuentan con un encendido automático por flujo de agua, y selección de temperatura por perilla en los modelos de 8 y 13 litros, mientras que el modelo de 16 litros cuenta con un ajuste digital. Ambos cuentan con *display* que muestra la temperatura del agua caliente. Pueden trabajar con gas LP o gas natural y necesitan una presión mínima de 1 Kg/cm<sup>2</sup> (10 m<sub>H2O</sub>) para funcionar.
- **Junkers Hydrobattery-plus (No disponible en México):** Este es un calentador de la marca española Junkers con capacidad para 11 litros de agua. Cuenta con un encendido automático activado por flujo de agua, y selección de temperatura por medio de un ajuste digital. Cuentan con *display* que muestra la temperatura del agua caliente. Pueden trabajar con gas LP o gas natural y necesitan una presión mínima de 0.15 Kg/cm<sup>2</sup> (1.5 m<sub>H2O</sub>) para funcionar.
- **Junkers Hydrocompact (No disponible en México):** Este es un calentador instantáneo del tipo estanco de la marca española Junkers con capacidad para 12, 15 y 18 litros de agua. Cuenta con un encendido automático activado por flujo de agua, y selección de temperatura por medio de un ajuste digital. Cuenta con *display* que muestra la temperatura del agua caliente. Pueden trabajar con gas LP o gas natural y necesitan una presión mínima de 0.1 Kg/cm<sup>2</sup> (1. m<sub>H2O</sub>) para funcionar.
- **Junkers Hydrocompact 6000i (No disponible en México):** Este es un calentador instantáneo del tipo estanco de la marca española Junkers con capacidad para 8 y 11 litros de agua. Cuenta con un encendido automático activado por flujo de agua, y selección de temperatura por medio de un ajuste digital con interfaz táctil. Además, se conecta a tabletas y celulares por medio de una app que permite controlar el calentador desde estos dispositivos. Cuenta con un *display* digital que muestra la temperatura del agua caliente. Pueden trabajar con gas LP o gas natural y necesitan una presión mínima de 0.1 Kg/cm<sup>2</sup> (1. m<sub>H2O</sub>) para funcionar.

Como se ha podido observar a lo largo del desarrollo de este capítulo, el calentador de agua ha tenido diversas innovaciones y cambios a lo largo del tiempo, con los cuales se busca una mejor experiencia de confort y seguridad al usuario, aunque parte de estas tecnologías aún no están al alcance de la población mexicana. Por ello el proyecto tiene un enorme potencial para poder entrar en el mercado mexicano y puede competir directamente con los modelos ya comercializados al ofrecer una alternativa que le de confort y seguridad.

## 1.9 Especificaciones generales del proyecto

Con lo antes mencionado, se acotan las siguientes especificaciones generales para el prototipo a construir, los cuales ayudaran a determinar los componentes y piezas a usar. Para poder consultar estos datos véanse las tablas 6 y 7.

TABLA 6: ESPECIFICACIONES DE TRABAJO PARA EL CALENTADOR DE AGUA

Especificación	Intervalo de valores
Tiempo de vida útil	Mínimo 3 años
Temperatura ambiente de funcionamiento	De 2°C a 28°C
Temperaturas de salida manejadas	De 30°C a 40 °C

TABLA 7: ESPECIFICACIONES DE TRABAJO PARA LA INTERFAZ DE REGADERA

Especificación	Intervalo de valores
Tiempo de vida útil	Mínimo 3 años
Temperatura ambiente de funcionamiento	De 2°C a 28°C
Tamaño Largo	Máximo 15cm.
Tamaño Ancho	Máximo 15 cm.
Tamaño grosor	Máximo 5 cm.

## 1.10 Diagrama general de funcionamiento

Para ofrecer al usuario una experiencia de confort se busca que el uso del sistema sea simple y efectivo, lo cual implica que la forma de interacción con el sistema sea tan simple como sólo seleccionar la temperatura y abrir la llave del agua, siendo los procesos de encendido y control totalmente ajenos. Resumiendo, el siguiente diagrama de proceso muestra que tan sencilla será la operación del sistema, el cual será detallado en el siguiente capítulo.

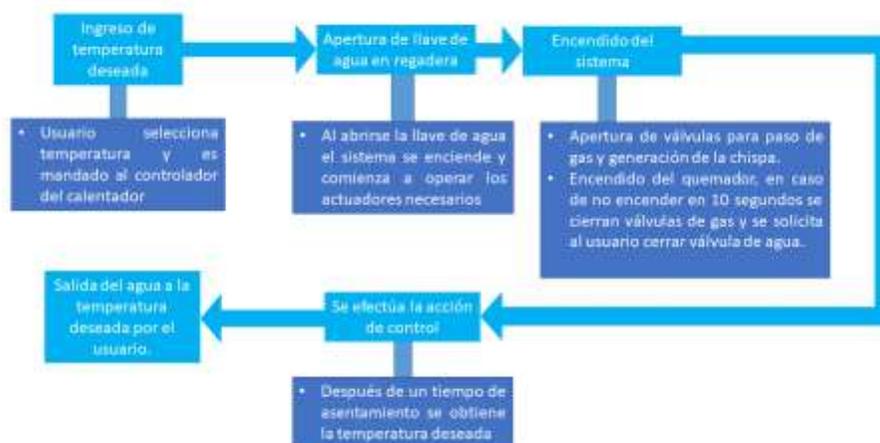


Ilustración 17. Diagrama de proceso del controlador [17]

## **Capítulo 2: Objetivo, alcances y especificaciones**

Ya conocida la evolución y ofertas del mercado actual de los calentadores de agua domésticos, se procede a presentar parte de la problemática observada.

### **2.1 Problema observado**

Se ha observado que, al usar agua caliente en los hogares, esta se eleva a temperaturas mayores a la deseada y luego regulada mediante el flujo de agua fría, además, de que existen modelos de calentadores que alcanzan temperaturas tan altas que pueden causar lesiones en la piel de las personas.

### **2.2 Hipótesis**

Regulando la temperatura del agua a la salida de los calentadores, se logrará presentar un ahorro económico y un aprovechamiento energético, además de que se ofrecer seguridad y confort al usuario.

### **2.3 Justificación**

Colocando un sistema que permita controlar la temperatura de salida del agua en un calentador, se gastará solo el gas necesario para dicha operación, además que, al colocar un límite de temperatura de salida de agua, se disminuyen los riesgos de quemaduras por agua caliente en la regadera.

### **2.4 Objetivo general**

Modificar un calentador de agua del tipo instantáneo para uso doméstico. Para ello se debe diseñar e instalar un sistema de control de temperatura de agua, el cual dará al usuario la posibilidad de seleccionar desde el interior de la regadera la temperatura deseada..

### **2.5 Alcances u objetivos específicos**

- Diseñar e implementar una terminal remota de interfaz para que el usuario seleccione la temperatura de salida del agua desde el interior del baño.
- Considerar los modelos disponibles en el mercado de calentadores de agua que ofrezcan control de temperatura, con el fin de ofrecer una innovación
- Construcción de un prototipo funcional.

### **2.6 Requerimientos**

El prototipo debe tener una manera de regular la temperatura de salida, por lo cual en los sensores usados se debe asegurar su durabilidad y confiabilidad, además de apegarse lo mejor posible con las especificaciones establecidas en la norma mexicana NOM-011-SESH-2012. Se deja la estética como un factor sin importancia para este trabajo.

### **2.6.1 Funcionamiento**

El usuario debe seleccionar la temperatura del agua desde la terminal que puede estar colocada dentro de la regadera. De esta manera el calentador solo usara combustible durante el tiempo que dure la ducha y debe mantenerse apagado el resto del día.

Se debe de considerar que para este prototipo se considera solo el servicio en regadera.

### **2.6.2 Instalación**

Se instala una serie de dispositivos que permite llevar a cabo una acción de control

### **2.6.3 Ambiente**

Para el diseño del sistema de control se consideran valores estándares de la Ciudad de México:

- Temperatura: Ambiente
- Presión: 97800 KPa.
- Humedad: 12% - 90%.

Mientras que la interfaz remota debe mostrar la temperatura del agua dentro del baño y modificar el valor de temperatura deseada cada que el usuario lo requiera.

### **2.6.4 Tiempo de vida**

Se busca que el tiempo de vida mínimo del equipo sea el que establece la compañía como garantía del calentador de agua. Realizando una investigación del periodo de garantía de calentadores de tipo instantáneo se establece un tiempo mínimo de 3 años de vida útil.

### **2.6.5 Mantenimiento**

Es recomendable que un técnico realice mantenimiento preventivo a los sistemas del calentador cada seis meses. El usuario solo deberá preocuparse por cuidar la fuente de energía que alimentará al sistema.

### **2.6.6 Competencia**

Este prototipo compite con los calentadores de paso que cuenta con sistemas de control para la temperatura de salida del agua, por lo cual se busca que ofrezca un buen funcionamiento además de ofrecer mayor confort y un precio accesible.

### **2.6.7 Facilidad de manufactura**

Se busca que la manufactura del sistema pueda realizarse en serie y con refacciones disponibles, con el fin de tener un producto con disponibilidad en el mercado y de fácil mantenimiento.

### **2.6.8 Tamaño**

El sistema debe poder ser colocado cerca del calentador de agua y no ocupar un gran espacio. Del mismo modo la interfaz remota debe ser lo más pequeña posible.

### **2.6.9 Peso**

Se desea que la terminal sea liviana para que la instalación resulte sencilla y de bajo costo. Mediante tornillos o ventosas.

### **2.6.10 Estética**

Por el momento, la estética debe ser agradable para una presentación de funcionamiento, más no será la del producto final, ya que se busca que esta mejore en caso de salir al mercado.

### **2.6.11 Cliente**

El objetivo es que este sistema pueda ser instalado en los hogares y de fácil uso, tanto para niños como para adultos, ofreciendo la temperatura de salida, en la regadera, deseada por el usuario.

### **2.6.12 Calidad y confiabilidad**

El producto debe cumplir con el objetivo de regulación de temperatura con un rango de error de más, menos 1 °C, además de contar con acciones preventivas para garantizar la seguridad del usuario.

### **2.6.13 Consumo de energía**

El consumo de energía requerida debe ser el menor posible, con el fin de no aumentar el gasto de energía eléctrica o bien, si se usan baterías, que estas tengan una duración de 6 meses.

## **2.7 Aviso sobre la información contenida dentro de este trabajo**

El presente trabajo escrito no plasma el cien por ciento de la información, debido a que se busca proteger la posibilidad de lograr la patente. Por esta razón la ausencia de planos y de códigos de programación utilizados.

## Capítulo 3: Diseño conceptual

Como se menciona en capítulos anteriores, una propuesta para resolver la problemática observada es el colocar un control para que el calentador regule la temperatura de uso a un valor determinado por el usuario. Para ello, requerimos de instrumentar el sistema y por esta razón se presentan los distintos tipos de sensores y actuadores que se pueden implementar para lograr nuestro objetivo.

### 3.1 Sensores de temperatura

Para lograr una acción de control del calentador, es necesario conocer y monitorear la temperatura del agua para tener un control preciso. Para ello, es necesario que se realicen muestras continuas de las temperaturas y que estas sean enviadas al sistema de control, por lo tanto, se requiere de mediciones rápidas y con el menos ruido eléctrico presente posible.

Para medir temperatura existen una gran diversidad de transductores, algunos de ellos realizan una conversión directa de dicha variable a una señal eléctrica, mientras que otros requieren de interconectarse a otro transductor para poder obtener una señal que pueda ser leída de manera electrónica. En este caso solo listaremos los transductores directos, los cuales son:

- Termopares.
- Detector de temperatura resistivo.
- Termistores.
- Sensor semiconductor.
- Pirómetro de radiación.

#### 3.1.1 Termopares.

Un termopar consta de dos alambres de metales diferentes unidos. Al calentarse o enfriarse dicho punto de unión, aparece una diferencia de voltaje entre los dos extremos no calentados o enfriados. Este fenómeno es conocido como efecto Seebeck. La magnitud de la diferencia de voltaje es muy pequeña, regularmente del orden de los milivolts. Por ejemplo, un termopar tipo K desarrolla aproximadamente un cambio de 0.04 mV/°C [10]. Debido a esto, se requiere que los instrumentos de medición sean bastante sensibles para poder detectar las variaciones de temperatura en un termopar. Además, debido a que los voltajes de salida son muy pequeños, los circuitos de acondicionamiento de la señal del termopar deben de eliminar tanto el ruido originado por campos eléctricos y magnéticos.

Las combinaciones de metales más comunes dentro de la fabricación de termopares son: hierro y constantan, cromel y alumel (aleaciones de níquel y cromo, y aluminio y níquel respectivamente) y platino- rodio.

Para poder conocer algunas características de funcionamiento de los tipos de termopares comerciales según su designación conforme a la ANSI (*American National Standards Institute*), véase la tabla 7:

TABLA 7. COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS TERMOPARES COMERCIALES [VÉASE BIBLIOGRAFÍA 10]

Algunos termopares comunes			
Materiales de unión	Rango típico de temperatura de operación (°C)	Variación de voltajes (mV.)	Designación ANSI
Platino-6%rodio/platino-30%rodio	38 a 1800	13.6	B
Tungsteno- 5%renio/tungsteno-26% renio	0 a 2300	37.0	C
Cromel /Constatan	0 a 982	75.0	E
Hierro / Constatan	-184 a 760	50.0	J
Cromel / Alumel	-184 a 1260	56.0	K
Platino/ Platino-13% rodio	0 a 1593	18.7	R
Platino / Platino-10% rodio	0 a 1538	16.0	S
Cobre / Constatan	-184 a 400	26.0	T

La ventaja de los termopares es que son pequeños, con un tiempo de respuesta rápido y por lo tanto buena opción en aplicaciones que requieren de velocidad de respuesta. Además, cuentan con un amplio rango de temperaturas de trabajo, económicos, y resistentes y cuentan con buena estabilidad a largo plazo.

Actualmente, es posible encontrar cuatro tipos unión en los termopares comerciales: de alambre desnudo, alambre desnudo soldado, unión aislada, y unión aterrizada. El tipo de unión que se selecciona depende del tiempo de respuesta requerido, la temperatura y los esfuerzos asociados con los ambientes en que este se usa [18] (atmosferas corrosivas, abrasión mecánica y humedad). Debido a esto, la mayoría de los termopares debe colocarse dentro de un termo-pozo para protegerlo del ambiente.

Una de las desventajas sobre el uso de termopares es que, debido a la generación de voltajes de salida muy pequeños es difícil que el acondicionamiento de señal permita resoluciones exactas de menos de 1°C. Además, la relación entre el voltaje de salida y la temperatura en muchos casos no es lineal, aunque puede ser aproximada mediante el empleo de un polinomio en serie de potencias de orden n, con coeficientes ya determinados:

$$T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (1)$$

En donde:

T = Temperatura medida en °C.

x = voltaje del termopar.

a = coeficientes del polinomio únicos para cada termopar.

n = orden máximo del polinomio.

Se debe mencionar que dicha serie de potencias solo es aplicable si la temperatura de referencia de un termopar es de 0°C. En caso de que esto no sea posible de realizar, debido a que es una solución costosa, se debe de tener algún otro transductor de temperatura que ayude a conocer la temperatura de referencia, y realizar el ajuste de temperatura dado mediante el uso de tablas.

El comportamiento de los termopares es distinto para cada una de sus composiciones, para poder observar el voltaje arrojado con respecto a la temperatura se muestra en la ilustración 18.

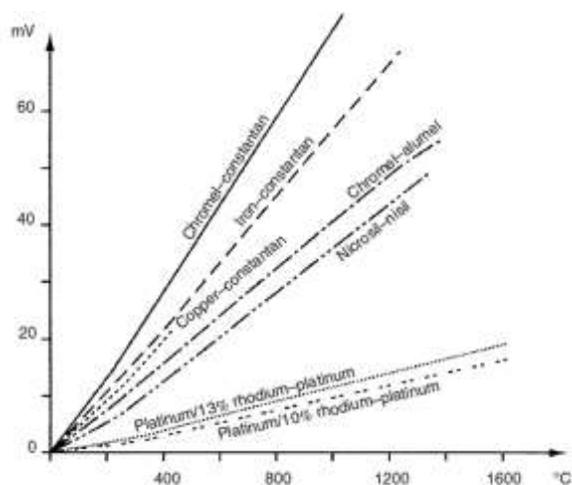


Fig.3. EMF – temperature characteristics for some standard thermocouple materials

Ilustración 18. Voltaje de termopar contra temperatura medida con unión de referencia a 0°C [18].

Proporcionar esta referencia de temperatura fija para un termopar se puede lograr mediante medios físicos, tal como la implementación de celdas al punto de congelación o uniones con referencia de temperatura poco variables. Otra manera de poder evitar los efectos de la temperatura en las uniones es la implementación de un circuito electrónico el cual mide la temperatura ambiente en la unión de referencia y suma el voltaje resultante a la salida del termopar igual al voltaje que se espera que desarrolle la referencia.

Hoy en día, existen circuitos electrónicos que realizan una compensación de unión fría. Es decir, la salida neta del circuito del dispositivo es un voltaje cuyo valor es equivalente al del termopar con su referencia puesta a 0°C. Un ejemplo de ello es el integrado LT1025 de *Linear Technology*, ilustración 19, el cual ya recomienda un circuito de acondicionamiento de señal el cual es capaz de dar la temperatura de termopar con una resolución de 0.5 °C.

