



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO DE CONTROLADOR ELECTRÓNICO DE BAJO COSTO PARA DUCHAS ELÉCTRICAS

Víctor Andrés Rioseco Osses

SEMINARIO DE TÍTULO
CARRERA INGENIERÍA EJECUCIÓN ELECTRÓNICA

CONCEPCIÓN – CHILE
2018



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO DE CONTROLADOR ELECTRÓNICO DE BAJO COSTO PARA DUCHAS ELÉCTRICAS

Víctor Andrés Rioseco Osses

Profesor Guía: Dr. Sc Pedro Melín Coloma
Profesor Co-Guía: Dr. Sc Jaime Rohten Carrasco

CONCEPCIÓN – CHILE
2018

Resumen

Las alternativas para calefaccionar el agua en los hogares han aumentado con el paso de los años. Tanto así, que podemos encontrar en el mercado diferentes equipos para este fin, tales como: Calefon, Paneles Solares, Termotanques Solares, Termotanques Eléctricos, Calefactores Eléctricos de Potencia (más conocidas como Duchas Eléctricas), por nombrar algunos. Si bien los usuarios tienen una gama grande de opciones, muchas de estos eligen calefaccionar por medio de la energía eléctrica debido al bajo costo que tiene en proporción a otros tipos de energía disponibles, sobre todo en la región del Biobío donde se utilizan masivamente Calefactores Eléctricos de Potencia y sus derivados. El problema de elegir esta opción es la alta variación de temperatura que se produce ante cambios de presión en la red de agua del hogar.

Ante este problema, las opciones eléctricas no logran compensar las variaciones de temperatura debido a que su sistema de funcionamiento no lo permite, ya que cuentan con parámetros fijos de corriente y resistencias, que combinados producen efecto Joule transfiriendo la disipación de calor por la resistencia al agua.

Este trabajo de Título describe un controlador electrónico de bajo costo que logra disminuir la variación de temperatura ante estos cambios de presión, mejorando la eficiencia que tienen los actuales equipos. También busca que el controlador, que será instalado en un futuro desarrollo de prototipo de ducha, cumpla con la norma chilena 4/2003 para instalaciones de consumo en baja tensión, para cumplir con la certificación del SEC (Superintendencia de Electricidad y Combustible), cuya certificación es necesaria para todo equipo eléctrico/electrónico y que utilice combustibles para su funcionamiento y así poder ser comercializado en Chile.

Agradecimientos

Entrar a la Universidad es fácil... mantenerse es lo difícil. Llegue al final de esta etapa gracias al apoyo de mis padres y hermanos quienes me decían, “¿y cuánto te falta? ¿cómo es que se llama tu carrera? ¡qué te vaya bien!”, a mis amigos con quienes nos seguimos sentando a resolver el mundo y a los tíos de pañol por su amabilidad y paciencia.

También dar las gracias a mi profesor guía Dr. Pedro Melin por ayudarme a crecer como Ingeniero y por enseñarme a que puedo mejorar cada día, a Gabriel Lagos, Jeovanny Valenzuela, Rodrigo Lagos y Pedro Gutiérrez, todos compañeros del laboratorio LACE, quienes acompañados de un café me ayudaban a resolver dudas.

En este laboratorio pase muchas horas estudiando y resolviendo dudas, por lo que agradezco al profesor Pedro Melin por facilitarme el laboratorio LACE para desarrollar mi proyecto de Seminario de Título.

Agradecer igualmente a Evelyn Acuña por el apoyo y la paciencia que ha tenido desde que nos conocemos, por hacerme saber que lo podía lograr y por recordarme que la vida funciona mejor con prioridades.

Índice

RESUMEN.....	2
ÍNDICE	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	8
1.2 TRABAJOS PREVIOS.....	9
1.2.1 Sistema de funcionamiento y características del Calefon.....	9
1.2.2 Sistema de funcionamiento y características del Termotanque Solar	10
1.2.3 Sistema de funcionamiento y características del Termotanque Eléctrico	11
1.3 Discusión	11
1.4 MOTIVACIÓN	12
1.5 OBJETIVOS	12
1.5.1 Objetivos General.....	12
1.5.2 Objetivos Específicos.....	12
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES	13
1.7 METODOLOGÍA	13
2 CIRCUITO TÍPICO DE UN CALEFACTOR ELÉCTRICO DE POTENCIA 14	
2.1 INTRODUCCIÓN	14
2.2 CONDICIONES Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA	14
2.3 DESCRIPCIÓN DEL CALEFACTOR.....	15
2.3.1 Sistema de funcionamiento y características del calefactor	15
2.3.2 Circuito típico.....	16
2.4 PROBLEMAS ASOCIADOS A ESTOS EQUIPOS	16
2.4.1 Problemas asociados a su eficiencia	17
2.4.2 Problemas asociados a la seguridad	17
2.5 NORMA CHILENA PARA INSTALACIONES DE CONSUMO EN BAJA TENSIÓN	18
2.6 SOLUCIÓN PROPUESTA	19
2.7 CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.....	20
3 ELEMENTOS ELECTRÓNICOS DEL LAZO DE CONTROL.....	21
3.1 INTRODUCCIÓN	21
3.2 ALTERNATIVAS DE CONTROL	22
3.2.1 Introducción.....	22

3.2.2	<i>Diferencias entre un control analógico y uno digital</i>	23
3.2.3	<i>Controlador Proporcional Integral (PI) (Lineal)</i>	24
3.2.4	<i>Controlador On-Off con A.O. (No lineal)</i>	25
3.2.5	<i>Conclusión y discusión</i>	27
3.3	TRIAC	28
3.4	RESISTENCIA CALEFACTORA	28
3.4.1	<i>Introducción</i>	28
3.4.2	<i>Descripción de una resistencia calefactora</i>	29
3.5	SENSOR (TERMISTOR)	30
3.6	CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN	31
4	DISEÑO Y SIMULACIÓN	32
4.1	INTRODUCCIÓN	32
4.2	CIRCUITO COMPARADOR	33
4.3	CIRCUITO DE POTENCIA	34
4.4	CIRCUITO PROPUESTO CON UNA RESISTENCIA	35
4.5	CIRCUITO PROPUESTO CON DOS RESISTENCIAS	37
4.5	CIRCUITO PROPUESTO CON CUATRO RESISTENCIAS	38
4.6	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	40
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
5.1	INTRODUCCIÓN	41
5.2	DATOS CON UNA SOLA RESISTENCIA CALEFACTORA	41
5.2.1	<i>Análisis con una resistencia calefactora</i>	41
5.2.2	<i>Discusión</i>	42
5.3	DATOS CON DOS RESISTENCIAS EN PARALELO	42
5.3.1	<i>Análisis con múltiples resistencias calefactora</i>	42
5.3.2	<i>Discusión</i>	43
5.4	DATOS CON CUATRO RESISTENCIAS EN PARALELO	43
5.4.1	<i>Análisis con múltiples resistencias calefactora</i>	43
5.4.2	<i>Discusión</i>	44
5.5	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	44
6	CONCLUSIÓN	45
6.1	SUMARIO	45
6.2	CONCLUSIÓN	46
6.3	TRABAJOS FUTUROS	47

7 **BIBLIOGRAFÍA..... 48**

Índice de figuras

Figura N° 1: Estructura básica de un Calefon 9

Figura N° 2: Estructura básica de un Termotanque Solar 10

Figura N° 3: Estructura básica Termotanque Eléctrico 11

Figura N° 4: Calefactor Eléctrico de Potencia 15

Figura N° 5: Circuito típico de un calefactor Eléctrico de potencia..... 16

Figura N° 6: Zona seguridad 18

Figura N° 7: Diagrama de Bloques propuesto..... 19

Figura N° 8: Diagrama de Bloque con todos los elementos del lazo de control 21

Figura N° 9: Elemento del lazo de control (Controlador) 22

Figura N° 10: Diagrama de los controles a analizar 22

Figura N° 11: Elemento del lazo de control (controlador PI) 24

Figura N° 12: Elemento del lazo de control (Controlador On-Off) 25

Figura N° 13: Comparador de lazo abierto..... 25

Figura N° 14: Circuito Schmitt Trigger Inversor y No Inversor 26

Figura N° 15: Elemento del lazo de control (Triac) 28

Figura N° 16: Elemento del lazo de control (Resistencia Calefactora) 29

Figura N° 17: Elemento del lazo de control (Sensor)..... 30

Figura N° 18: Circuito Comparador con A.O. 33

Figura N° 19: Circuito de Potencia propuesto..... 34

Figura N° 20: Circuito propuesto con un Resistor 35

Figura N° 21: a) Pulso de disparo vs V_{temp} b) Corriente (i_o) vs Pulso de disparo 35

Figura N° 22: Circuito propuesta con 2 Resistencias en paralelo 37

Figura N° 23: a) Pulsos de disparo vs V_{temp} b) Corriente (i_o) vs Pulsos disparo..... 37

Figura N° 24: Circuito propuesto con 4 resistencias en paralelo 39

Figura N° 25: a) Pulsos de disparo vs V_{temp} b) Corriente (i_o) vs Pulsos de disparo 39

Nomenclatura

i_o	: Corriente de salida.
v_{in}	: Tensión de entrada.
v_{max}	: Límite superior de la banda de histéresis.
v_{min}	: Límite inferior de la banda de histéresis.
v_{set}	: Límite promedio entre v_{max} y v_{min} .
v_{temp}	: Temperatura de salida del equipo.

1 Introducción

1.1 Introducción general

El bajo costo de adquisición e instalación es el principal motivo por el que los usuarios eligen Calefactores Eléctricos de Potencia. Esto debido a que en equipos como Calefon dicho costo se eleva al triple, comparando las versiones más económicas de ambos equipos. Su fácil instalación es otro factor que contribuye en la adquisición de este producto y que está por sobre otras alternativas que requieren de técnicos especializados para su instalación.