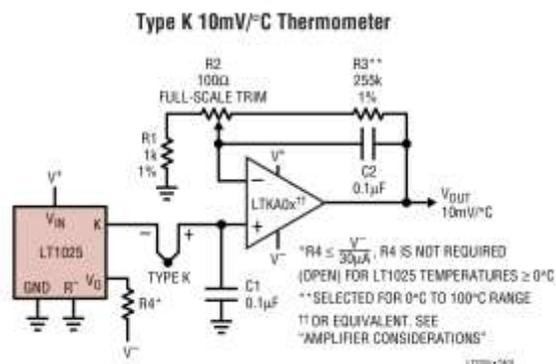


Ilustración 19. Ejemplo de acondicionamiento de termopar con el integrado Lt1025 [19]

Otra opción disponible en el mercado es el módulo MAX 6675, ilustración 20, el cual solo funciona con termopares tipo K, y tiene integrado el acondicionamiento de señal y un convertidor Analógico/ Digital de 12 bits de resolución, logrando detectar temperaturas del termopar de 0 a 1400 °C.

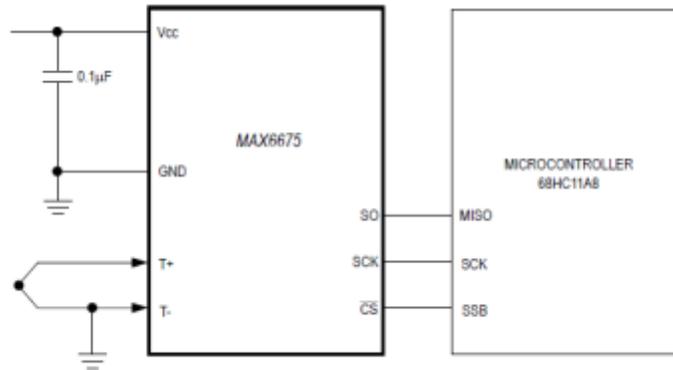


Ilustración 20. Ejemplo de implementación del circuito MAX6675 [20]

### 3.1.2 Detector de temperatura resistivo (RTD)

El cambio de resistencia de un metal debido a su cambio de temperatura, hace posible emplear dicho elemento como un transductor para la medición de temperatura, siendo el fabricado con platino el RTD más utilizado, ilustración 21.

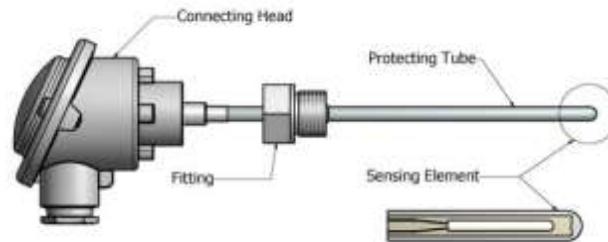


Ilustración 21: Sensor RTD[21]

Para poder detectar los cambios de resistencia que se presentan en los termómetros de resistencia, se emplean los puentes *Wheatstone*. Lo usual es calibrar los puentes para indicar la temperatura que provoco el cambio de resistencia en lugar del propio cambio de resistencia.

Se deben tener algunas precauciones para realizar la instalación de un RTD. Una de ellas es que la magnitud de la fuente de poder que alimenta al RTD debe de ser de magnitud adecuada para alimentar al RTD, pero la corriente suministrada no debe de originar calentamiento del elemento. Para ello, se procura utilizar fuentes que no suministren corrientes mayores a 5mA. Además, los RTD causan desviaciones térmicas, las cuales cambian la temperatura real medida, y si sí se conecta algún otro metal, por ejemplo, cable de cobre al platino del RTD, origina corrimientos los cuales hacen que se requiera una compensación para saber el valor de temperatura real medida.

A pesar de que un RTD muestra una linealidad mayor que la de un termopar, aun se requiere de un ajuste de curva, por lo cual la mayoría de los fabricantes proporcionan los coeficientes para un polinomio de orden 20.

La tabla 9 compara los rangos de temperatura y los coeficientes de temperatura de la resistividad de los materiales empleados para los RTD.

TABLA 8. PROPIEDADES DE LOS SENSORES RTD [VÉASE BIBLIOGRAFÍA 10]

PROPIEDADES TÍPICAS DE LOS RTD		
Material	Rango de temperatura (°C)	TC (%/°C) @ 25°C
Platino	-200 a 850	0.39
Níquel	-80 a 320	0.67
Cobre	-200 a 260	0.38
Níquel-Hierro	-200 a 260	0.46

### 3.1.3 Termistor

Al igual que los RTD, los termistores son dispositivos que miden la temperatura mediante el cambio de su resistencia, ilustración 22, con la diferencia de que en este caso dicha propiedad disminuye en un rango de temperaturas entre los -100°C y los 300°C. En algunos termistores, la disminución de la resistencia por grado de temperatura es de seis por ciento por cada grado centígrado de cambio.

Este efecto de disminución se logra gracias a las propiedades de enlace químico de los electrones en los materiales semiconductores, en los cuales los electrones de valencia se encuentran asegurados en enlaces covalentes con sus vecinos [10]. Al aumentar la temperatura del termistor, las vibraciones térmicas causan el rompimiento de estos enlaces, lo que ocasiona que dichos electrones queden libres y den un efecto de disminución de resistencia eléctrica.

Gracias a que el cambio de resistencia por grado de temperatura de los termistores se considera grande, pueden dar buena exactitud y resolución al medir temperaturas entre  $-100^{\circ}\text{C}$  y  $+300^{\circ}\text{C}$ . Si se emplea un amperímetro para medir la corriente a través del sensor se puede detectar cambios pequeños entre  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . En cambio, si el termistor se conecta en un puente *Wheatstone*, el sistema de medición puede detectar cambios tan pequeños como  $\pm 0.005^{\circ}\text{C}$ .

Una ventaja de los termistores sobre los otros sensores es que pueden ser fabricados en forma de cuentas muy pequeñas, y gracias a su pequeño tamaño pueden usarse en lugares que otros sensores no pueden colocarse, gracias a la gran variedad de formas y tamaños disponibles en el mercado tal como se muestra en la ilustración 22.



Ilustración 22. Diferentes tipos de termistor NTC [22]

Del mismo modo que los sensores RTD y los termopares, el cambio de resistencia de un termistor con respecto al cambio de temperatura no se da de manera lineal, tal como se muestra en la gráfica de la ilustración 23.

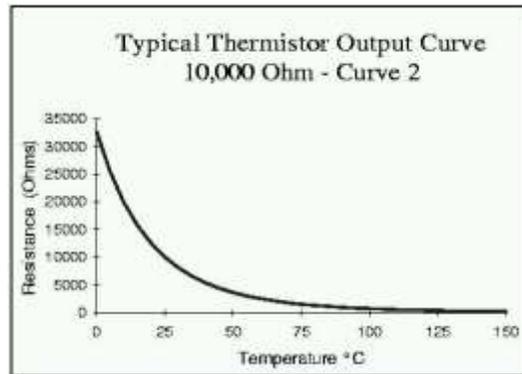


Ilustración 23. Ejemplo de curva de comportamiento de un termistor NTC [23]

Sin embargo, la curva individual de un termistor puede aproximarse muy estrechamente gracias a la ecuación Steinhart-Hart y a los datos suministrados por el fabricante u obtenidos mediante medición directa. Este método consiste en calcular las constantes A, B y C de la ecuación mediante la selección de 3 puntos de los datos dados por el fabricante y resolviendo el sistema de tres ecuaciones simultaneas, logrando un ajuste de curva de  $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$  con respecto de la curva original. A continuación, se presenta la ecuación Steinhart-Hart:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3 \quad (2)$$

En donde:

T = grados Kelvin.

R = resistencia del termistor.

A, B, C = constantes de ajuste de curva.

Otra aproximación menos exacta se logra mediante la siguiente expresión:

$$R = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (3)$$

En donde:

R = resistencia a Temperatura T (K).

R<sub>0</sub> = resistencia a temperatura T<sub>0</sub> (K).

β = constante de ajuste de curva (2000- 4000).

El uso más común que se da a los termistores es como controlador de baja temperatura, linealizador para circuitos de resistencia, detectores de humedad y detectores de flujo de aire. La resistencia de un termistor varía desde los 50 Ω hasta los 2MΩ para una temperatura de 25°C. Además, estos pueden conseguirse con coeficientes de temperatura negativos (NTC) o coeficientes de temperatura positivos (PTC), siendo los más comerciales de coeficiente negativo.

A pesar de esto, existen en el mercado arreglos de termistores especiales y linealizados, los cuales cuentan con una salida de voltaje casi lineal en rangos moderados, regularmente de -30°C a 100°C de temperatura.

### 3.1.4 Transductores de temperatura de Semiconductor

Existen muchos tipos de transductores de sensores de temperatura que aprovechan las propiedades físicas de los materiales semiconductores. Los más comunes son las resistencias semiconductoras volumétricas, diodos semiconductores y los circuitos integrados.

1. Los transductores de temperatura de semiconductores son los más comunes. Son baratos, razonablemente lineales de -65 °C a 200°C (±0.5 por ciento). Físicamente tiene el aspecto de resistencias de ¼ de watt, con valores resistivos que van de los 10 Ω hasta los 10 KΩ. Al igual que los RTD, una resistencia de silicio puede emplearse en circuitos en puente.



## 3.2 Válvulas

El calentador ya cuenta con un sensor de flujo de agua, el cual puede ser reutilizado en la tarjeta de control. Para regular el flujo de agua existen diversos tipos de válvulas.

Las válvulas son elementos mecánicos los cuales sirven para controlar, retener o regular cualquier fluido que corra a través de una tubería.

Existen dos grandes clasificaciones para las válvulas las cuales pueden ser:

- Válvulas de todo o nada: estas válvulas solo permiten o impiden el paso del fluido a través de la tubería, pero no permiten el control del caudal.
- Válvulas de regulación: estas válvulas permiten aumentar o disminuir el caudal en la tubería.

### 3.2.1 Válvulas de paso

Son válvulas que impiden o permiten el caudal de un fluido. Principalmente este tipo de válvulas oponen la menor resistencia a un fluido dejando la mayor sección transversal de la tubería libre. Estas válvulas se instalan principalmente antes de los aparatos de consumo para poder desconectar estos sin que exista el riesgo de tener pérdidas de fluido significativas.

#### 3.2.1.1 Válvula de esfera

Esta válvula consiste en una sección esférica de tubería en la cual se acopla una esfera con un barreno que la atraviesa. Para accionar este tipo de válvula es necesario solo dar  $\frac{1}{4}$  de vuelta a un maneral que se encuentra acoplado al eje de la esfera, ilustración 26.



*Ilustración 26. Corte de sección de una válvula de esfera [26]*

#### 3.2.1.2 Válvula de mariposa

Este tipo de válvula consiste en una placa circular adaptada a una sección circular de tubería la cual sella la sección transversal de tubería cuando esta válvula se encuentra cerrada y permite el paso casi libre al estar está abierta, ilustración 27.



*Ilustración 27. Válvula de mariposa [27]*

### **3.2.1.2 Electroválvulas**

Las electroválvulas son dispositivos electromecánicos compuestos por una válvula de todo o nada y una bobina solenoide. Esta válvula se acciona al hacer pasar una corriente eléctrica en la bobina solenoide. Estas válvulas pueden tener 2 posiciones de reposo, normalmente abierta o normalmente cerrada, ilustración 28.



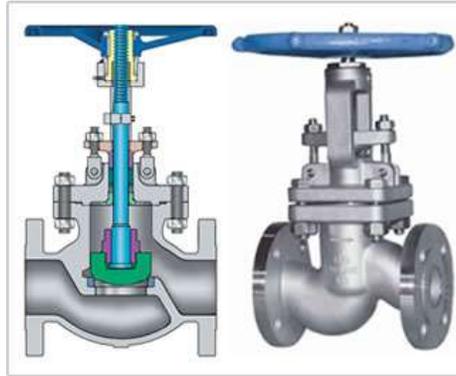
*Ilustración 28. Electroválvula [28]*

### **3.2.2 Válvulas reguladoras**

Estas válvulas regulan el caudal variando la sección transversal de la tubería por la cual se transporta un fluido.

#### **3.2.2.1 Válvula de globo**

Estas válvulas suponen un cambio de dirección para el fluido, en el cual existe una sección vertical en la cual baja un embolo. Dependiendo de la altura a la que este se encuentre tendrá un mayor o menor caudal a través de ella, ilustración 29.



*Ilustración 29. Corte transversal de una válvula de globo y válvula de globo [29]*

### **3.2.2.2 Válvula de compuerta**

Esta válvula consiste en un disco el cual tiene una carrera perpendicular al sentido de flujo de la tubería. La altura es controlada por un esparrago y una tuerca fija. Este tipo de válvulas no tienen un buen control de caudal, ilustración 30.



*Ilustración 30. Válvula de compuerta [30]*

### **3.2.2.3 Válvula de aguja**

Este tipo de válvulas se utilizan para gas, están compuestas por un vástago roscado con punta cónica la cual se acopla a una sección circular en una posición vertical, ilustración 31.

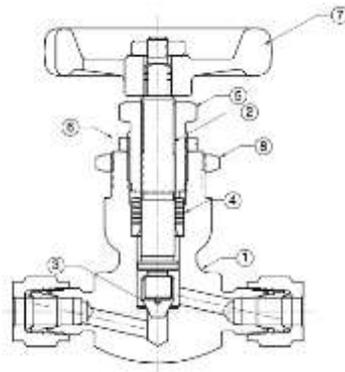


Ilustración 31. Corte transversal de una válvula de aguja [31]

### 3.3 Microcontroladores:

Para lograr el proceso de automatización y control de sistema se prefiere la implementación de un sistema de microcontroladores, debido a que este puede encargarse del monitoreo de los sensores del calentador, realizar la acción de control y en el caso del control, puede cambiarse la sintonización del control, de manera que el sistema puede actualizarse para obtener un mejor rendimiento.

En el mercado existen diversos tipos de microcontroladores, cada uno con diferentes parámetros de trabajo y lenguajes de programación. Algunos que se pueden mencionar son la línea de microcontroladores MSP 430 de Texas Instruments, los microcontroladores ATMEL, los cuales se encuentran en las muy conocidas placas ARDUINO, o bien los microcontroladores PIC de microchip.

Para no entrar en detalles sobre las ventajas y desventajas que cada uno de estos puede ofrecer, el microcontrolador seleccionado para este proyecto es el PIC, debido a que la cantidad de entradas y salidas es más que suficiente para hacer posible este proyecto.

Se sabe que la línea de microcontroladores PIC es muy extensa. A lo largo de nuestra carrera universitaria, se ha tenido acercamiento con el PIC 16F887 y el PIC18F4620, siendo el primero considerado parte de la familia de gama media baja y el segundo, parte de la gama media alta.

Se puede conocer a detalle cada uno de estos microcontroladores con tan solo leer la hoja de datos disponible en la página del fabricante. Para simplificar, se opta por usar el PIC18F4520, debido a que tiene una capacidad de memoria mayor que los de la familia 16F, además de contar con un vector de interrupciones de alta y baja prioridad, lo cual permite realizar interrupciones de acciones de emergencia en los momentos indicados.

### 3.4 Tipos de baterías:

Las baterías son una parte importante para el proyecto, debido a que la interfaz se encontrara dentro de la regadera y expuesto a flujo de agua, esta no puede conectarse a la red eléctrica para funcionar. Por esta razón se deben de considerar los distintos tipos de baterías, así como sus ventajas y desventajas necesarias para su uso.

Una batería es un dispositivo capaz de acumular energía eléctrica a través de procesos electroquímicos, el cual se forma gracias a la formación de una o más celdas electroquímicas. Cada celda consta de un electrodo positivo o cátodo y un electrodo negativo o ánodo, además de un electrolito, el cual permite que los iones se desplacen entre los electrodos, permitiendo así el flujo de corriente fuera de la batería. Gracias a la composición química algunas baterías pueden recargarse cierto número de ciclos y podrán seguir funcionando de manera correcta, mientras que otras serán desechadas al ser usadas una sola vez.

Cada que se selecciona una batería, deben considerarse los siguientes parámetros:

- **Voltaje:** El voltaje o diferencia de potencial de las baterías es el primer parámetro a considerar. Este se define como el trabajo realizado sobre la unidad de carga circulante. Es debido a esto, que si se requiere de obtener mucho trabajo de una batería, será necesario un mayor voltaje.
- **Intensidad de corriente:** Se refiere a la carga eléctrica que es capaz de suministrar la batería sin causar sobrecalentamiento y daños a esta. Dicho parámetro está definido por la resistencia interna con la que esta cuenta.
- **Capacidad de carga:** Se refiere a la cantidad de carga que puede almacenar el elemento. Se encuentra definido amperio-horas (Ah), o bien si la capacidad de la batería es pequeña se encuentra definida en miliamperio-hora (mAh). Mediante este parámetro se puede calcular el tiempo que puede tardar una batería en descargarse por completo. Por ejemplo, una batería de 1000mAh, terminara de descargarse en 1 hora si se demanda un Amperio de corriente, o bien tardara 2 horas si se le demandan 500 miliamperios de corriente.
- **Autodescarga:** Es el efecto que se presenta en baterías que no se usan durante un largo periodo de tiempo, durante el cual se produce una disminución en la capacidad de la misma. El factor que más influye en la autodescarga de la batería es la temperatura. Por ello si estas no serán usadas durante un largo periodo de tiempo, su almacenamiento se realice a bajas temperaturas.
- **Vida útil:** Esta característica es propia de las baterías recargables, debido a que no pueden cargarse y descargarse de manera ilimitada. Dicho parámetro no se establece en años, si no en la cantidad de ciclos de carga y descarga que son capaces de realizar.
- **Densidad energética:** se refiere a la cantidad de voltaje por unidad de masa que puede entregar la batería. Se mide en (V/gr). En pocas palabras, a mayor densidad energética, mayor será el voltaje que la batería puede entregar y ser más pequeña.