Sin embargo, este Calefactor Eléctrico de Potencia tiene desventajas importantes, siendo una de carácter grave ya que no cumplen con la norma que rige en Chile por lo que no posee certificaciones. La seguridad de estos equipos se garantiza con certificaciones y que la Super intendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) otorga a equipos eléctricos/electrónicos. La segunda desventaja es su eficiencia, la que está por debajo de equipos como el Calefon debido a que solo cuenta con un selector de temperatura manual de solo 2 o hasta 3 estados y que, para evitar descargas eléctricas, se debe ajustar con el equipo pagado

Estos dos problemas generan desconfianza en los usuarios, los que terminan eligiendo otro tipo de equipos tales como: Termotanques Eléctricos, Termotanques Solares, Calefón, etc, con una mayor eficiencia y seguridad, pero a un costo mucho más alto, tanto en adquisición e instalación, como en consumo de energía. A cambio entregan temperaturas con rangos más elevados y estables al igual que sellos de certificación para seguridad de los usuarios.

En este Seminario de Título se busca obtener el diseño de un controlador electrónico que sea económico y específicamente diseñado para mejorar las antiguas prestaciones de las Calefactores Eléctricos de Potencia. También se busca que sea una primera etapa para el desarrollo de un prototipo financiado primeramente por el fondo Do i+T de la Macro Facultad de Ingeniería, entidad conformada por las Universidades de la Frontera, Talca y Biobío y así ir en dirección hacia un futuro producto de mercado.

1.2 Trabajos Previos

En el mercado, hay equipos para calefaccionar el agua que usan diferentes tipos de energía para su funcionamiento.

Aquí analizaremos por separado cada uno de los equipos que son sistemas de calefacción alternativos al Calefactor Eléctrico de Potencia, esto con el objetivo de tener información y conocimientos de cómo operan estos equipos y así elaborar un diseño de controlador que sea capaz de competir con los sistemas de funcionamiento descritos a continuación.

1.2.1 Sistema de funcionamiento y características del Calefon

- El Calefon es un equipo que funciona con gas natural, licuado o de ciudad, el que circula por cañerías hasta los quemadores que calientan una base compuesta por láminas de metal similar a la estructura de un radiador. Un serpentín de cobre que atraviesa y envuelve esta estructura, para así conseguir una mayor eficiencia de traspaso de calor de la cañería al agua.

Cuenta con una salida de gases que comúnmente se sitúa en la parte superior del equipo, válvulas de mano para corte de suministro principal y otra para regulación de temperatura.

Hay equipos que aseguran desde 5 [l/m] a 25[°C] hasta equipos costosos con tecnologías avanzadas que aseguran 20 [l/m] a 25[°C], por lo que calefaccionar el agua con estos equipos se requiere de un alto consumo de energía.

En la Figura N°1 se presenta la estructura básica de un Calefon.

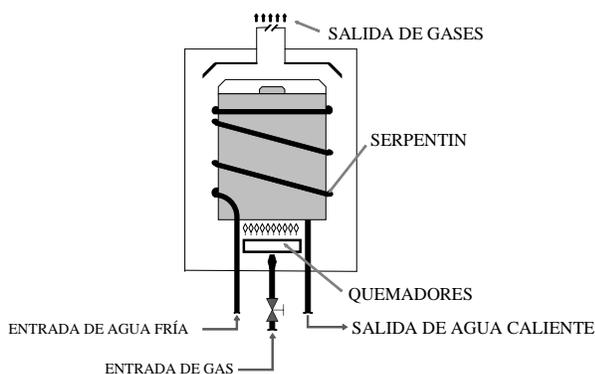


Figura N° 1: Estructura básica de un Calefon

El gas licuado, gas natural desplazan el oxígeno, por lo que provocan asfixia, mientras que el de ciudad está compuesto por monóxido de carbono (CO), el que puede causar intoxicación. Es por ello que la SEC entrega una serie de recomendaciones, siendo las más importantes la permanente ventilación del lugar de instalación y la periódica mantención de estos equipos.

1.2.2 Sistema de funcionamiento y características del Termotanque Solar

- Los Termotanques Solares, por medio de tubos colectores de vidrio sellados al vacío, utilizan la energía solar para calentar el agua, principio denominado *termosifón* o *termo sifónico*. A medida que se calienta el agua, disminuye su densidad circulando por los tubos hacia el acumulador, inyectando más agua fría por los tubos, repitiéndose el ciclo hasta que la totalidad del agua en el tanque sea calefaccionada. A continuación, en la Figura N°2 se presenta la estructura básica de un Termotanque Solar.

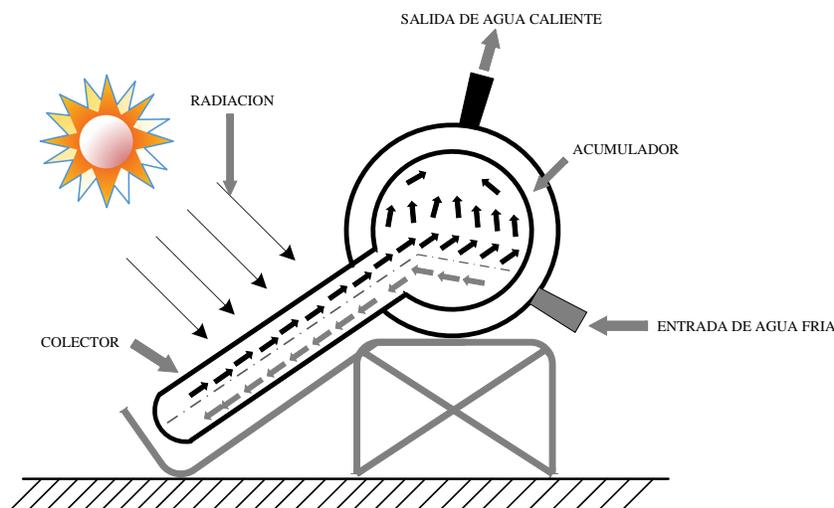


Figura N° 2: Estructura básica de un Termotanque Solar

La ventaja de utilizar energía solar, en términos de consumo energético, es ahorro prolongado en el tiempo para quienes eligen esta opción, pero la desventaja es su costo de adquisición e instalación que está por sobre cualquiera de las opciones mencionadas, dejando esta alternativa poco viable para personas de bajos recursos.