En el caso de las baterías recargables, existen dos parámetros más que deben de considerarse, los cuales son:

- **Constante de Carga(descarga):** Es una constante definida por el fabricante, la cual se usa para señalar con mayor facilidad la intensidad de corriente de carga o descarga que se da o se le solicita a la batería. Esta se calcula de la siguiente manera:

$$C = \frac{X}{1000} \quad (4)$$

En donde:

C = constante de carga/descarga.

X = Capacidad de la batería en mAh

- **Vulnerabilidad al efecto memoria:** El conocido como efecto memoria es un fenómeno no deseado dado en las baterías recargables, el cual reduce su capacidad de carga debido a la formación de cristales en el interior de estas, esto por la exposición a altas temperaturas, por el uso o bien por las cargas incompletas a las que se les somete.

Dicho fenómeno es muy común en las baterías de Níquel Cadmio (NiCd) y en menor grado, en las baterías de Níquel Hidruro Metal (NiMH), mientras que en aquellas cuya química sea de plomo ácido o de iones de Litio es poco perceptible.

### 3.4.1 Voltaje y corriente de carga en una batería recargable

Para realizar un proceso de carga, es necesario conectar una fuente de corriente continua con un valor mayor de voltaje que el voltaje nominal de la batería, conectando el polo positivo de la fuente con el de la batería y el negativo de la fuente con el negativo de la batería.

Para realizar este proceso de manera segura, se debe de asegurar que la fuente no suministre más corriente que aquella indicada por el fabricante. Regularmente, este valor suele estar definido alrededor del 10% del valor de la capacidad de la batería. De este modo, por ejemplo, para cargar una batería de 800 mAh de capacidad, la corriente de carga no debe de superar los 80mAh.

### 3.4.2 Voltaje y corriente de descarga.

Al conectarse una batería a alguna carga externa el voltaje de la batería disminuye y puede llegar a desaparecer por completo. Si esto ocurre se llama efecto de descarga profunda, el cual es dañino para la batería y puede llegar a inutilizarla por completo sin haber cumplido con los ciclos de carga de la vida útil. Por lo cual es necesario evitar que dicho efecto ocurra.

La corriente que una batería es capaz de suministrar a las cargas externas se encuentra limitado por su valor de resistencia interna. Por lo cual se debe de cuidar que dicho valor de corriente no sea superado. Un ejemplo de las corrientes de carga de las baterías se muestra en la tabla 9:

TABLA 9. CORRIENTES MÁXIMAS DE DESCARGA DE LOS ELEMENTOS DE NiCd EN FUNCIÓN DE SU RESISTENCIA INTERNA [VÉASE BIBLIOGRAFÍA 21]

Resistencia Interna (mΩ)	Corriente máxima de descarga (A)
4	70
5 a 9	30
10 a 12	Menos de 25
12 a 17	Menos de 15

### 3.4.3 Tipos de baterías

Algunos de los tipos de baterías más comunes en el mercado se describen a continuación:

- **Baterías de Plomo-Acido:** Este tipo de baterías se conforma por dos electrodos de plomo.

Ventajas:

- Bajo costo.
- Fácil fabricación.

Desventajas:

- No admiten ni sobrecargas ni descargas profundas, ya que dañan su vida útil.
- Son altamente contaminantes.
- Baja densidad de energía.
- Peso excesivo, debido a su composición de plomo.

Estas baterías se usan principalmente en automóviles, sistemas fotovoltaicos y en aplicaciones estacionarias tales como acumuladores para fuentes de alimentación ininterrumpidas para equipos médicos, informáticos, equipos de seguridad, etc.

- **Pila alcalina:** Esta clase de baterías están formadas por cloruro de sodio o potasio. Debido a su composición cuentan con potencia y corriente de gran estabilidad debido a la amplia movilidad de iones a través del electrolito.

Ventajas:

- Bajo costo.
- Fácil fabricación.

Desventajas:

- Un solo uso.
- Se debe de disponer correctamente de ellas debido a que sus materiales son altamente contaminantes.

- **Batería de Níquel- Cadmio(Ni-Cd):** Están compuestas por un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de cadmio, con un electrolito de hidróxido de potasio. Gracias a esta configuración de materiales se permite que la batería pueda recargarse, aunque no cuentan con gran capacidad.

Ventajas:

- Gran rango de temperaturas de funcionamiento.
- Admiten sobrecargas.

Desventajas:

- Presentan efecto memoria muy alto.
- Densidad de energía muy baja.

Características:

- Voltaje proporcionado: 1.2 V.
- Densidad de energía: 50 Wh/kg.
- Capacidad usual 0.5 a 1.0 A.
- Efecto memoria muy alto.

- **Batería de Níquel- Hidruro Metálico (Ni-Mh):** Están compuestas por un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico

Ventajas:

- No se ven afectadas de manera considerable por el efecto memoria.

Desventajas:

- Su desempeño se ve afectado por el frío extremo.

Características:

- Voltaje proporcionado: 1.2 V.
- Densidad de energía: 80 Wh/kg.
- Capacidad usual 0.5 a 2.8 A.
- Efecto memoria bajo.

- **Batería de iones de Litio (Li-ion):** Son una variación de las baterías de iones de litio (Li-ion). Sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. Estas baterías tienen un tamaño más reducido respecto a las de otros componentes.

Cada celda tiene un voltaje nominal de 3,7 V, voltaje máximo 4,2 V y mínimo 3,0 V. Este último debe respetarse rigurosamente ya que la pila se daña irreparablemente a voltajes menores a 3 voltios. Se suele establecer la siguiente nomenclatura XSYP que significa X celdas en serie, e Y en paralelo. Por ejemplo, 3s2p son 2 baterías en paralelo, donde cada una tiene 3 celdas o células. Esta configuración se consigue conectando ambas baterías con un cable paralelo.

Ventajas:

- Mayor cantidad de densidad de carga.
- Buena tasa de descarga

Desventajas:

- Si el voltaje de cada celda cae debajo de los 3 Volts, esta puede dañarse permanentemente
- Muy sensibles a explotar

Características:

- En el mercado se encuentran desde 1 hasta 4 celdas
- Existen modelos que aceptan la carga rápida

Las baterías LiPo se venden generalmente de 1S a 4S lo que significa:

- Li-PO 1S: una celda, 3,7 V.
- Li-PO 2S: dos celdas, 7,4 V.
- Li-PO 3S: tres celdas, 11,1 V.
- Li-PO 4S: cuatro celdas, 14,8 V.

Su tamaño y peso las hace muy útiles para equipos pequeños que requieran potencia y duración, tal como los drones.

### **3.5 Sistema de control**

Se requiere que el sistema de control sea capaz de llevar al sistema a la temperatura deseada por el usuario, independientemente de que el flujo de agua caliente varíe dentro del hogar. Esto debe lograrse con el fin de que la temperatura del agua no supere un límite de seguridad establecido mediante los datos obtenidos de la investigación.

### **3.6 Interfaz de usuario**

La interfaz de usuario para este prototipo debe de mostrar las siguientes características que se añadirán al modelo final comercial:

- Selección de temperatura mediante un teclado alfanumérico.
- Mostrar mensajes sobre temperatura leída, temperatura deseada y temperatura programada en boiler.
- En caso de fallo mostrar en pantalla de que se trata.

### **3.7 Instrucciones de la prueba del prototipo**

Se busca tener un prototipo cuyo funcionamiento sea el más cercano al del producto final, por el momento el enfoque será en aspectos de funcionamiento y seguridad, dejando la parte estética y presentación como un trabajo a futuro integrado en un producto final.

#### **3.7.1 Procedimiento para la realización de la prueba**

Objetivo: Seleccionar el sistema de control adecuado que cumpla con el propósito de regulación de temperatura, así como integrar el sistema de control e interfaz de usuario.

La prueba es dividida en dos partes: la primera consiste en la realización e implementación del algoritmo de control para observar su comportamiento.

La segunda parte, es que una vez observado que el sistema de control funciona correctamente, proceder a la interacción de la interfaz y el control del calentador, sin la necesidad del muestreo de datos en computadora, debido a que en la primera etapa se comprobará su efectividad.

Se decide que la mejor opción de modificación es la de un calentador de paso de tipo instantáneo, debido a que al no almacenar agua solo se usa el gas necesario para calentar lo que se usa, además de ser una opción económica.

El prototipo será instalado dentro del Laboratorio de Ingeniería Mecánica con los aditamentos necesarios para simular el uso de baja presión de agua. Además, se deben de realizar las modificaciones y maquinado de elementos pertinentes para colocar sensores de temperatura y monitorear la temperatura del agua a la entrada del calentador, a la salida de este, y a la salida en regadera. Se debe de colocar una válvula de paso para evitar el paso de agua general y una llave para regulación de flujo en regadera.

### 3.7.2 Matrices de decisión

Para poder realizar las pruebas de funcionamiento y modificación del boiler, es necesario seleccionar los sensores, actuadores y baterías que mejor se ajusten a las necesidades del proyecto. Para ello se realizan las siguientes matrices de decisión y de esta manera se justificará la selección de cada una.

En cada matriz, se le asignara un puntaje a cada parámetro, siendo 3 la calificación más alta y que cumple al cien por ciento las expectativas de uso, y siendo 1, la calificación más baja, debido a que no cumple con los requerimientos deseados. Una calificación de 2 representa que el sistema puede funcionar, pero bajo ciertas reservas.

#### 3.7.2.1 Matriz de decisión de sensores

Se toma en cuenta los aspectos de rango de temperaturas que puede medir, el cual debe comprender desde los 0°C hasta los 100°. Además, al ser un sistema de control implementado mediante métodos digitales, se busca que el parámetro a medir sea lo más lineal posible, debido a que será más sencillo y requiere de menor tiempo de procesamiento.

Se requiere el sensor tenga larga vida útil y sobre todo que sea capaz de trabajar en ambientes líquidos, además de la facilidad con que se obtienen los materiales necesarios para su implementación. Véase Tabla 10.

TABLA 10. MATRIZ DE DECISIÓN PARA SENSORES

Sensor	Rango de Temperatura	Linealidad en su salida	Duración	Trabaja en líquidos	Facilidad de implementación	Total
Semiconductor (LM35)	3	3	1	1	3	11
Termopar con acondicionamiento	3	1	3	3	2	12
Termopar con LT1025	3	3	3	3	1	12
Termopar con MAX6675	3	3	3	3	3	15
Termistores	3	1	2	3	1	10

Como puede observarse en la tabla 10, el termopar acondicionado mediante un MAX6675 es el que nos da un mejor puntaje, por lo cual fue el seleccionado para su implementación en el sistema

### 3.7.2.2 Matriz de decisión de baterías

En este punto, se selecciona la mejor química para la batería. En ella se busca que la batería soporte la temperatura de trabajo del sistema (2°C a 28°C), la densidad energética, la capacidad de carga con la que cuenta cada una de ellas y que no se requiera de un cargador especial con monitoreo. Se excluye la batería alcalina debido a que se busca que el sistema tenga una batería recargable y las baterías de ácido plomo no se toman en cuenta, debido a que son en extremo contaminantes. En caso de que el usuario decida usar baterías alcalinas, se debe dar la recomendación de que no se debe conectar el circuito de carga para las baterías, ya que puede ocasionar daños graves al sistema o al calentador.

TABLA 11. MATRIZ DE DECISIÓN PARA BATERÍAS

Química de la batería	Temperatura De trabajo	Densidad Energética	Capacidad de carga	Cargador normal	Soporta descarga profunda	Total
Níquel- Cadmio (Ni-Cd)	2	1	1	3	2	9
Níquel-Hidruro Metal (Ni-Mh)	3	2	2	3	3	13
Ion Litio (Li)	2	3	3	1	1	10

Como se puede observar en la tabla 11, las baterías de Níquel Hidruro de metal y las baterías de Ion- Litio son la mejor opción. Si nos guiamos por el criterio de tener un cargador normal, las baterías de Níquel Hidruro metal serían la mejor opción, pero en cuanto a la densidad energética las baterías de Ion Litio son una opción mucho mejor, debido a que aumentarían en gran medida la capacidad de las baterías.

Al investigar sobre los modelos disponibles en el mercado, se encuentra que las baterías tipo Ion litio de 1 sola celda son capaces de entregar de 3.7 a 3.3 volts de energía, pero se requiere que estén bajo constante monitoreo debido a que no deben de sufrir descargas profundas, es decir no se debe permitir que su voltaje caiga a menos de 3 volts, ya que daña permanentemente a la batería. Además de que son muy susceptibles a explotar.

## Capítulo 4: Diseño de detalle

Conocidas las opciones de sensores y actuadores se presentan las formas en que estas se implementaron dentro del proyecto. En este capítulo se describe a detalle cada parte y su razón de ser incluida.

### 4.1 Características físicas y de trabajo del calentador a modificar

El calentador que elegimos para trabajar es del tipo instantáneo marca Cinsa. Las especificaciones del calentador se presentan a continuación:

Tabla 12. Algunas de las características de trabajo del calentador [Obtenidos del manual de usuario]

CARACTERÍSTICAS DE TRABAJO DEL CALENTADOR	
Carga Térmica	6.97 [KW]
Presión de gas L.P. mínima	1.76[gr/cm <sup>2</sup> ] = 17.33 [kPa]
Flujo de Agua Nominal en la Ciudad de México	4 [L/min]
Presión hidrostática de trabajo mínima	1.50 [m <sub>H2O</sub> ] = 0.012[MPa]
Presión hidrostática de trabajo máxima	45.0 [m <sub>H2O</sub> ] = 0.45[MPa]
Incremento de temperatura a caudal nominal	25°C

Tabla 13. Dimensiones físicas del calentador [Obtenidos del manual de usuario]

DIMENSIONES FÍSICAS DEL CALENTADOR	
Frente	30.0 [cm.]
Fondo	13.5 [cm.]
Ancho	48.8 [cm.]

El motivo de esta elección es debido a que el calentador del tipo instantáneo permite el ahorro de gas debido a que solo se enciende durante su uso. Además, mientras el usuario cuente con gas y agua para suministrar al calentador, podrá contar con agua caliente para su uso. El calentador no ocupa un espacio considerable y al ser de una marca nacional nos permitirá obtener de manera sencilla las refacciones para su mantenimiento y uso.

Basado en entrevistas de usuarios de calentadores de agua, el modificar un calentador para que este regule a la temperatura deseada es la opción más viable por los motivos son los siguientes:

- Si el agua sale a la temperatura que el usuario requiere, no es necesario el usar la llave de agua fría, lo cual evita el que se ocasione un choque térmico que en muchas ocasiones es el culpable de que el calentador se apague y se tenga que repetir el proceso de encendido.
- Con las condiciones correctas de instalación (longitud máxima de 5 metros del calentador a la regadera, presión mínima de 1.5 metros columna de agua y presión de gas 1.76 KPa/cm<sup>2</sup>), el calentador es capaz de proporcionar agua caliente al usuario de manera “indefinida”.

Al calentar solo el agua que se usa en el momento en que es requerida, se presenta un ahorro tanto de gas como de agua, lo cual a largo plazo beneficia al usuario a manera de ahorro económico.

## 4.2 Diseño y manufactura de adaptador para termopar tipo k

Como se menciona en las matrices de decisión, el mejor sensor para trabajar este proyecto resulta ser un termopar de tipo K conectado a un circuito MAX6675. Para poder utilizar el termopar tipo K fue necesario diseñar una adaptación que cumpliera la función de poder albergar al sensor y al mismo tiempo permitir el paso de agua, debido a que el modelo que se encontró con disponibilidad inmediata en el mercado, cuenta con una pieza roscada que tiene la función de atornillarse al barreno por el cual se colocara el sensor.

### 4.2.1 Requerimientos de la instalación.

Para el diseño de las adaptaciones para el termopar se tomaron en cuenta tres factores que determinaron la geometría del acoplador, los cuales son:

- Conexión de salida del calentador.
- Geometría del termopar.
- Geometría del herramental para el ajuste de elementos roscados.

#### 4.2.1.1 Conexión de salida del calentador.

El calentador viene integrado originalmente con un tubo de ½ pulgada de diámetro interior en cuyo exterior tiene una cuerda tipo NPT.

#### 4.2.1.2 Geometría del termopar.

El termopar tipo K seleccionado viene dentro de un pequeño tornillo hueco con cabeza hexagonal el cual presiona el bulbo del termopar y este debe ser presionado en la cabeza para poder asegurar una unión mecánica la cual impida la fuga de agua, ilustración 32.



*Ilustración 32. Forma del termopar Tipo K a utilizar [32]*

#### 4.2.1.3 Geometría de la herramienta para el ajuste de elementos roscados.

Debido a que para este tipo de ajustes se utilizan llaves inglesas o españolas, se recomienda que los elementos que sujeten estas herramientas tengan una geometría cuadrangular o en su defecto hexagonal.

## 4.2.2 Modelo del acoplador para termopares en un software de CAD.

Tomando en cuenta las especificaciones de los puntos anterior obtenemos el siguiente modelo:



*Ilustración 33: Modelo por computadora del acoplador [33].*

#### **4.2.3 Medios de manufactura.**

Debido a las geometrías de la pieza se utilizaron medios de manufactura convencionales como son el torno y la fresadora principalmente, utilizando también herramientas auxiliares en el proceso de manufactura.

#### **4.2.4 Selección de material.**

Para la selección del material se consideraron las condiciones bajo las cuales trabajará el acoplador así como otros factores que pueden repercutir en el proceso de manufactura:

- Resistencia a la corrosión.
- Incompatibilidad química con metales.
- Facilidad de maquinabilidad.
- Bajo costo.

Debido a estos requerimientos se selecciona el Nylamid como material para la manufactura del acoplador.

#### **4.2.5 Selección de la herramienta.**

Debido a que el material para la manufactura es un material de fácil maquinabilidad, se seleccionaran herramientas de corte de acero de alta velocidad, esto por su bajo costo, sus buenas propiedades para trabajar y su incompatibilidad con el material a maquinar.

##### **4.2.5.1 Brocas y machuelos.**

Las brocas utilizadas fueron seleccionadas de acuerdo a tablas de roscas en donde y también de acuerdo al diámetro interno de la tubería utilizada la cual es de 0.5 de pulgada.

Para el roscado interior se determinó mediante tablas una broca 23/32 para un machuelo NPT de 0.5' como se muestra en la siguiente tabla 14:

TABLA 14. TABLA DE SELECCIÓN DE MACHUELO NPT

Tabla para selección de machuelo NPT	
Tamaño del machuelo	Tamaño del barreno
1/8 – 27	R
1/4 – 18	7/16
3/8 – 18	37/64
1/2 – 14	23/32
3/4 – 14	59/64
1” – 11 – 1/2	1” – 5/32
1” – 1/4 – 11 – 1/2	1” – 1/2
1” – 1/2 – 11 – 1/2	1” – 47/64
2” – 11 – 1/2	2” – 7/32
2” – 1/2 – 8	2” – 5/8
3” – 8	3” – 1/4
3” – 1/2 – 8	3” – 3/4
4” – 8	4” – 1/4

Para el barreno roscado del termopar se determinó el uso de una broca 5.0 mm para un machuelo M6x1.0:

**Metric Sizes** (measurements in millimeters and inches)

Tap Size and Pitch mm	Cutting Taps		Forming Taps	
	Drill Size mm	Dec. Equiv. in	Drill Size mm/in	Dec. Equiv. in
M1.6 x 0.35	1.25	.0492	1.45	.0571
M1.8 x 0.35	1.45	.0571	1.65	.0650
M2 x 0.40	1.60	.0630	1.80	.0709
M2.2 x 0.45	1.75	.0689	2.00	.0787
M2.5 x 0.45	2.05	.0807	2.30	.0906
M3 x 0.50	2.50	.0984	7/64	.1094
M3.5 x 0.60	2.90	.1142	3.20	.1260
M4 x 0.70	3.30	.1299	3.70	.1476
M4.5 x 0.75	3.70	.1476	4.10	.1614
M5 x 0.80	4.20	.1654	14	.1820
M6 x 1.00	5.00	.1969	7/32	.2188
M7 x 1.00	6.00	.2362	F	.2570
M8 x 1.25	6.70	.2638	7.40	.2913
M8 x 1.00	7.00	.2756	19/64	.2969

Ilustración 34 Tabla de brocas para machuelo métrico.[34]

También se utilizaron brocas de diámetros 1/8, 5/32, 1/4 y 3/8 para barrenar progresivamente y disminuir así las fuerzas de corte generadas.

#### 4.2.5.1 Buril y cortador.

Para la manufactura en torno y fresadora son necesarias herramientas de corte, en este caso se utilizó un cortador de 1/4" y un buril de 1/4" los dos fabricados en acero de alta velocidad, ilustración 35.

El buril es previamente afilado basándose en una plantilla de 60°, esto debido a la geometría de la rosca a manufacturar.



*Ilustración 35. Buril de HSS de 1/4 ". [35]*

Gracias al proceso de torneado se obtienen las piezas redondas, y mediante el uso de una broca y el torno se realiza el barrenado del diámetro interior, véanse ilustraciones 36 y 37.



*Ilustración 36. Piezas redondas antes del barrenado [36]*



*Ilustración 37. Proceso de barrenado de las piezas en torno [37].*

Para el cortador de la fresadora, se selecciona un cortador vertical recto de cuatro filos de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro, ilustración 38.



*Ilustración 38 Cortador vertical recto de HSS de 1/4 “. [38]*

#### **4.2.6 Trabajo en lámina.**

También conocido como pailería, es la técnica que consiste en el trazo, corte y unión de piezas metálicas a partir de láminas o placas. Apoyándose en herramientas de corte, doblado y procesos de unión, siendo las más utilizadas:

- Cizalla cortadora de cortina.
- Cizalla cortadora de banco.
- Dobladora de lámina.
- Soldadora de punto.

De igual manera la pailería se apoya de la soldadura y algunos elementos mecánicos de unión como son:

- Proceso de soldadura MIG.
- Soldadura por electrodo revestido.
- Soldadura Oxiacetilénica.
- Soldadura TIG.
- Remaches.
- Pijas.

- Tornillos
- Engargolados.

Este proceso se maneja en este caso como un proceso auxiliar para el prototipo en construcción, sin embargo, para una producción en serie deberá ser sustituido por un proceso de troquelado, ya que esto reducirá el tiempo de manufactura.



*Ilustración 39. Proceso de soldadura de punto [39]*

#### **4.3 Control automático del sistema de calentamiento de agua.**

La automatización de los procesos es uno de los ámbitos en los que se han aplicado de manera más amplia los conocimientos generados por las ciencias de ingeniería. La electrónica y la teoría matemática en torno a la dinámica de los sistemas físicos y procesos, son los pilares en los cuales se fundamenta la teoría de control moderna; ya que al integrar estas tres ramas de la ingeniería para conseguir que un sistema lleve a cabo su objetivo, con la mínima o nula participación del elemento humano, le otorgan repetibilidad al proceso, además de hacerlo óptimo.

La adquisición de la información que requieren los sistemas automáticos, para poder realimentar a la o las entradas del sistema, son una parte fundamental del diseño de un sistema automático y son los sensores los responsables de proporcionar la información del mundo físico, necesario para que se lleve a cabo una acción de control.

Una vez conocida la dinámica del sistema es posible establecer una función de transferencia o modelo de la planta, la cual puede ser excitada con una entrada para obtener una salida deseada. Es común que dicha salida varíe, debido a perturbaciones externas, tales como una modificación en el requerimiento de la salida o los factores externos que afectan a los elementos dinámicos de la planta. Existen procesos en los que se busca que la salida del sistema no varíe; específicamente se busca ejecutar una acción que mantenga la salida en un

valor establecido (referencia), dicha acción de control es conocida como regulación. A continuación, en la ilustración 40, se muestra mediante un diagrama de bloques, un sistema común de regulación.

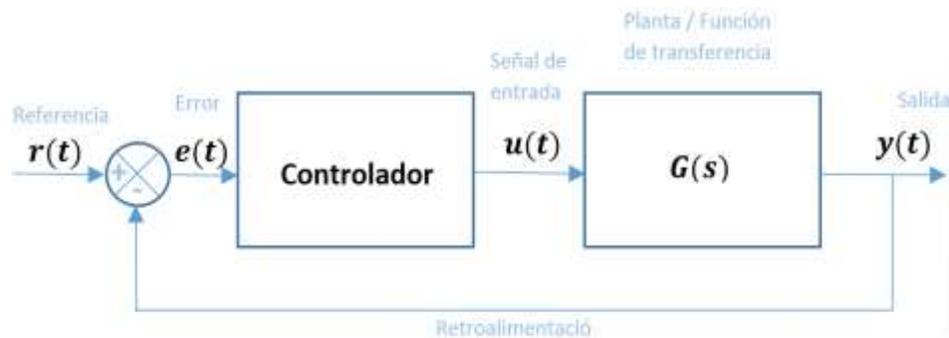


Ilustración 40 Diagrama representativo sistema de control [40]

Al utilizar un instrumento de control electrónico tal como lo es un microcontrolador, es necesario diseñar un sistema de control en tiempo discreto, el cual se caracteriza por llevar a cabo sus procesos de manera secuencial; esto quiere decir que en general, las instrucciones que permiten ejercer acciones de control se llevan a cabo de manera secuencial, en periodos de tiempo definidos como tiempo de muestreo. De manera sencilla, el microcontrolador lleva a cabo la adquisición de las señales provenientes de los sensores, luego las procesa aplicando el algoritmo de control, para dar como salida una señal al actuador que regula la entrada del sistema. En la ilustración 41 se muestra mediante diagrama de bloques la forma en que opera un sistema de control digital.

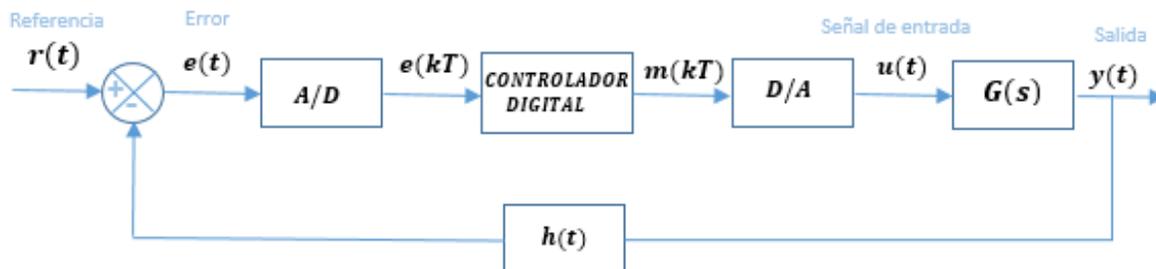


Ilustración 41. Diagrama de bloques de un sistema de control digital [41]

### 4.3.1 Objetivos del controlador.

Los objetivos que se buscan con más frecuencia al implementar un controlador en un sistema, son los de regulación o seguimiento. Para el seguimiento, es requerido que la salida obedezca a una serie de variaciones definida, para que el sistema cumpla con su objetivo, mientras que para la regulación, el controlador debe buscar que la salida se mantenga en un valor constante.

El sistema que controlamos, es uno en el que la acción de control ejerce una regulación, manteniendo una temperatura de salida constante. Considerando que el suministro de calor busca ser optimizado, los sobrepasos en la señal de salida no son admisibles, puesto que uno de estos provoca combustión incompleta del gas y llamaradas que ponen en riesgo la instalación.

Otro de los aspectos deseables en un sistema de este tipo es que el tiempo de asentamiento sea menor, lo cual solo es posible mejorar en el caso de que al sistema controlado se le solicite una temperatura que se encuentre por debajo de la temperatura máxima dada por su capacidad.

### 4.3.2 Filtrado digital.

Después de llevar a cabo la adquisición de los datos, es necesario filtrar dichas lecturas, para suavizar la curva que representa a la dinámica del sistema. El filtro utilizado es un filtro digital pasa bajas, el cual es perfeccionado a través de varias iteraciones del software utilizando el modelo de filtro de primer orden presentado en la ecuación 5:

$$\theta_{fil}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \theta_{ad}(s) \quad (5)$$

Donde  $\theta_{fil}$  es la señal de temperatura filtrada y  $\theta_{ad}$  es la señal adquirida.

Cabe destacar que el filtro digital no se implementa durante la operación debido a que estos ocasionan un retraso de la señal durante la operación, lo cual daría un atraso en la señal de control implementada, la finalidad de aplicarlo es el procesamiento de la señal para posteriormente estimar la función de transferencia

Para demostrar la efectividad de dicho muestreo se presentan las siguientes gráficas, donde se presentan las señales adquirida, la señal pasada por un filtro de primer orden y pasada por un filtro de segundo orden, tal como se observa en la ilustración 42.

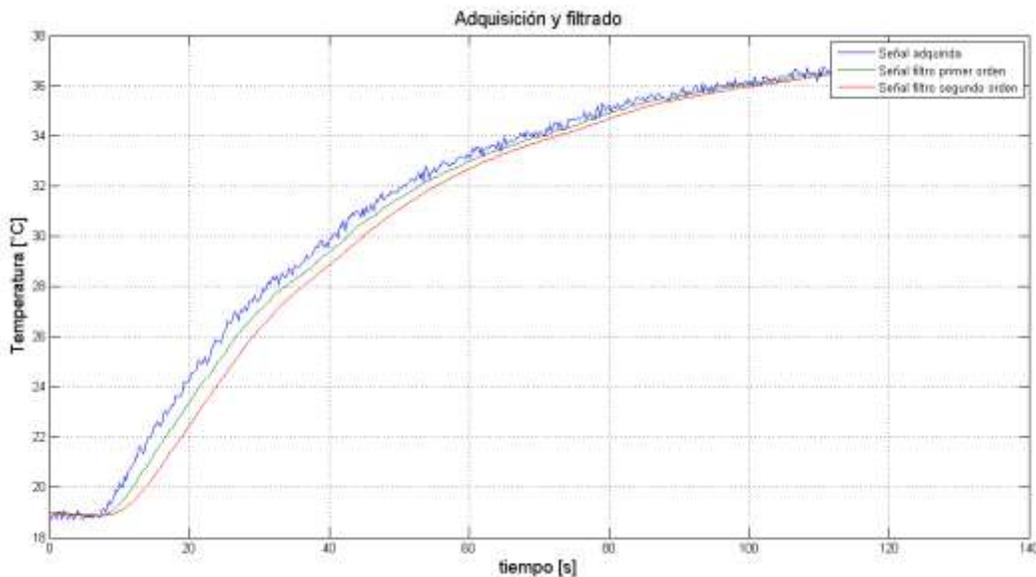


Ilustración 42. Comparación muestras y señal filtrada [42]

La presentación grafica de cada señal generada permite observar el atraso que ocasiona el aumento en el orden del filtro, al mismo tiempo que el crecimiento de las mismas graficas se suaviza, y las características de la dinámica del sistema son más fácilmente observable.

### 4.3.3 Estimación de la función de transferencia

Para que sea posible implementar una acción de control en el sistema de calentamiento de agua, es necesario conocer su dinámica y establecer un modelo matemático que permitan modelar el fenómeno. La incertidumbre en los parámetros que conforma a dicho sistema y la cantidad limitada de sensores que pueden implementarse, dada la simplicidad que se busca en la instalación de la planta, nos ha conducido a estimar la función de transferencia de ésta utilizando los datos de temperatura obtenida por los termopares (señal de salida), los valores nominales de flujo de agua y poder calorífico del gas con que se alimenta al sistema (señal de entrada); considerando a nuestra planta como un sistema causal: para cada valor de entrada existe solo un valor específico de salida.

Para ello proponemos dos maneras de calcular dichos valores. La primera consiste en analizar el sistema como si se tratara de uno de primer orden regido por el siguiente modelo de función de transferencia de primer orden con retraso mostrado a continuación en la ecuación 6:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (6)$$

El modelo presentado anteriormente ha sido definido dentro de la teoría de control debido a que los modelos dinámicos de los sistemas de control de temperatura, se caracterizan por el flujo y almacenamiento de energía térmica en alguno de los elementos que los conforma. Dicha energía calorífica fluye a un ritmo proporcional a la diferencia de temperaturas entre los cuerpos.

$$q = \frac{1}{R} (T_1 - T_2) \quad (7)$$

Donde  $q$  es el flujo de energía calorífica en  $\left[\frac{J}{s}\right]$ ,  $R$  la resistencia térmica en  $\left[\frac{^{\circ}C}{J/s}\right]$  y  $T$  es la temperatura de cada cuerpo en  $[^{\circ}C]$ .

El efecto que tiene el flujo de energía calorífica hacia el cuerpo, es el de aumentar su temperatura. Dicha variación es proporcional a la cantidad de energía calorífica recibida y a la capacidad del material de absorber calor, quedando expresada de la siguiente manera:

$$\dot{T} = \frac{1}{C} q \quad (8)$$

Donde  $C$  Es la capacitancia térmica del material en  $\left[\frac{J}{^{\circ}C}\right]$ . Usualmente se tienen varias regiones por las que el cuerpo puede recibir o ceder calor, así que, de manera ideal,  $q$  representa la suma del calor recibido o cedido. La dificultad para medir las pérdidas exactas de calor que experimenta nuestro sistema, supera el alcance de este proyecto; es por lo cual que se deja la tarea de compensar este detalle al algoritmo de control, puesto que un modelado del sistema requeriría de una mayor cantidad de tiempo y de recursos. De esta manera el costo del proyecto se reduce y la propuesta ofrece resultados bastante aceptables.