1.2.3 Sistema de funcionamiento y características del Termotanque Eléctrico

- El termotanque eléctrico, al igual que los calefones, aseguran temperaturas dependiendo de la cantidad de litros del equipo que van desde termos de 30[l] hasta 200[l], los que entregan temperaturas constantes, pero con tiempos limitados de uso. Funcionan a base de una resistencia calefactora típicamente de entre 1,5 [KW] a 3[KW] dependiendo de la capacidad de agua de estos termotanques la que se encarga de ejecutar la transferencia de calor por convección al agua.

En la Figura N°3 se presenta la estructura básica de un Termotanque Eléctrico.

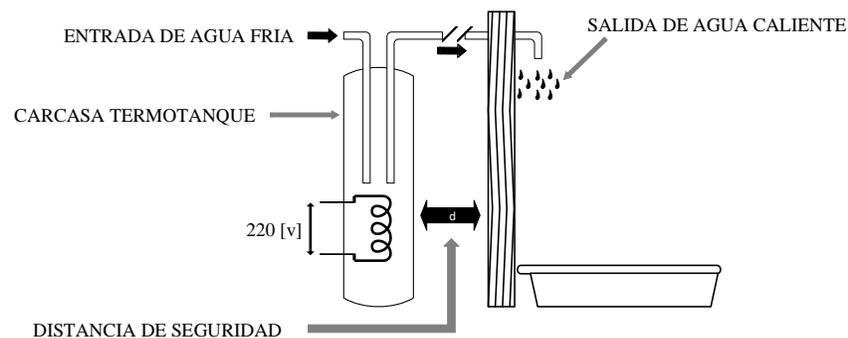


Figura N° 3: Estructura básica Termotanque Eléctrico

Este equipo tiene la desventaja de estar conectado a la red para mantener la temperatura seteada por el usuario, aumentando el consumo energético y desperdiciando muchas veces este recurso y mencionando también que, una vez utilizada la cantidad de litros del estanque, este debe volver a calentar la misma cantidad de agua demorando varios minutos hasta horas en conseguirlo, debido a su lenta dinámica de calefacción.

1.3 Discusión

Las alternativas analizadas presentan desventajas entre las que destacan, emanación de gases nocivos, altos costos de adquisición y dinámica lenta de calefacción. El diseño del controlador debe minimizar estos problemas para que cuando sea un producto de mercado pueda competir con las prestaciones de estos equipos.

1.4 Motivación

Proponer un sistema de calefacción de agua en duchas, que sea eficiente, de bajo costo y que pueda ser desarrollado en la región, postulando a futuros proyectos para sectores rurales o de bajos recursos. Esto con el objetivo de mejorar la calidad de estos equipos comúnmente utilizados por estas personas, quienes diariamente se enfrentan a calefactores eléctricos de potencia, con el peligro inminente de descargas eléctricas y un deficiente control de regulación de sus temperaturas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivos General

- Diseñar un controlador electrónico de bajo costo para ser implementado en un sistema de calefacción eléctrico de agua.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Estudio de la aplicación en detalle.
- Investigar controladores, reguladores de potencia, sensores de temperatura y resistencias calefactoras existentes en el mercado.
- Simular mediante software computacional las opciones investigadas en el punto anterior.
- Tomar datos, definir y evaluar el controlador a diseñar.
- Diseñar el controlador.
- Comprobar el circuito que gobernara al regulador de potencia.

1.6 Alcances y Limitaciones

- Se desarrollará el diseño de un controlador electrónico, para ser implementado en una ducha eléctrica.
- Se analizarán los resultados con una resistencia, como con múltiples de ellas.
- Se consideran elementos ideales en la simulación.
- La simulación se desarrollará en el programa PowerSim.
- El diseño del controlador es específico para la aplicación en discusión.
- El diseño estará dirigido a un futuro bajo costo de implementación.
- Para asegurar el correcto funcionamiento del controlador, el domicilio debe de contar con al menos un disyuntor general de 20[A].
- Se busca que el diseño de este controlador sea la base para un futuro producto terminado y de venta en el mercado.

1.7 Metodología

La forma para llevar a cabo los objetivos propuestos, contempla una revisión bibliográfica de conceptos de consumo eléctrico en hogares y sus limitaciones, al igual que las características de la resistencia calefactora y de los componentes electrónicos encargados para su activación y así familiarizar al autor del seminario con estos conceptos.

Para una mayor comprensión de lo que se va a hacer, esto se puede pausar de la siguiente manera.