Después de haber planteado las consideraciones anteriores y sustituyendo la ecuación uno en la ecuación dos:

$$\dot{T} = \frac{1}{RC} (T_1 - T_2) \quad (9)$$

La expresión anterior nos permite decir que es válido estimar la dinámica de un sistema de transferencia de calor puede ser modelado como un sistema de primer orden, es por lo cual, se plantea una función de transferencias del tipo:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (10)$$

Para conocer la función de transferencia, se deben de obtener los parámetros K, Tao y theta. Estos se definen de la siguiente manera:

- El valor de K, se obtiene mediante la relación existente en el valor inicial y final de la salida, dividido entre el valor final e inicial de la entrada al sistema:

$$K = \frac{Y(\infty) - Y(0)}{U(\infty) - U(0)} \quad (11)$$

- El valor de  $\tau$ , es un valor característico de la función. Es el tiempo que el sistema llega a 63.2% del valor final. Para obtener dicho valor se recomienda realizarlo gráficamente. Para ello se obtiene matemáticamente el valor del porcentaje mencionado y se obtiene el tiempo en que se obtiene dicho valor. A continuación, se muestra el ejemplo de cómo se obtuvo dicho valor para nuestro ejemplo

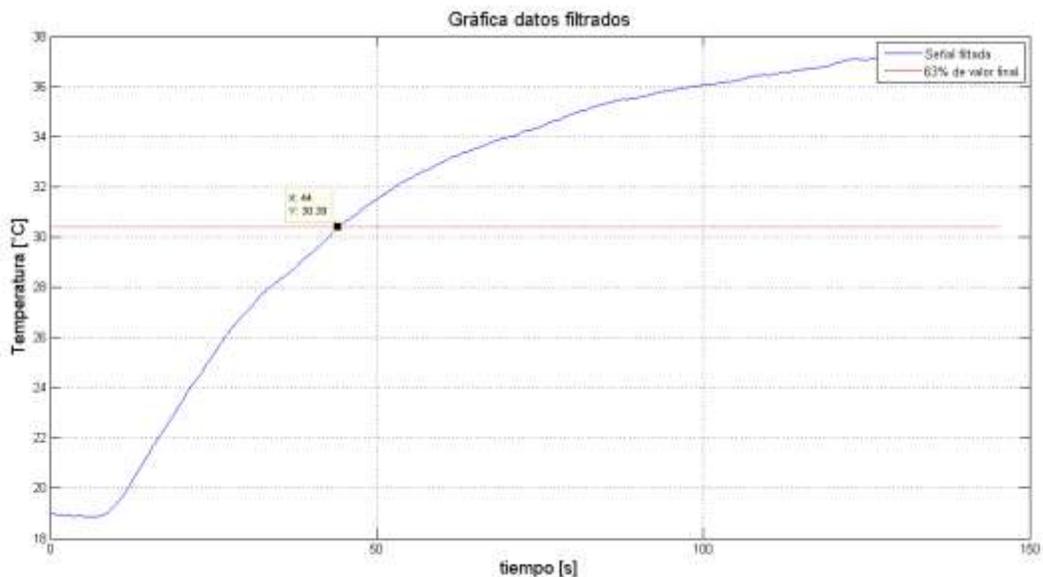


Ilustración 43. Ejemplo de cómo obtener el valor de Tao [43]

- El valor de theta se considera como el tiempo de retardo que el sistema toma para comenzar a realizar cambios. Puede tomarse como el tiempo muerto, es decir tiempo en que no se obtiene valor alguno

de cambio. Este sistema en particular se toma como valor de theta al tiempo en que tarda en llegar el agua desde el calentador hasta la regadera. El cual es de 11 segundos aproximadamente.

De esta manera, se logra conocer que la función de transferencia aproximada del sistema tiene un comportamiento similar al que se presenta en las muestras obtenidas, y esto se observa en la siguiente gráfica comparativa mostrada en la ilustración 44:

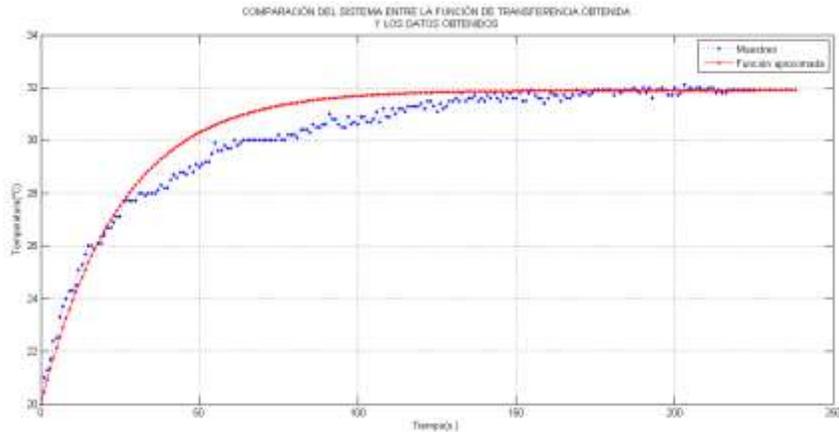


Ilustración 44. Comparación de la estimación con los datos obtenidos [44]

$$G(s) = \frac{3718.75}{25s+1} e^{-11s} \quad (12)$$

Cabe destacar que el muestreo se realiza después de cambiar la válvula de control de gas instalada de fábrica por una servo-válvula.

La segunda manera de analizar estos datos, y obtener la función de transferencia es la siguiente: se considera que los datos obtenidos, son el resultado de introducir a la planta una entrada escalón. Dicho lo anterior, una aproximación razonable de la respuesta del sistema en el dominio del tiempo puede ser la siguiente:

$$y(t) = y(\infty) + Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t} + Ce^{-\gamma t} \quad (13)$$

Donde  $y(\infty)$  es el valor final de temperatura medido a la salida de la regadera.

Se resta el valor final de ambos lados y asumimos que  $\alpha$  es el polo dominante:

$$y(t) - y(\infty) = Ae^{-\alpha t} \quad (14)$$

$$\log_{10}[y(t) - y(\infty)] = \log_{10}[Ae^{-\alpha t}] \quad (15)$$

$$\log_{10}[y(t) - y(\infty)] = \log_{10}[A] - \log_{10}[e] \alpha t \quad (16)$$

Esta ecuación representa una a una línea recta, con ordenada al origen  $b = \log_{10}[A]$  y de pendiente  $m = -\log_{10}[e] \alpha$ . Véase ilustración 45.

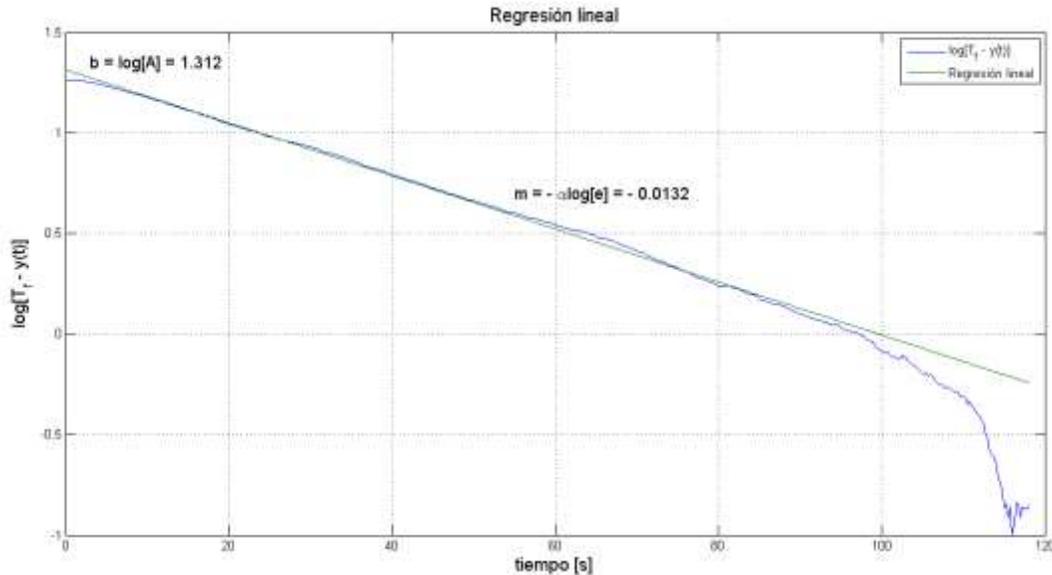


Ilustración 45 Demostración de la obtención de parámetros mediante regresión logarítmica [45]

Es así como la aproximación a la respuesta de un sistema de primer orden queda de la siguiente manera:

$$y(t) = T_F + 10^{\log[A]} e^{-\frac{m}{\log[e]}t}$$

$$y(t) = 37 + 20.5116e^{-0.0304t}$$

### 4.3.3 Sintonización del controlador PID

Una de las maneras más sencillas de sintonizar un controlador PID digital consiste en establecer los valores de ganancia proporcional, tiempo derivativo y tiempo integral. Para este caso se basa en el método establecido por Ziegler-Nichols, el cual propone definir dichos parámetros tal como se muestra en la tabla 15.

TABLA 15. VALORES DE SINTONIZACIÓN PROPUESTOS POR ZIEGLER NICHOLS

Controlador	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$
P	$\frac{\tau}{K\theta}$	-	-
PI	$\frac{0.9\tau}{K\theta}$	$3.33 \theta$	-
PID	$\frac{1.2\tau}{K\theta}$	$2 \theta$	$0.5 \theta$

En caso de no contar con la función de transferencia otra manera de implementar la sintonización del control PID mediante Ziegler Nichols es obtener los valores antes mencionados mediante un método gráfico, en el cual se obtienen las variables tal como se muestra en la ilustración 46.

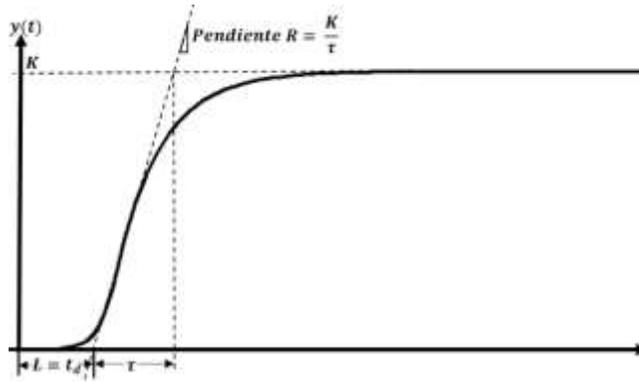


Ilustración 46. Implementación del método gráfico Ziegler Nichols [46]

#### 4.3.4 Implementación del controlador PID

Partiendo del modelo del controlador PID en tiempo continuo obtendremos su equivalente digital:

$$m(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (17)$$

Se procede a discretizar el modelo continuo, valiéndonos de una suma trapezoidal para expresar el término integral y mediante la diferencia de dos puntos para el término diferencial:

$$m(kT) = K \left( e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} + \frac{T_d}{T} [e(kT) - e((k-1)T)] \right) \quad (18)$$

Aplicando la transformada  $\mathcal{Z}$  a ambos lados para obtener la función de transferencia pulso obtenemos:

$$M(z) = K \left[ 1 + \frac{T}{2T_i} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1 - z^{-1}) \right] E(z) \quad (19)$$

$$M(z) = K \left[ 1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{T}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1 - z^{-1}) \right] E(z) \quad (20)$$

$$M(z) = \left[ K_p + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_D (1 - z^{-1}) \right] E(z) \quad (21)$$

De esta manera, se puede apreciar que las ganancias del controlador PID digital quedan expresadas tal como se muestra en la tabla 16:

TABLA 16. DEFINICIÓN DE GANANCIAS DE UN CONTROL DIGITAL

Ganancia controlador PID digital		
Ganancia Proporcional	Ganancia Integral	Ganancia diferencial
$K_P = K - \frac{KT}{2T_i}$	$K_I = \frac{KT}{2T_i}$	$K_D = \frac{KT_d}{T}$

Reordenando los elementos para encontrar la ecuación en diferencias:

$$M(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (22)$$

En donde:

$$q_0 = k_p \left[ 1 + \frac{T}{2t_i} + \frac{t_d}{T} \right] \quad (23)$$

$$q_1 = -k_p \left[ 1 - \frac{T}{2t_i} + \frac{2t_d}{T} \right] \quad (24)$$

$$q_2 = \frac{k_p t_d}{T} \quad (25)$$

Al obtener la señal de entrada a partir de la simplificación y la aplicación de la anti transformada Z:

$$U(z)(1 - z^{-1}) = (q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2})E(z) \quad (26)$$

$$U(z) - U(z)z^{-1} = q_0 E(z) + q_1 z^{-1} E(z) + q_2 z^{-2} E(z) \quad (27)$$

$$U(z) = U(z)z^{-1} + q_0 E(z) + q_1 z^{-1} E(z) + q_2 z^{-2} E(z) \quad (28)$$

$$u(kT) = u((k-1)T) + q_0 e(kT) + q_1 e((k-1)T) + q_2 e((k-2)T) \quad (29)$$

Sustituyendo valores:

$$k_p = \frac{1.2\tau}{K\theta} = \frac{1.2 \cdot 21.5}{0.09 \cdot 22} = 13.03 \quad (30)$$

$$t_i = 2\theta = 44 \quad (31)$$

$$t_d = 0.5\theta = 11 \quad (32)$$

#### 4.4 Gestión de la energía.

Durante el proceso de desarrollo del proyecto, se logró observar que el circuito generador de tren de chispas afecta a todos los circuitos conectados a su misma fuente de energía, lo cual hace difícil que exista un sistema de energía que sea capaz de alimentar al microcontrolador y a los actuadores, debido a que afectaba al microcontrolador a tal grado de interferir con la programación, y a la larga lo dañaría permanentemente.

Por ello se opta por que la alimentación de actuadores y microcontrolador se realice de manera independiente, tal como se muestra en la ilustración 47. Para el modelo final se realiza una propuesta de dos baterías Tipo D conectadas en serie para lograr un voltaje mínimo de 3.3 volts, el cual alimentara a las electroválvulas, la válvula de control y el tren de chispas. Una batería tipo D de Níquel Hidruro Metal tiene una capacidad nominal de 4 Ah. Se realiza una medición de los gastos de energía consumida por los actuadores es de aproximadamente 1 Ampere, lo cual asegura que con dicha batería se puede tener un funcionamiento continuo de 4 horas. Tomando en cuenta que la ducha dura un promedio de 15 minutos, se aseguran 16 usos completos antes de que se necesite recargar las baterías.

En el caso del microcontrolador, se requiere de un voltaje mínimo de 4.5 volts de alimentación para su funcionamiento, esto se observa en la Ilustración 48. Para poder ahorrar espacio y dinero, se coloca un circuito “bomba de carga” mejor conocido como *Step-up*. Dicho circuito es capaz de levantar el voltaje de alimentación desde un valor mínimo hasta los 5 volts y mantener la salida constante. En este caso se usa una alimentación de dos baterías tamaño AA, las cuales, con química de Níquel Hidruro Metal tienen capacidades aproximadas desde los 2.3Ah. El sistema en modo de trabajo solo requiere de 300 mA. Por lo cual se asegura que el microcontrolador y los sistemas de sensores pueden trabajar durante un aproximado de 3 horas antes de que se requiera de cargar nuevamente las baterías.



Ilustración 47. Conexión de fuentes de voltaje para el sistema [47]

**PIC18F2420/2520/4420/4520 (Industrial)**  
**PIC18LF2420/2520/4420/4520 (Industrial)**

PIC18LF2420/2520/4420/4520 (Industrial)		Standard Operating Conditions (unless otherwise stated) Operating temperature -40°C ≤ TA ≤ +85°C for industrial					
PIC18F2420/2520/4420/4520 (Industrial, Extended)		Standard Operating Conditions (unless otherwise stated) Operating temperature -40°C ≤ TA ≤ +85°C for industrial -40°C ≤ TA ≤ +125°C for extended					
Param No.	Symbol	Characteristic	Min	Typ	Max	Units	Conditions
D001	VDD	<b>Supply Voltage</b>					
		PIC18LF2X2X/4X20	2.0	—	5.5	V	HS, XT, RC and LP Oscillator mode
		PIC18F2X20/4X20	4.2	—	5.5	V	

Ilustración 48. Parte de la tabla de características eléctricas del PIC 18F4520. [48]

#### 4.5 Método de programación usado.

La manera en que el microcontrolador PIC 18F4520 se encuentra programado funciona a manera de una máquina de estados Finita. Es decir, se encuentra leyendo la entrada de caracteres a partir de los sensores colocados en los pines B0 a B2, comprobando el estado de estos cada que termina la tarea asignada cada estado. La forma en que se programa la clasifica como una máquina de estados finita no determinada.

Para demostrarlo se puede observar la ilustración 49, en la cual se muestra los saltos de un estado a otro bajo ciertas condiciones, siendo algunos de estos saltos no ordenados, ya que pueden darse entre el estado 3 y 1 sin la necesidad de pasar por el estado 2.

Para poder entender el diagrama, se muestra solo parte del proceso. En el diagrama de estados, la nomenclatura será la siguiente:

- Estado 1- Etapa de reposo: Se considera etapa de reposo al estado en que las válvulas de gas se encuentran cerradas, y simplemente se espera a que comience a fluir agua a través del calentador.
- Estado 2: Etapa de encendido: Se detecta flujo de agua a través del calentador, con ello se procede a permitir el paso de gas al quemador y se inicia el sistema de ignición, esta etapa termina después de un tiempo establecido de 10 segundos o bien si se llega a detectar flama en el quemador.
- Estado 3: Etapa de control: Encendido el quemador, mientras se mantenga flujo de agua a través del calentador, el sistema regula mediante una válvula actuada el paso de gas hasta alcanzar la temperatura deseada.

Del mismo modo las entradas quedaran acotadas de la siguiente manera:

- A1: Sensor de flujo, flama y sobrecalentamiento desactivados.
- A2: Sensor de flujo de agua activado, sobrecalentamiento y flama desactivados.
- A2': Sensor de flujo de agua activado, sobrecalentamiento y flama desactivados y finaliza el tiempo de espera para encendido de flama.
- A3: Sensores de flujo y flama activados, sobrecalentamiento desactivado.
- A': Sensor de sobrecalentamiento activo. El estado de los demás sensores puede ser cualquiera.

El ejemplo de la máquina de estados se puede observar en la ilustración 49

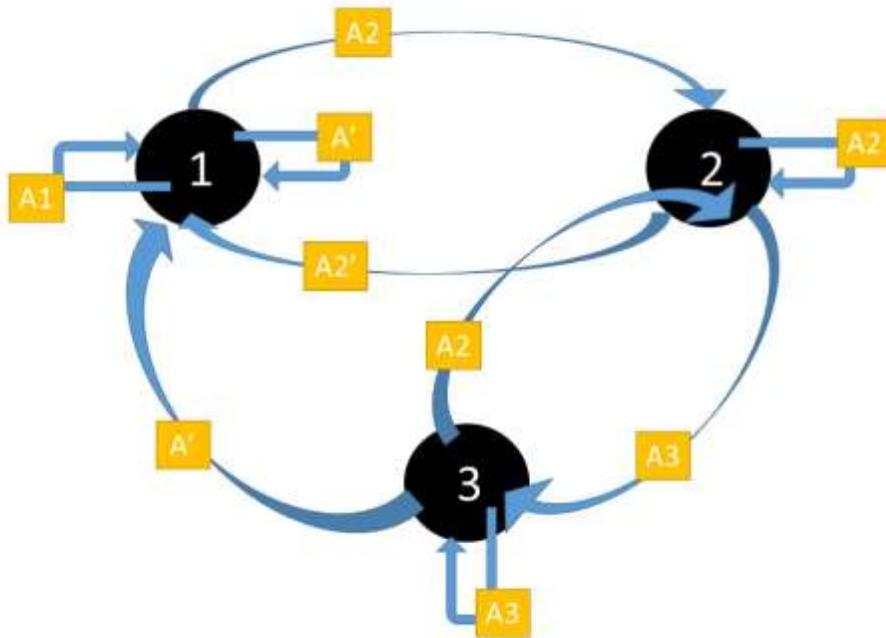


Ilustración 49. Representación de la máquina de estados finita[49]

Es necesario mencionar que en cada estado se engloban gran cantidad de tareas que el microcontrolador realiza, además de ser solo parte del proceso principal del funcionamiento. Como ya se ha mencionado se evita el publicar más detalles sobre el programa para proteger información que resulte vital para el proceso de patente del sistema.

#### 4.6 Pseudocódigo del programa.

Para que el lector de este trabajo pueda visualizar la forma del programa que se carga en el microcontrolador, se colocaran pseudocódigos, de esta manera se logra explicar el trabajo realizado por el microcontrolador sobre la forma en que se ejerce la acción de control.

*Programa: Principal.*

*Variables:* Sensores de estatus

*Algoritmo:*

- 1.-Leer estado de los sensores de estatus
  - 2.-Realizar bucle de acción requerida a cada combinación de valores de sensores.
  - 3.-Finalizado el bucle se lee una vez más el estado de los sensores
  - 4.-Si el estado permanece, el bucle se repite, si cambia se va al bucle correspondiente.
- Fin de programa

*Programa: Bucle de encendido (activo solo cuando existe flujo de agua y sin presencia de flama)*

*Variables:* Sensores de status.:

- 1.-Activación de electroválvulas y se lleva la válvula de control a posición de encendido.
- 2.-Durante 10 intentos con intervalo definido se activa el sistema de chispa

3.-Lectura de sensores de estatus. Si existe presencia de flama, se apaga sistema de chispa y se mantienen válvulas abiertas. Fin de programa

4.-Lectura de sensores de estatus. Si no existe presencia de flama, se cierran electroválvulas de paso y se apaga sistema de chispa. Fin de programa

Fin de programa

*Programa: **Bucle de control** (activo solo cuando existe flujo de agua y presencia de flama)*

*Variables:* Temperatura1, temperatura 2, referencia, valores de sintonización del control (q0, q1, q2), sensores de status.

*Algoritmo:*

1.-Se cargan los valores de control ya calculados y el valor de referencia deseado

2.-Lectura de Temperatura1 (entrada del calentador) y se procesa dato para primer valor de acción de control

3.-Lectura de Temperatura2 (salida del calentador) y aplicación de la señal de control

4.-Lectura de sensores de estatus. Si el valor se mantiene el bucle se repite desde el paso 3.

5.-Si el valor de status cambia finaliza bucle

Fin de programa

*Programa: **Apagado de emergencia** (se activa sensor de sobrecalentamiento)*

*Variables:* Sensores de status.

*Algoritmo:*

1.-Se detecta activación de sobrecalentamiento.

2.-Cierre de válvulas de paso.

3.-Se mantiene este estado mientras siga activo el sensor de sobrecalentamiento.

Fin de programa

Estos sencillos subprogramas engloban las funciones principales que se realizan y hacen posible el que este programa funcione.

## Capítulo 5: Análisis de resultados y conclusiones

Para finalizar, se presentan los datos y análisis de resultados arrojados a lo largo de la implementación de este trabajo.

### 5.1 Captura de datos.

Como se ha mencionado, se requiere de la captura de datos de temperatura para lograr realizar el análisis necesario y obtener la función de transferencia. Para lograr esto, se programa una interfaz gráfica mediante el programa *Labview*, ilustración 51, la cual se conecta al microcontrolador Pic 18f4520 mediante comunicación RS232 gracias al módulo Bluetooth HC05, ilustración 50.



Ilustración 50 Modulo Bluetooth HC-05. [50]

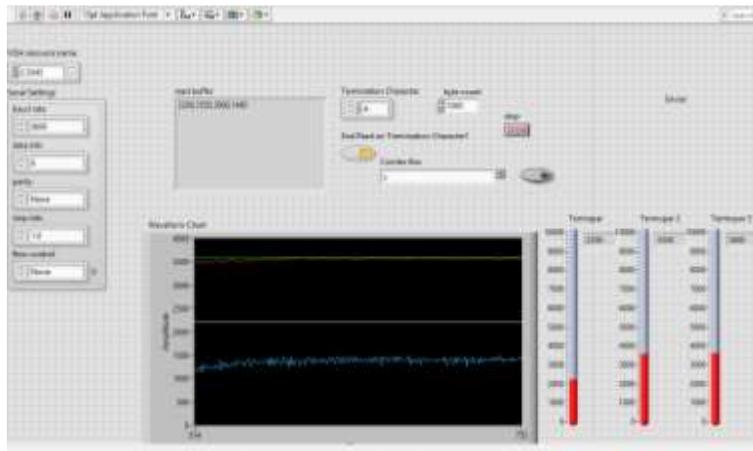


Ilustración 51. Captura de pantalla de la interfaz de captura de datos [51]

Para evitar un volcado de memoria, se capturan doscientos cincuenta muestras

Se realizaron un promedio de diez muestreos de comportamiento, para realizar la sintonización del sistema de control.

### 5.1.2 Prueba del control

Una vez obtenidos los parámetros de programación de un control PID se realiza la prueba del funcionamiento. Una vez que se ha puesto a trabajar se obtiene el comportamiento mostrado en la ilustración 52.

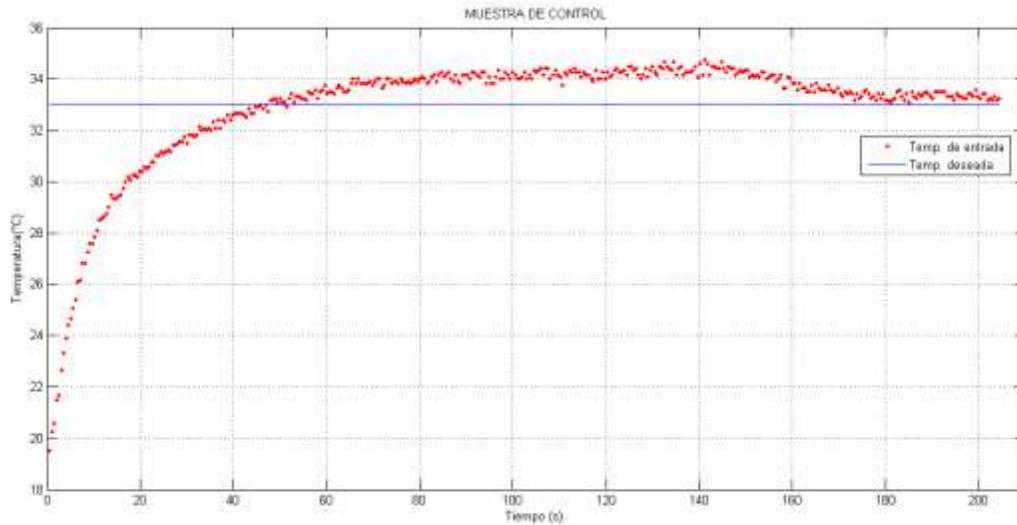


Ilustración 52. Comportamiento del sistema controlado. [52]

En la ilustración 52 se observa el comportamiento del sistema ya controlado. En la imagen es posible distinguir que se presenta y. Para denotar que el sistema tiene un comportamiento de regulación aceptable, se muestra el comportamiento del error en la figura 52.

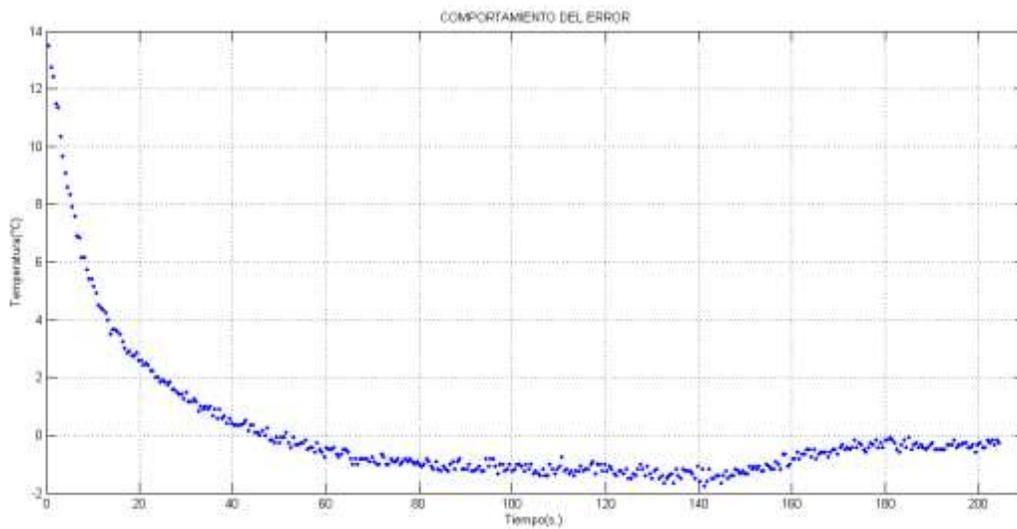


Ilustración 53 Demostración de los valores de error [53]

Como puede observarse en la ilustración 52, el controlador es capaz de mantener la temperatura del agua en un valor cercano al valor deseado, pasando un por ligero sobrepaso no mayor a los 2°C de temperatura, el cual disminuye y se mantiene cercano al valor de temperatura deseada una vez que el sistema llega a su estado estable.

El sistema es capaz de manejar un pequeño rango de temperaturas, el cual no es fijo, ya que depende del flujo de agua que pasa a través del calentador. Para este caso la prueba se realiza con un flujo de cuatro litros por minuto, y se logra obtener distintas temperaturas deseadas. Esto puede observarse en la figura 54,

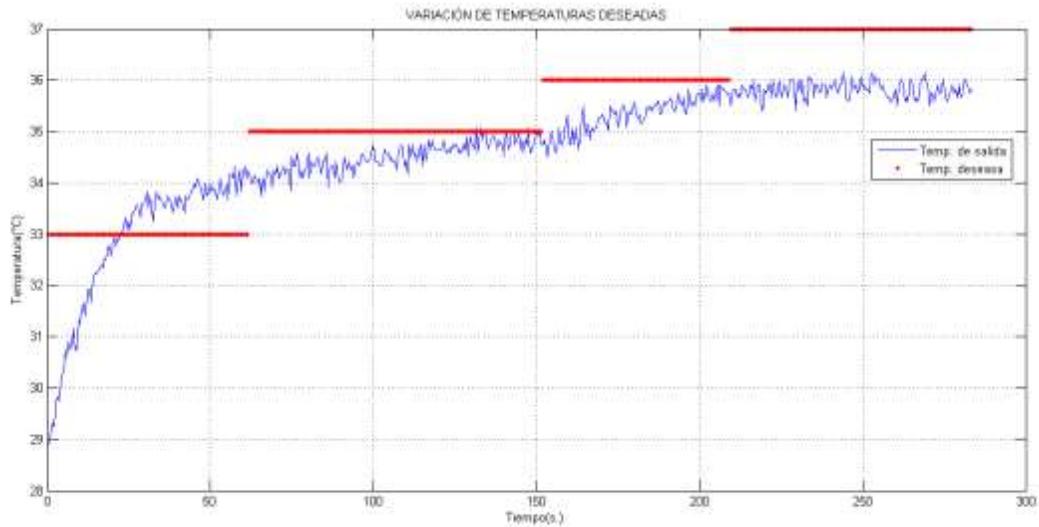


Ilustración 54 Muestra de control a diversas temperaturas[54]

Una limitante del sistema es que si se supera la capacidad de calentamiento máxima o mínima el control intentara alcanzar los valores manteniendo el valor del pulso de control en lo máximo o mínimo establecidos. Esto puede notarse en la prueba mostrada en la ilustración 55

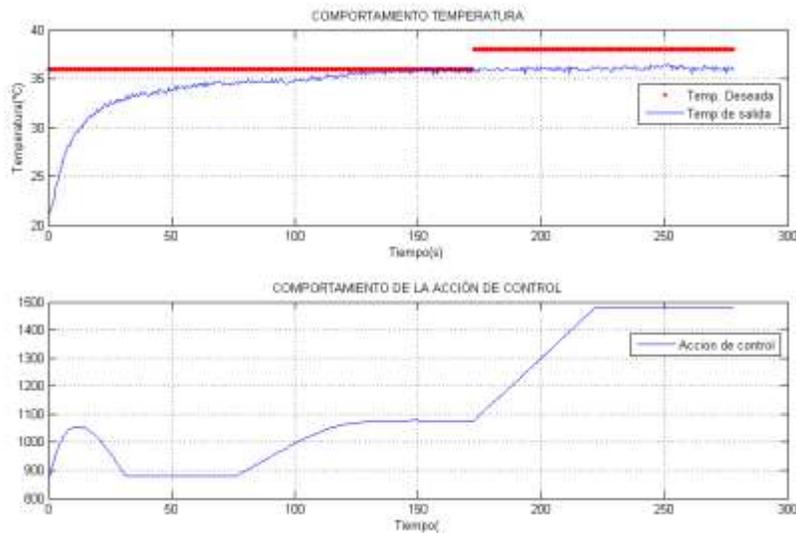


Ilustración 55. Comportamiento de la acción de control[55]

### 5.1.2 Prueba con la terminal.

Una vez demostrado la eficacia del controlador, se procede a probar el funcionamiento del sistema en conjunto con la terminal remota, la cual tiene la función de mostrar al usuario los valores de temperatura presentes en la regadera, además de permitir que se modifique el valor de temperatura deseada.

Para ello, nuestra terminal cuenta con su propio termopar, el cual es el encargado de monitorear la temperatura, además de que se muestra el valor de temperatura medida y la temperatura deseada manejada en el boiler. Mediante el uso de un teclado de membrana de 4\*4, el usuario es capaz de modificar el valor de temperatura deseada y enviarlo al boiler para que este realice las acciones de control necesarias para llegar al nuevo ajuste de temperatura deseado. La ilustración 56 muestra el prototipo de la terminal trabajando.



*Ilustración 56. Terminal en funcionamiento [56]*

Además, gracias a la pantalla LCD de 16X2, el usuario será capaz de observar si existe algún problema en el calentador, es decir, si no se logra un encendido exitoso del quemador, el sistema mostrara en pantalla el texto “ERROR DE ENCENDIDO”.

### 5.2 Ahorros energéticos.

Gracias al control agregado a este calentador, se logra tener un ahorro energético en comparación con el uso que se da a los calentadores hoy en día. Esto es debido a que se acostumbra tomar el agua a temperaturas mayores a las que se usa. Por ello, esta parte de la tesis presenta un análisis sobre los ahorros económicos que el uso de este sistema puede entregar

### **5.2.1 Pérdidas de energía en los sistemas.**

Las pérdidas de energía en los sistemas de calentamiento de agua pueden ocurrir por diversos factores como pueden ser:

- Elección incorrecta de materiales.
- Diseño deficiente del sistema.
- Sistema de control deficiente.
- Combustión incompleta.

y como consecuencia de esto los costos de operación de nuestros sistemas se incrementan.

### **5.2.2 Elección incorrecta de material.**

En la selección de materiales puede que no se haya elegido el de mayor capacidad térmica conductiva, esto se ve reflejado en un tiempo de respuesta mayor en el sistema por lo tanto requerirá una mayor cantidad de energía para llegar a un estado estable.

De igual manera se debe tener cuidado al elegir un material aislante adecuado para así poder evitar las pérdidas de calor hacia el medio ambiente.

### **5.2.3 Diseño deficiente del sistema.**

Al momento de diseñar se debe buscar la optimización de la transferencia de calor entre la fuente de energía y el sistema de calentamiento para poder aprovechar de una mejor manera el combustible que se está utilizando. Esto en ocasiones no es posible por limitantes en los medios de manufactura existentes.

### **5.2.4 Sistema de control deficiente.**

Este tipo de pérdidas se deben a que el sistema de control entrega más, o menos energía de la que el usuario requiere, por lo tanto, las variaciones entre la temperatura deseada y la temperatura alcanzada por el sistema pueden llegar a ser considerables.

### **5.2.5 Combustión incompleta.**

Las pérdidas por combustión incompleta se deben a que no se aprovecha al 100% el poder calorífico del combustible por lo cual existe un mayor gasto de combustible para lograr el valor de temperatura deseada en el sistema.

### **5.2.6 Pérdidas por mezcladora.**

La mayoría de los calentadores que actualmente existen en el mercado manejan un sistema de control *on-off* el cual puede ser activado por el flujo de agua o por la disminución de temperatura en el depósito del calentador según sea el caso. Sin embargo, al momento en que existe una demanda de agua caliente en el sistema, esta es obtenida del calentador a una temperatura mayor por lo cual el usuario se ve en la necesidad de combinar el agua que recibe a una temperatura mayor con agua a temperatura ambiente. Por lo cual las pérdidas serán debidas a un sistema de control deficiente, teniendo como un subsistema de control auxiliar una “cámara de mezclado”. Véase ilustración 57.