- **Búsqueda Bibliográfica desde IEEE, por medio de IEEEExplore.**
- Revisión y análisis de equipos alternativos.
- Revisión y análisis de Calefactor Eléctrico de Potencia.
- Solución propuesta.
- Diseño de posibles controladores en base a la solución propuesta.
- Simulación en Psim de los diferentes diseños propuestos.
- Análisis de los resultados con el objetivo de obtener la mejor solución posible.
- Documentación y características del controlador.

2 Circuito típico de un Calefactor Eléctrico de Potencia

2.1 Introducción

Los equipos que calefaccionan el agua aplican un sistema de funcionamiento en condiciones diferentes para cada uno. Por lo que el capítulo comienza con una reseña de las condiciones y las características del lugar donde se instalan los Calefactores Eléctricos de Potencia.

En el mercado se encuentran variados modelos de Calefactores Eléctricos de Potencia con características estéticas diferentes, pero con un sistema de funcionamiento igual para todos ellos.

En este capítulo se dará a conocer la descripción física y su circuito, así como las ventajas y desventajas de estos equipos. Para concluir con una solución propuesta que tiene por objetivo mejorar y rediseñar su sistema de funcionamiento.

2.2 Condiciones y características del sistema

Las condiciones en la que opera son en un ambiente húmedo, aumentando los factores de riesgo de electrocución, más aún si está situada dentro de la zona de seguridad dispuesta por la Norma 4/2003, la que se analiza al final de este capítulo.

El Calefactor Eléctrico de Potencia se desenvuelve en un área en donde por norma chilena no debería instalarse ningún equipo eléctrico/electrónico, al estar la etapa de potencia a solo unos cuantos centímetros sobre los usuarios. Por lo que se hace obligatorio que la etapa de potencia del nuevo controlador se sitúe fuera del perímetro dispuesto por la norma.

El sistema dispone de una entrada de agua fría, la que por medio de cañerías llega al equipo calefactor, encargado de calefaccionar el agua que circula a través del equipo, transfiriendo calor desde el elemento actuador (resistencia) al agua.

Dispone de canalizaciones por la que atraviesan cables de alimentación los que llegan a los terminales del Resistor, en donde parte de la energía cinética de los electrones es transformada en energía calórica, excitando los átomos que componen el material y cuyo propósito es elevar la temperatura del metal para efectuar el traspaso de energía.

2.3 Descripción del calefactor

2.3.1 Sistema de funcionamiento y características del calefactor

- El Calefactor Eléctrico de Potencia tiene el mismo principio de funcionamiento que los termotanques eléctricos, pero con una gran diferencia de tamaño. Este calefactor de agua posee un selector manual de temperatura comúnmente de 3 estados, caliente, fría y tibia representados en colores negro, blanco y plomo respectivamente los que se pueden apreciar en la Figura N°4.

El selector manual, por seguridad contra descargas eléctricas, se debe setear antes de usar el equipo y su función es activar una de sus dos resistencias de diferente valor óhmico, generando consumos de potencia fijos para cada una de ellas.

El encendido de este equipo se hace por medio de la misma presión de agua generada en el recipiente que logra levantar una membrana que está unida a los terminales de las resistencias, haciendo contacto con los terminales donde se impone la tensión 220[V].

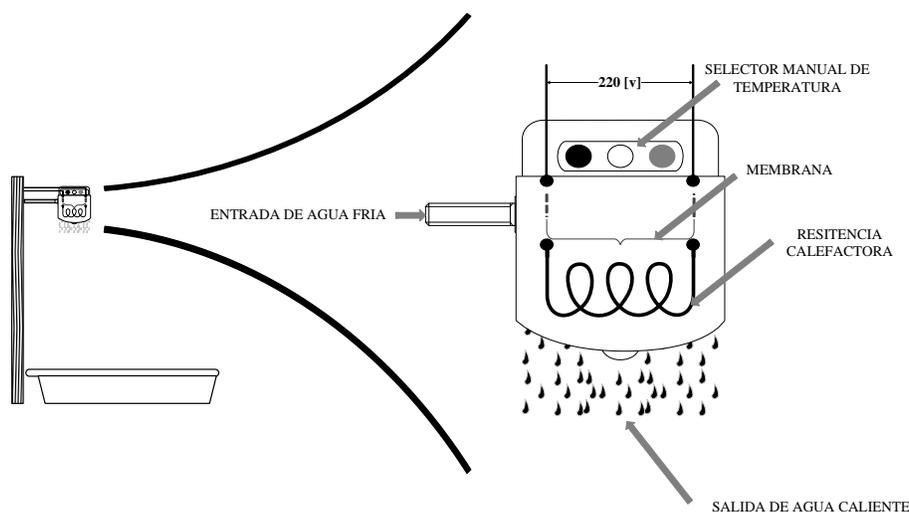


Figura N° 4: Calefactor Eléctrico de Potencia

2.3.2 Circuito típico

Los Calefactores Eléctricos de Potencia, los que tan solo con un actuador (resistencia calefactora), una fuente de energía (red eléctrica del hogar) y un control (selector manual de temperatura), logran ejecutar un control sobre la temperatura del agua que pasa por estos equipos.

A continuación, en la figura N°5 se puede apreciar el circuito típico de un Calefactor Eléctrico de potencia.