Ilustración 57 Diagrama de cámara de mezclado [57]

### 5.2.7 Suministro de calor.

Para este caso se tomará la transferencia de calor como un diagrama de caja negra en donde entrara agua a una temperatura  $T_{amb}$  y saldrá a una temperatura  $T_1$  utilizando y una capacidad térmica específica  $c = 4.18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  esto se tomara así debido a que no existe cambio de fase en ningún punto de nuestro proceso y al ser agua lo podemos considerar como un fluido incompresible. Y nuestro suministro de calor será  $\dot{Q}_{ent}$ .

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{m}c(T_1 - T_{amb}) \quad (33)$$

De donde  $\dot{m}$  es el flujo másico y ésta dado en kg/min el cual convertiremos a flujo volumétrico tomando en cuenta que  $1\text{m}^3$  de agua es equivalente a 1000 l y que su densidad es de  $1000 \text{ kg/m}^3$  por lo tanto tenemos que:

$$\rho_{agua} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \quad (34)$$

y se tomara un flujo volumétrico  $\dot{q}$  dado como dato técnico del fabricante de  $4 \text{ l/min}$  (para la Ciudad de México). Para esto se realiza la multiplicación algebraica del valor de este flujo volumétrico entre la densidad obtenida arriba.

$$\dot{q} \cdot \rho_{agua} = \dot{m} = \frac{\text{l}}{\text{min}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{l}} = \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad (35)$$

y se tendrá que el flujo másico es de  $4 \text{ kg/min}$ .

### 5.2.8 Poder calorífico del gas LP.

El denominado Gas Licuado de Petróleo está compuesto principalmente por los siguientes hidrocarburos o mezclas de ellos: Propano, Propileno, Butano (normal e isobutano) y Butilenos.

Este combustible es comúnmente utilizado debido a que bajo presiones moderadas y temperaturas ambiente puede ser almacenado y transportado en forma líquida, pero cuando es liberado a presión atmosférica y temperatura relativamente baja, se evapora y puede ser utilizado como gas. Estas propiedades permiten que este gas pueda ser almacenado en recipientes del orden de un millón de litros y pueda ser embotellado en

recipientes pequeños de 4, 6, 10, 20, 30 y 45 kilogramos para facilitar su transporte, distribución y aprovechamiento para aplicaciones domésticas, comerciales e industriales.

En este caso el gas es vendido por Pemex en una relación de 60% Propano y 40% Butano y una pequeña parte de Etil-mercaptano como odorizante la cual para fines prácticos no se toma en cuenta para cálculos del poder calorífico de este.

También tenemos el dato del poder calorífico de el Propano y el Butano obtenidos de una revista especializada en Gas LP.

TABLA 17 PODER CALORIFICO EXPRESADO EN SISTEMA INGLES

	Propano	Butano
Valor calorífico @ 15.5 °C	91,502 BTU/Gal.	102,032 BTU/Gal.

Tomando en cuenta que 1 BTU equivale a 1.055 kJ y 1 galón americano equivale a 3.785 l se multiplican los valores caloríficos por un factor de conversión de:

$$\frac{1.055 \text{ kJ}}{1 \text{ BTU}} \cdot \frac{1 \text{ Gal}}{3.785 \text{ l}} = 0.278 \frac{\text{kJ}(\text{Gal})}{\text{l}(\text{BTU})} \quad (36)$$

TABLA 18 PODER CALORIFICO EXPRESADO EN SISTEMA INTERNACIONAL

	Propano	Butano
Valor calorífico @ 15.5 °C	25,437.55 kJ/l.	28,364.89 kJ/l.

De esta manera se puede obtener el poder calorífico del Gas LP tomando en consideración lo siguiente:

Componente	Porcentaje %	Poder calorífico kJ/l
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	60	25,437.55
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	40	28,364.89

$$PC_{LP} = 0.6 \cdot 25,437.55 + 0.4 \cdot 28,364.89 \quad (37)$$

$$PC_{LP} = 26,608.48 \frac{\text{kJ}}{\text{l}} \quad (38)$$

### 5.3 Estadísticas de Temperaturas y Perdidas.

Se obtuvieron muestras temperaturas deseadas y máximas de las cuales las personas tomaban duchas, para esto se tomaron 27 muestras cuyo resultado se muestra a continuación en la figura 58

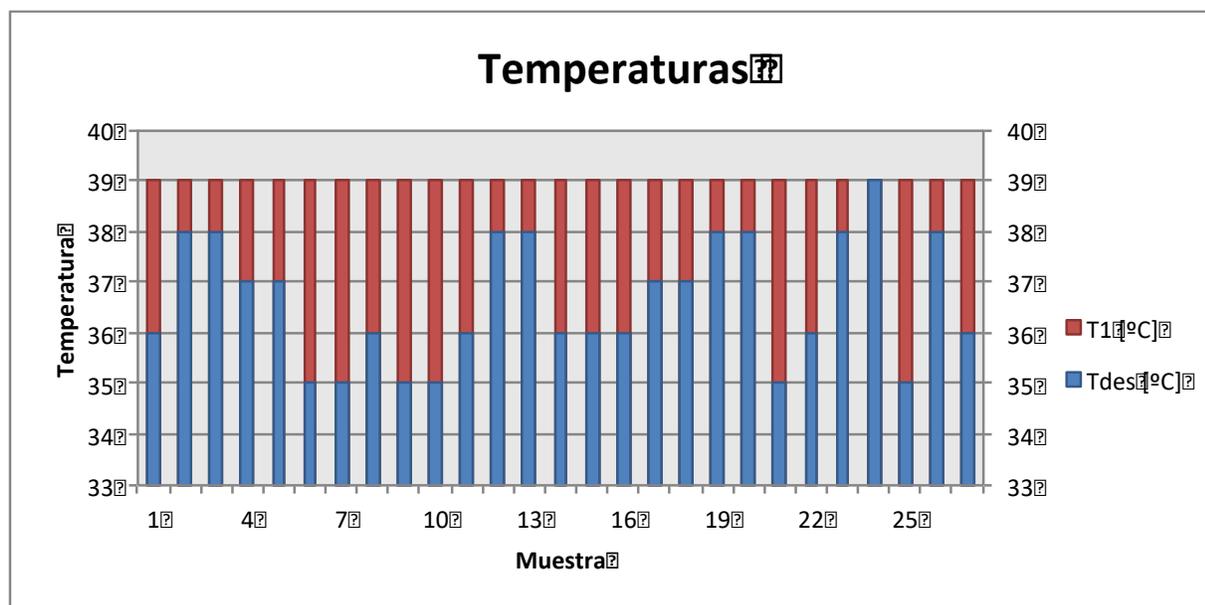


Ilustración 58. Temperatura máxima del calentador contra temperatura de uso [58]

Al igual que para el caso de transferencia de calor en el calentador, existirá una transferencia de calor en la mezcladora, el cual ira del flujo másico de mayor temperatura al flujo de menor temperatura, para esto se tiene que:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (39)$$

De la ecuación 39 se sabe qué:

$\dot{m}_1$ : es el flujo proveniente del calentador instantáneo.

$\dot{m}_2$ : es un flujo proveniente del depósito general de agua.

$\dot{m}_3$ : es la suma de los dos flujos anteriores el cual saldrá a la temperatura deseada ( $T_{des}$ ) por el usuario.

Para lo cual se tendrá una pérdida de calor  $\dot{Q}_{perd}$  la cual considerara el flujo másico 1 ( $\dot{m}_1$ ) que es de 4 kg/min. A partir de esta pérdida de calor se tomará en cuenta en cuenta que el calor que cede el flujo másico 1 será el mismo que ganará el flujo másico 2 ( $\dot{m}_2$ ). Por lo tanto, se tendrá que:

$$\dot{Q}_{perd} = \dot{m}_1 \cdot c \cdot (T_{des} - T_1) \quad (40)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 \cdot c \cdot (T_{des} - T_{amb}) \quad (41)$$

$$-\dot{Q}_{perd} = \dot{Q}_2 \quad (42)$$

Las pérdidas de calor en la mezcladora pueden ser observadas en el siguiente grafico el cual muestra la cantidad de calor que cede el flujo másico 1 por minuto expresada en kJ/min, véase ilustración 59.

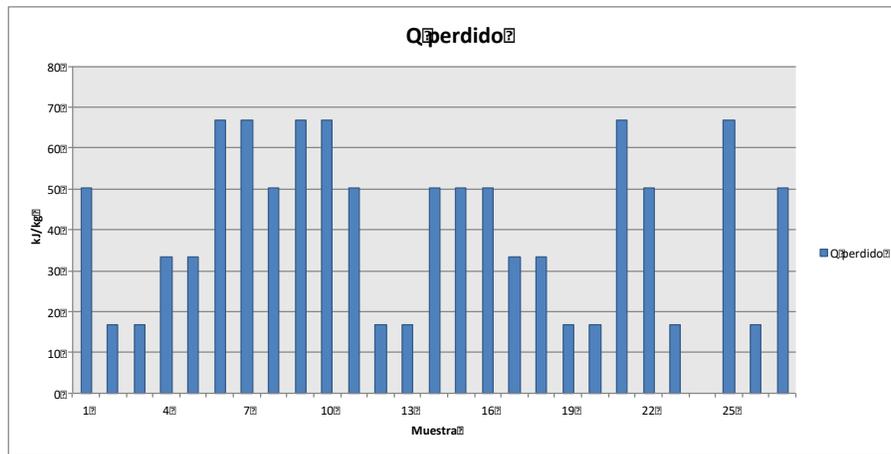


Ilustración 59. Cuantificación del calor perdido por enfriar el agua [59]

### 5.3.1 Cuantificación de ahorros.

Los ahorros se deberán a la supresión de pérdidas en la mezcladora y a un sistema de control más eficiente. Para poder llevar a cabo estas cuantificaciones se tomaron en consideración temperaturas ambiente del año 2016 en la Ciudad de México.

Temperaturas en la Ciudad de México 2016												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Mínima	7.5	8.1	10.8	12.9	14.1	13.3	13.1	13.6	13.7	12.2	10	9.9
Media	14.1	15.8	17.4	20.1	20.9	18.9	18.8	19.2	18.9	17.9	15.7	16.6
Máxima	20.7	23.5	24.1	27.2	27.8	24.4	24.5	24.8	24.1	23.5	21.3	23.3

Posteriormente se obtuvo la cantidad de calor suministrada por el sistema tomando en cuenta la temperatura final como T1 y se procedió a hacer lo mismo tomando la temperatura final como  $T_{Des}$ . Se obtuvo un  $\dot{Q}_{ent}$  y un  $\dot{Q}_{des}$ .

Se tendrá en cuenta un porcentaje de ahorro el cual se obtendrá de la siguiente manera:

$$\%A = \frac{|\dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{des}|}{\dot{Q}_{ent}} \times 100 \quad (42)$$

Después de haber obtenido los porcentajes de ahorro con las distintas temperaturas a lo largo del año se procede a analizar los ahorros obtenidos con las temperaturas mínimas, puesto que estas son más representativas debido a que la mayoría de las personas consultadas toman baños en la mañana o en la noche.

Se obtuvo un promedio anual por cada muestra, observándose ahorros que van desde el 4 al 17% teniendo un promedio de 10%, véase ilustración 60.

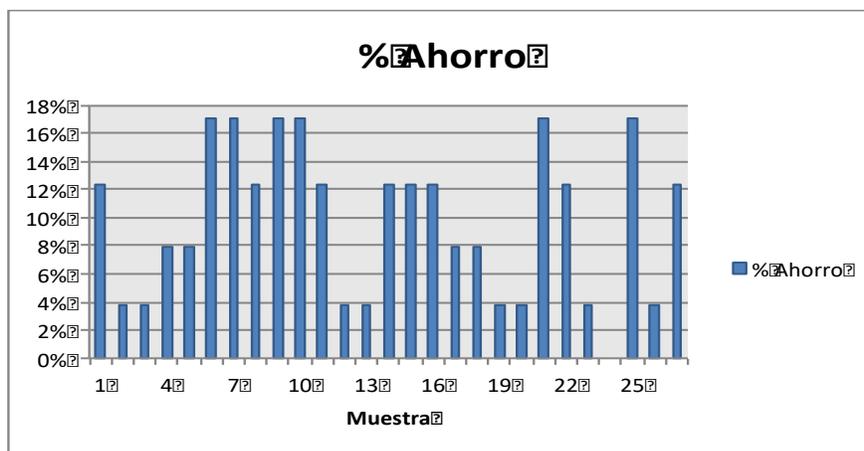


Ilustración 60. Aproximación de ahorro hipotéticos de este sistema contra los ya instalados [60]

### 5.3.2 Ahorro en combustible.

El ahorro en combustible dependerá de los hábitos actuales de baño del usuario.

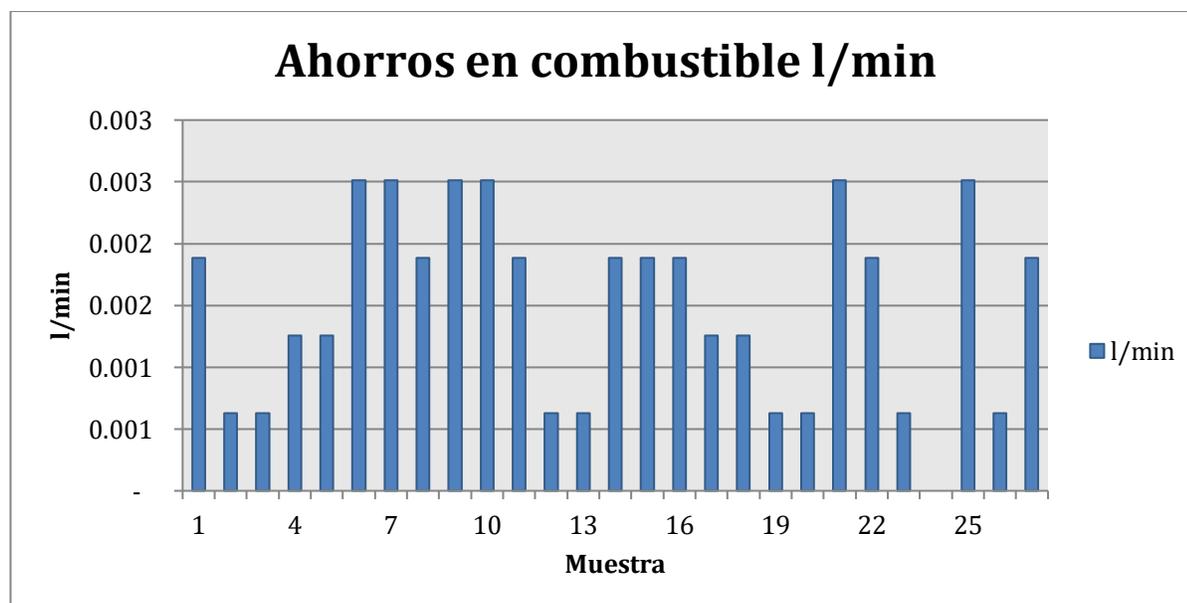


Ilustración 61. Aproximación del ahorro de gas por gasto de agua [61]

Se pueden observar consumos muy bajos, esto se debe a que no existe gran diferencia entre la temperatura deseada por el usuario y la temperatura de salida en regadera en comparación a otros usuarios. Obteniendo un ahorro promedio de 0.001 L por minuto de baño, ilustración 61.

### 5.3.3 Ahorros monetarios.

Actualmente los precios en los combustibles son variables por lo que para la cuantificación monetaria de ahorros se tomó en cuenta el precio del gas LP al día 28 de agosto de 2017 tomada de la Comisión Reguladora de Energía el cual oscila entre los \$6.95 y los \$8.58 dependiendo del permisionario en la Ciudad de México, para fines prácticos se toma un valor promedio el cual es de \$8.27.

Esto puede observarse de manera gráfica en la ilustración 62.

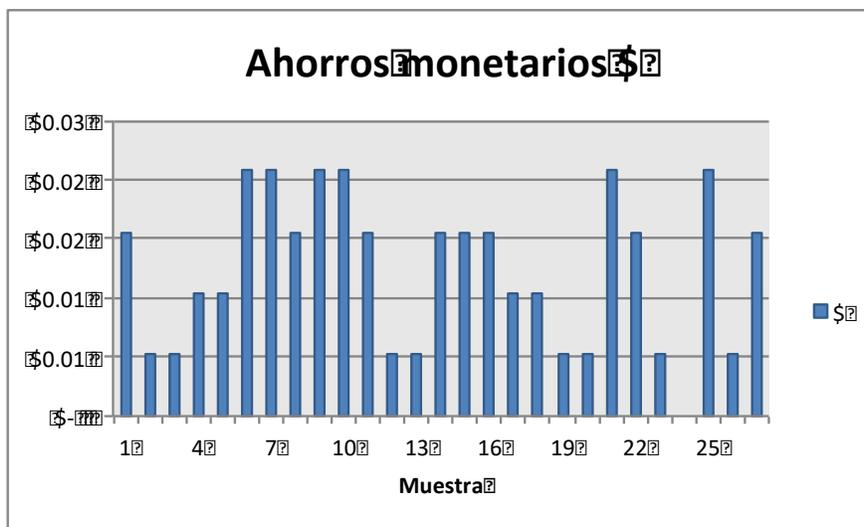


Ilustración 62. Aproximación de ahorros monetarios dados por este sistema [62]

Los ahorros varían en un rango de \$0.01 hasta \$0.02 por minuto de baño.

### 5.4 Conclusiones sobre el ahorro de gas

Se puede observar que existen ahorros monetarios tomando en cuenta el calor efectivamente aprovechado, sin embargo, se debe tomar en cuenta que existen variaciones en el flujo de gas lo cual provoca lapsos de combustión incompleta por lo que se podría generar un costo por comodidad. De igual manera la eficiencia del calentador disminuye con el paso del tiempo por la acumulación de los sedimentos en el serpentín y/o depósitos.

Para tener datos más precisos del ahorro de gas que nuestro sistema puede aportar debe ponerse a prueba junto con uno ya comercial de características similares en un ambiente controlado y llevar un registro sobre la cantidad de combustible utilizado. Esta prueba puede realizarse una vez que se tenga un modelo de producto final listo para lanzarse al mercado.

### 5.5 Conclusiones generales

Se logra un proceso de control que, agregado a este sistema puede ofrecer seguridad y confort al usuario. Queda trabajo estético y de miniaturización de los elementos de la electrónica, pero este prototipo ofrece un acercamiento a lo que será un producto final apto para el mercado.

## Bibliografía:

1. HALL, Fred. *“Plomería. Sistemas de suministro de agua caliente y calefacción.”* Limusa. 1998. México. 178 pág. ISBN: 968-18-5281-8.
2. WOLF, Stanley, et al. *“Guía para mediciones Electrónicas y Practicas de laboratorio.”* Prentice hall. 1992. México. 584 pág. ISBN: 968-880-224-7.
3. Enciclopedia de Clasificaciones. (2016). Tipos de baterías. Recuperado de: <https://www.tiposde.org/cotidianos/420-tipos-de-baterias>.
4. SANCHEZ, Julio, et al. *“Microcontrollers. High Performance Systems and programing.”* CRC Press Taylor and Francis Group. 2014. U.S.A. 674 pág. ISBN: 978-1-4665-6665-1.
5. FRANKLIN, Gene F., Powell, David J. *“Feedback Control of dynamic systems”*. Editorial Addison-Wesley, 3a ed.
6. FRANKLIN, Gene F., Powell, David J. *“Digital Control of Dynamic Systems”*. Editorial Addison-Wesley, 2a ed.
7. OGATA, Katsuhito. *“Sistemas de Control en Tiempo Discreto”*. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana. 2ª ed. 745
8. OGATA, Katsuhiko. *“Ingeniería de control moderna. 1,2,3,4”*. 3a. edición México Prentice-Hall, 1998.
9. FRANKLIN, Gene F., et al., *“Digital Control of Dynamic Systems 5”*. 3a. edición. Barcelona España. Marcombo, 1993. 732 pág. ISBN: 84-267-0911-7
10. CREUS, Antonio Sole, *“Instrumentación Industrial”*. 3a. edición. Barcelona España. Marcombo, 1993. 732 pág. ISBN: 84-267-0911-7
11. *“La historia del calentador de agua y sus tipos.”* [En línea]. [Fecha de consulta: 24 Febrero 2016]. Disponible en Web: <http://www.boiler.mx/historia-calentador-agua-sus-tipos.htm>
12. *“Manual de calentador de paso”* [En línea]. [Fecha de consulta: 23 marzo 2016]. Disponible en Web: <http://globalsolar.com.mx/documentos/Manual-Calentador-de-Paso.pdf>
13. *“Brújula de compra de Profeco”* [En línea]. [Fecha de consulta: 23 marzo 2016]. Disponible en Web: [https://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj\\_2006/bol27\\_calentadores.asp](https://www.profeco.gob.mx/encuesta/brujula/bruj_2006/bol27_calentadores.asp)
14. *“¿Qué son y cómo funcionan los calentadores solares?”* [En línea] [Fecha de consulta: 4 abril de 2016]. Disponible en Web: <http://www.aerosolarmexico.com/productos/calentadores-solares-domesticos/como-funcionan/>

15. “Cómo elegir el calentador de gas adecuado para el hogar” [En línea] [Fecha de consulta: 4 Abril de 2016]. Disponible en Web: <http://www.materialesdefonteria.com/como-elegir-el-calentador-de-gas-adecuado-para-el-hogar/>
16. “El problema de los calentadores con hidrogenerador” [En línea] [Fecha de consulta: 4 Abril de 2016]. Disponible en Web: <http://fergosol.blogspot.mx/2010/08/el-problema-de-los-calentadores-con.html>
17. American Burn Association. “Scald Injury Prevention. Educator’s guide” [En línea] [Fecha de consulta: 26 Mayo de 2016]. Disponible en Web: <http://www.ameriburn.org/Preven/ScaldInjuryEducator’sGuide.pdf>
18. Centro Nacional para la Prevención de Accidentes. “Prevención de accidentes en el hogar. Guía para la población” [En línea] [Fecha de consulta: 26 Mayo de 2016]. Disponible en Web: <http://conapra.salud.gob.mx/Programas/Documentos/Prevencion Accidentes Hogar Guia Poblacion.pdf>
19. American Burn Association. “Scald Injury Prevention.” [Power Point] [Fecha de consulta: 26 Mayo de 2016]. Extraído de Web: [www.ameriburn.org/Preven/PowerPoint/ScaldInjury.ppt](http://www.ameriburn.org/Preven/PowerPoint/ScaldInjury.ppt)
20. JM Industrial. “Uniones para termopares.” [PDF En línea] [Fecha de consulta: 27 Septiembre de 2016]. Extraído de Web: [https://www.jmi.com.mx/documento\\_literatura/union\\_termopares.pdf](https://www.jmi.com.mx/documento_literatura/union_termopares.pdf)
21. “Baterías de NiCd y NiMh” [Disponible En línea] [Fecha de consulta: 27 Septiembre de 2016]. Extraído de Web: <http://www.icmm.csic.es/jaalonso/velec/baterias/bateria.htm>
22. PEMEX. “Hoja de Datos de seguridad para sustancias Químicas” [Disponible En línea] [Fecha de consulta: 27 de Septiembre de 2017]. Extraído de Web: <http://www.icmm.csic.es/jaalonso/velec/baterias/bateria.htm>
23. BUDYNAS, Richard G., et al. “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley” 9a. edición. México. Mc Graw Hill, 2012. 1068 pág. ISBN: 978-607-15-0771-6
24. “Métodos de diseño” [Disponible En línea] [Fecha de consulta: 28 Octubre de 2017]. Extraído de Web: <http://www.ingenieria.unam.mx/~guiaindustrial/disenoinfo/3/6.htm>

## Referencias de imágenes:

- [1] “Edwin Ruud creador del primer calentador de agua patentado”. *LA HISTORIA DEL CALENTADOR DE AGUA Y SUS TIPOS* [en línea] Fecha de consulta: Septiembre ,2015. Disponible en web: <http://www.h2otek.com/blog/la-historia-del-calentador-de-agua-y-sus-tipos>
- [2] “Calentador de depósito marca Calorex”. CALOREX [en línea] Fecha de consulta: 29 febrero 2016. Disponible en web: [http://ferrecaballero.com.mx/429-large\\_default/calentador-calorex-de-deposito-g-60-200-lts.jpg](http://ferrecaballero.com.mx/429-large_default/calentador-calorex-de-deposito-g-60-200-lts.jpg)
- [3] “Funcionamiento del funcionamiento de un termostato”. HALL, Fred. *Plomería. Sistemas de suministro de agua caliente y calefacción*. Limusa. 1998. México, D.F.178 pag. ISBN: 968-18-5281-8.
- [4] “Calentador de paso de rápida recuperación” CALOREX [en línea] Fecha de consulta: 21 marzo 2016. Disponible en web: <http://tiendacalorex.com/uploads/products/images/14508253944672.png>
- [5] “Calentador de paso instantáneo” BOSCH [en línea] Fecha de consulta: 21 marzo 2016. Disponible en web: [http://blog.homedepot.com.mx/wpcontent/uploads/2014/11/instantaneo\\_featured.jpg](http://blog.homedepot.com.mx/wpcontent/uploads/2014/11/instantaneo_featured.jpg)
- [6] “Funcionamiento de un calentador de gas de paso instantáneo” HALL, Fred. *Plomería. Sistemas de suministro de agua caliente y calefacción*. Limusa. 1998. México, D.F.178 pag.. ISBN: 968-18-5281-8.
- [7] “Funcionamiento de un calentador solar no presurizado” [en línea] Fecha de consulta: 7 abril 2016. Disponible en web: [http://www.aerosolarmexico.com/assets/img/funcionamiento\\_calentador\\_no\\_presurizado.jpg](http://www.aerosolarmexico.com/assets/img/funcionamiento_calentador_no_presurizado.jpg)
- [8] “Tubo de vidrio al vacío para calentador solar no presurizado” [en línea] Fecha de consulta: 7 abril 2016. Disponible en web: [http://www.aerosolarmexico.com/assets/img/tubo\\_vidrio\\_partes.jpg](http://www.aerosolarmexico.com/assets/img/tubo_vidrio_partes.jpg)
- [9] “Funcionamiento de un calentador solar presurizado” [en línea] Fecha de consulta: 7 abril 2016. Disponible en web: [http://www.aerosolarmexico.com/assets/img/funcionamiento\\_calentador\\_presurizado.jpg](http://www.aerosolarmexico.com/assets/img/funcionamiento_calentador_presurizado.jpg)
- [10] “Tubo de vidrio tipo heat pipe” [en línea] Fecha de consulta: 7 abril 2016. Disponible en web: <http://www.e-etg.com/images/Tubo%203.png>
- [11-15] “Tipos de encendido de flama”. HALL, Fred. *Plomería. Sistemas de suministro de agua caliente y calefacción*. Limusa. 1998. México, D.F.178 pag.. ISBN: 968-18-5281-8.
- [16] “Ejemplo de una escaldadura” [en línea] Fecha de consulta: 26 de mayo de 2016. Disponible en web: <http://remediospara.com/Thumbnail/phpThumb.php?src=/fotos/escaldadura.jpg&w=300>

- [17] Diagrama de procesos del controlador. Realizado mediante autoformas de microsoft
- [18] *“Grafica de voltaje contra temperatura en distintos modelos de termopares con temperatura de referencia a 0°C”* [en línea] Fecha de consulta: 29 de agosto de 2017. Disponible en web:  
<http://www.hombreencamino.com/ciencia/termopares/>
- [19] *“Circuito ejemplo LT1025”* [en línea] Fecha de consulta: 11 de junio de 2017. Disponible en web:  
<http://cds.linear.com/image/3375.png>
- [20] *“Ejemplo de implementación del circuito MAX6675”*. Obtenida de captura de pantalla de la hoja de datos.
- [21] *“Sensor RTD”* [en línea] Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2016. Disponible en web:  
<http://www.correge.fr/ftp/image/502.jpg>
- [22] *“Diferentes tipos de sensor NTC”* [en línea] Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2016. Disponible en web:  
<http://sc02.alicdn.com/kf/HTB11ajeMVXXXXcCXVXXq6xXFXXXT/Various-types-of-NTC-bare-chips-thermistors.jpg>
- [23] *“Curva de comportamiento de un resistor NTC”* [en línea] Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2016. Disponible en web:  
<http://jordimarch.eresmas.net/arkania/articles/overclocking/termistores/termist1.jpg>
- [24] *“Sensor de temperatura Lm35”* [en línea] Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2016. Disponible en web:  
<https://pedroplipi.files.wordpress.com/2015/01/sensor-de-temperatura.png?w=648>
- [25] *“Ejemplo de funcionamiento de pirómetro de radiación”* [en línea] Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2016. Disponible en web:  
<http://www.sapiensman.com/tecnoficio/optica/images/pirometro%20tipo%20filamento.jpg>
- [26] *“Corte de sección de una válvula de esfera”* [en línea] Fecha de consulta: 27 de septiembre de 2016. Disponible en web:  
<http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/valvula-gas-161301.html>
- [27] *“Válvula de mariposa”* [en línea] Fecha de consulta: 27 de septiembre de 2016. Disponible en web:  
<http://www.valvulasymedidores.com>
- [28] *“Electroválvula”* [en línea] Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2016. Disponible en web:  
[http://www.valveco.com.co/p/-valvulas-solenoide-danfoss\\_3766477/valvulas-de-solenoide-danfoss-en-bronce-laton-ev220b--\\_3778555](http://www.valveco.com.co/p/-valvulas-solenoide-danfoss_3766477/valvulas-de-solenoide-danfoss-en-bronce-laton-ev220b--_3778555)

[29] “Corte transversal de una válvula de globo (izquierda), Válvula de globo (derecha)” [en línea] Fecha de consulta: 27 de septiembre de 2016. Disponible en web: <http://www.tuvacol.com/valvulas/valvulas-de-globo/>

[30] “Válvula de compuerta” [en línea] Fecha de consulta: 27 de septiembre de 2016. Disponible en web: <http://www.hidraulicaydrenaje.com.mx/images/imagenes%20nuevas%20jpg/>

[31] “Corte transversal de una válvula de aguja, catalogo Hoke de válvulas de aguja” [en línea] Fecha de consulta: 27 de septiembre de 2016. Disponible en web: [http://www.hoke.com/catalogs/catalog\\_79352spa\\_hoke\\_needle\\_valves\\_10.15.13.pdf](http://www.hoke.com/catalogs/catalog_79352spa_hoke_needle_valves_10.15.13.pdf)

[32] “Modelo de termopar tipo K usado en el proyecto” [en línea] Fecha de consulta: 8 de marzo de 2017. Disponible en web: [http://img.dxcdn.com/productimages/sku\\_345789\\_2.jpg](http://img.dxcdn.com/productimages/sku_345789_2.jpg)

[33] “Modelo por computadora del adaptador”. Realizado en software NX.

[34] “Tabla de machuelos para cuerda métrica.” [en línea] Fecha de consulta: 11 de septiembre de 2017. Disponible en web: [https://www.gfii.com/images/Greenfield\\_Tap\\_Drill\\_Recommendations.pdf](https://www.gfii.com/images/Greenfield_Tap_Drill_Recommendations.pdf)

[35] “Boril de HSS de 1/4 ” [en línea] Fecha de consulta: 11 de septiembre de 2017. Disponible en web: [https://http2.mlstatic.com/cortador-boril-en-acero-al-cobalto-14-x-2-12-pulgadas-hss-D\\_NQ\\_NP\\_426311-MLM20535840932\\_012016-F.jpg](https://http2.mlstatic.com/cortador-boril-en-acero-al-cobalto-14-x-2-12-pulgadas-hss-D_NQ_NP_426311-MLM20535840932_012016-F.jpg)

[36] “Piezas redondas antes del barrenado.” Fotografía tomada en el Laboratorio de manufactura de la facultad de Ingeniería.

[37] “Proceso de barrenado de las piezas en torno.” Fotografía tomada en el Laboratorio de manufactura de la facultad de Ingeniería.

[38] “Cortador vertical recto de HSS de 1/4 ”. [en línea] Fecha de consulta: 11 de septiembre de 2017. Disponible en web: [https://http2.mlstatic.com/cortador-vertical-endmill-14-hss-alta-velocidad-4-filos-D\\_NQ\\_NP\\_714121-MLM20714660747\\_052016-F.jpg](https://http2.mlstatic.com/cortador-vertical-endmill-14-hss-alta-velocidad-4-filos-D_NQ_NP_714121-MLM20714660747_052016-F.jpg)

[39] “Proceso de soldadura de punto.” Fotografía tomada en el Laboratorio de manufactura de la facultad de Ingeniería.

[40] “Diagrama representativo del sistema de control.” Realizado mediante autoformas de Office.

[41] “Diagrama de bloques de un sistema de control digital.” Realizado mediante autoformas de Office.

[42] “Comparación entre muestras y señal filtrada” Realizado en software MATLAB.

- [43] “Ejemplo de obtención del valor de  $Tao$ ” Realizado en software MATLAB.
- [44] “Comparación de la estimación con los datos obtenidos” Realizado en software MATLAB.
- [45] “Demostración de la obtención de parámetros mediante regresión logarítmica” Realizado en software MATLAB.
- [46] “Implementación del método grafico Ziegler Nichols” Realizado mediante Paint.
- [47] “Conexión de fuentes de voltaje para el sistema” Realizado mediante autoformas de Office.
- [48] “Características de alimentación PIC 18F4X20.” Obtenida de captura de pantalla de la hoja de datos.
- [49] “Representación de la máquina de estados finita” Realizado en software MATLAB mediante los datos obtenidos por la ingterfaz.
- [50] “Modulo Bluetooth Hc-05” [en línea] Fecha de consulta: 29 de agosto de 2017. Disponible en web: <http://www.continentalee.com.sg/bluetooth-hc-05>
- [51] “Captura de pantalla de la interfaz de captura de datos.” Realizada directo de la interfaz de Labview
- [52] “Comportamiento del sistema controlado.” Realizado en software MATLAB mediante los datos obtenidos por la ingterfaz.
- [53] “Demostración de los valores de error.” Realizado en software MATLAB mediante los datos obtenidos por la ingterfaz.
- [54] “Muestra de control a diversas temperaturas” Realizado en software MATLAB mediante los datos obtenidos por la ingterfaz.
- [55] “Comportamiento de la señal de control” Realizado en software MATLAB mediante los datos obtenidos por la ingterfaz.
- [56] “Terminal en funcionamiento.” Fotografía tomada en el Laboratorio de manufactura de la facultad de Ingeniería.
- [57] “Dibujo esquemático de una cámara de mezclado.” [en línea] Fecha de consulta: 8 de marzo de 2017. Disponible en web: <http://grupo1mi131dispositivosfeee.blogspot.mx/2013/06/camara-de-mezcla.html>
- [58] “Temperatura máxima del calentador contra temperatura de uso.” Realizado en Microsoft Excel.
- [59] “Cuantificación de calor perdido por enfriamiento del agua.” Realizado en Microsoft Excel.
- [60] “Aproximación del ahorro hipotetico del sistema con los ya instalados.” Realizado en Microsoft Excel.
- [61] “Aproximación del ahorro de gas por gasto de agua.” Realizado en Microsoft Excel.
- [62] “Aproximación de ahorros monetarios.” Realizado en Microsoft Excel.