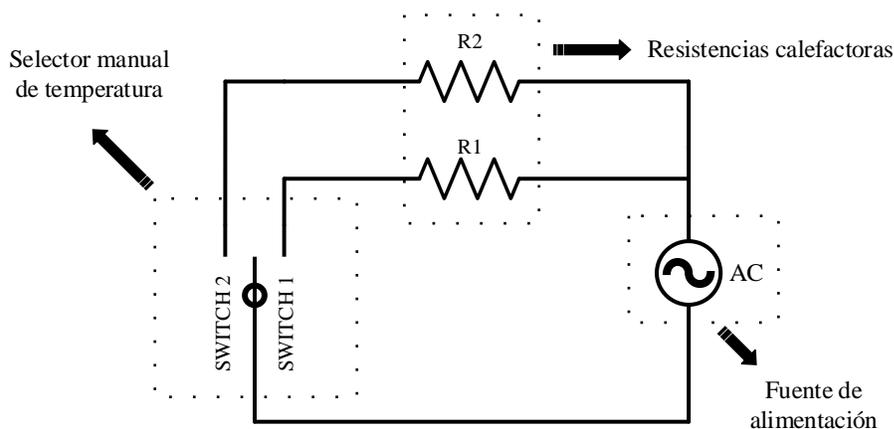


Figura N° 5: Circuito típico de un calefactor Eléctrico de potencia

2.4 Problemas asociados a estos equipos

Los Calefactores Eléctricos de Potencia, más conocidos como Duchas Eléctricas tienen ventajas entre la que destaca: su bajo costo de adquisición e instalación que está por debajo de cualquier opción analizada en este documento, razón por la que se utiliza comúnmente en hogares de recursos limitados y de forma masiva en la región del Biobío. Sin embargo, poseen desventajas las cuales se mencionas a continuación.

2.4.1 Problemas asociados a su eficiencia

Los problemas que tienen que enfrentar los usuarios, muchas veces al comprar Calefactores Eléctricos de Potencia, son que la temperatura de salida del equipo varia bruscamente ante cambios en el flujo del agua. Los usuarios terminan aceptando una eficiencia que está por debajo de los otros equipos analizados en este seminario, esto al no proporcionar al usuario temperaturas estables ante variaciones de presión o caudal en la red doméstica de agua y ofrecer temperaturas máximas muy por debajo comparado con otros equipos.

2.4.2 Problemas asociados a la seguridad

Sin duda este es un problema grave, al estar vinculado con la vida de las personas, que al igual que el problema anterior, los usuarios solo terminan aceptando esta condición, por el bajo costo de adquisición e instalación de estos equipos. Este problema está directamente asociado a certificaciones de seguridad, las cuales el SEC entrega a equipos eléctricos/electrónico y de funcionamiento a base de combustibles en Chile, y que no puede otorgar a Calefactor Eléctricos de Potencia debido al no cumplimiento de la Norma Chilena 4/2003 para instalaciones de bajo consumo en baja tensión, la que analizaremos a continuación.

2.5 Norma Chilena para instalaciones de consumo en Baja Tensión

Esta norma entro en vigencia en diciembre de 2004, y se le denomina como Norma Chilena 4/2003 para instalaciones de consumo en baja tensión. Se establece con el objetivo de regular todo tipo de instalación ya sean tableros, cables, canaletas, empalmes, conexiones a tierra, condiciones de alimentación, condiciones ambientales, etc. Dentro de esta norma se encuentra descrita una zona de seguridad, la que aparece como hoja de norma N°18 dentro del mismo documento y que rige para toda instalación de salas de baños. Esta zona comprende un perímetro alrededor de la bañera en donde no se pueden instalar ningún tipo de artefacto eléctrico, toma de corriente, canalización que la atraviese o alumbrado, sin tener certificación de que son aprueba de agua. Este perímetro comprende 0,6[m] del borde al exterior de una tina o bañera, 6[cm] tanto bajo el nivel del piso como por sobre el techo y una altura de 2,25[m] siendo esta referencial y un espesor de paredes y muros de [60mm].

Estas medidas son con el fin de evitar riesgo de accidente que puedan sufrir usuarios que utilicen estas instalaciones. [1]

La zona de seguridad está representada en la imagen N°6.

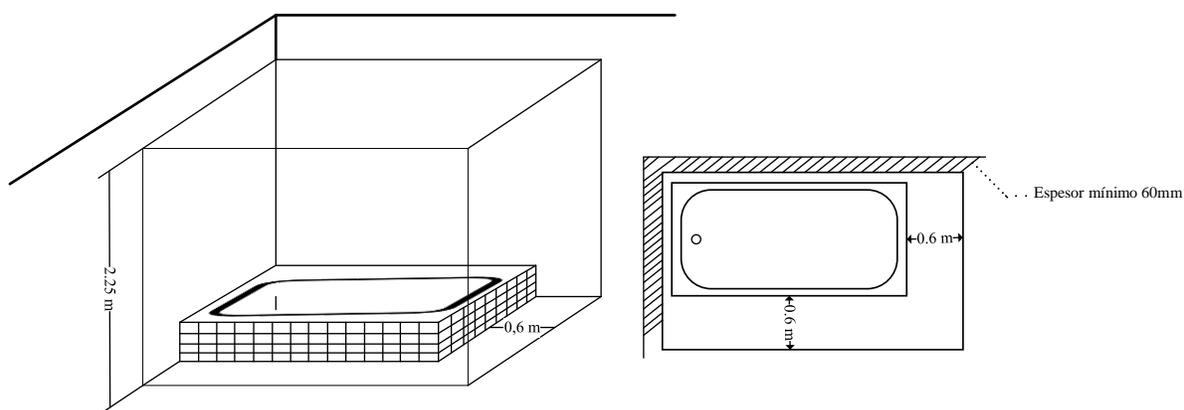


Figura N° 6: Zona seguridad

2.6 Solución propuesta

Conocidas las características del ambiente donde trabajan estos Calefactores Eléctricos de potencia y los problemas asociados a estos equipos, es que se ofrece la siguiente solución con el fin de mejorar la calidad de su control y cumplir con el objetivo del Seminario de Titulo.

Para ello se plantean los siguientes puntos que son un primer acercamiento a la propuesta final del controlador.

- Utilizar un elemento sensor, acondicionar su toma de datos para llevar sus señales al controlador.
- Reemplazar el selector manual de temperatura por uno de comportamiento controlado y automático.
- Utilizar para el diseño del controlador elementos de bajo costo como lo son los amplificadores operacionales (A.O.).
- El circuito debe de ser normalmente abierto por seguridad.
- En un futuro proyecto, asegurar cumplimiento de la Norma Chilena 4/2003, instalando el equipo fuera de la zona de seguridad descrita en este documento.
- Utilizar una configuración en el elemento actuador que asegure estabilidad en la temperatura de salida del equipo.

A continuación, en la Figura N°7 se presenta un diagrama de bloques representando la solución propuesta.

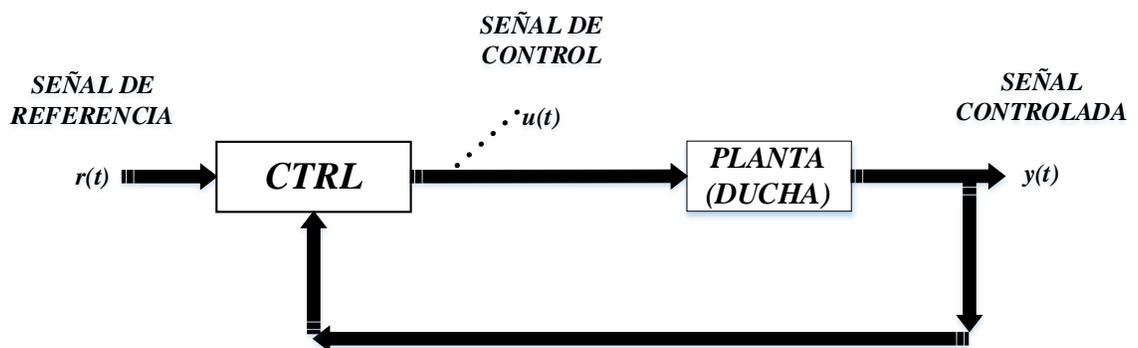


Figura N° 7: Diagrama de Bloques propuesto

2.7 Conclusiones y Discusión

El sistema de funcionamiento de los Calefactores Eléctricos de Potencia, no es más que un circuito que utiliza una fuente de alimentación para generar una circulación de corriente por uno de los resistores. Además, como elemento de control, solo utiliza un selector manual de temperatura.

Lo estudiado en este capítulo hace deducir que usuarios están dispuestos a correr riesgos, incluso con elementos que le pueden generar descargas eléctricas, pero que como vimos, el bajo costo de adquisición y fácil instalación hace querer decidir por estos equipos. Su diseño no optimiza los recursos energéticos, desperdicia la posibilidad de recorrer múltiples niveles de potencia y no cuenta con certificaciones necesarias para garantizar su seguridad.

Es un equipo de diseño simple, de alto consumo eléctrico, de fácil instalación y reparación, de dimensiones menores, de temperatura variable ante cambios mínimos en los parámetros del sistema. Todas las características antes mencionadas hablan de un equipo aún muy presente entre los usuarios, pero que cuanta con desventajas las que se pueden mejorar como así lo describen los siguientes capítulos.

3 Elementos electrónicos del lazo de control

3.1 Introducción

En este tercer capítulo se darán a conocer las principales características y diferencias entre un control digital y uno analógico.

Se hace una revisión de algunos controladores descritos en Alternativas de Control, analizando las principales características, ventajas y desventajas si se implementaran en un sistema de calefacción eléctrico de agua.

Los controladores analógicos pueden ser lineales o no, por lo que será descrito un ejemplo de cada uno. Un PI como control lineal y un On-Off como control no lineal. Este último se divide en dos tipos, con y sin histéresis por lo que se analizan separadamente.

Además, se describen los distintos elementos que conforman el control, específicamente el Triac de potencia, el sensor de temperatura y el elemento calefactor. Para finalizar, se describe la propuesta de control en base a A.O., focalizando los objetivos de implementación en el bajo costo.

A continuación, en la imagen N°8 se muestra un diagrama de bloques que representa la dinámica de control propuesto en el capítulo anterior, incluidos los elementos Triac, Resistencia calefactora y el sensor.

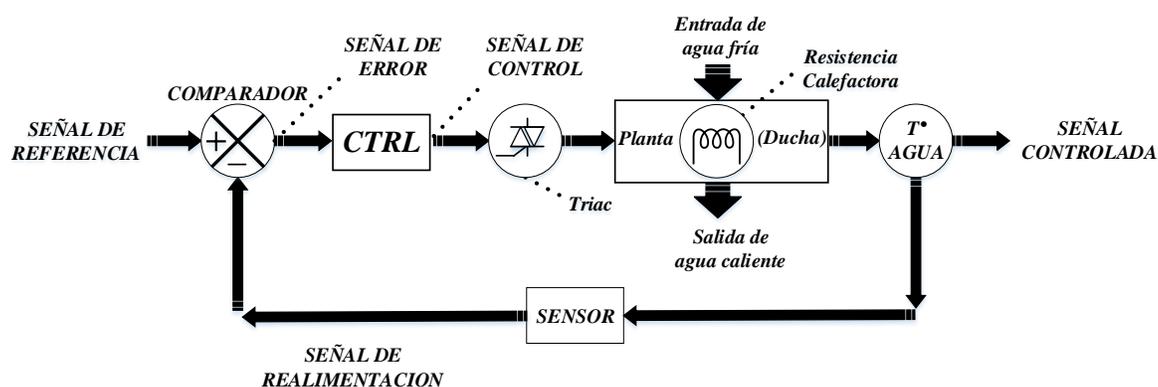


Figura N° 8: Diagrama de Bloque con todos los elementos del lazo de control

3.2 Alternativas de control

3.2.1 Introducción

Aquí, el principal objetivo es analizar tipos de control.

- Se estudiarán diferencias entre controles analógicos y digitales.
- Análisis de un control Proporcional Integrativo.
- Análisis de un control On-Off, de los cuales se describen dos tipos: Sin histéresis (On-Off puro) y el Schmitt Trigger (On-Off con banda de histéresis).

El foco de este capítulo contempla el estudio del bloque CTRL, como se destaca en la Figura N°9, el que presenta dos opciones de diseño: control analógico o digital como muestra el diagrama de la Figura N°10

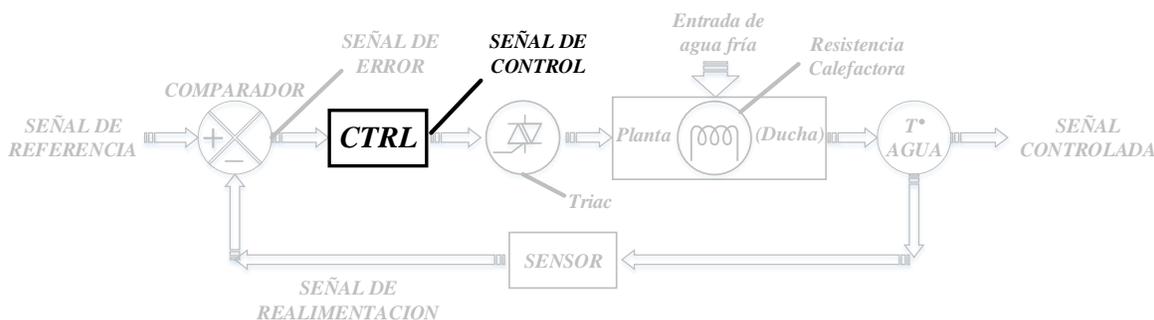


Figura N° 9: Elemento del lazo de control (Controlador)

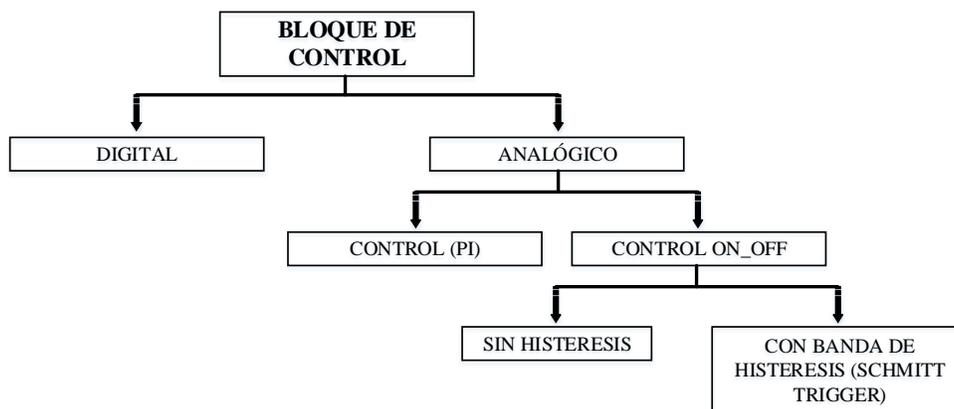


Figura N° 10: Diagrama de los controles a analizar

3.2.2 Diferencias entre un control analógico y uno digital

Existen dos tipos de implementación para el desarrollo del controlador electrónico, las cuales son:

El control digital: Los controladores digitales utilizan niveles analógicos representados en números para cada muestra adquirida. Tiene una gran flexibilidad al soportar la implementación de varios controladores atendiendo a múltiples lazos simultáneamente. Además, un cambio de algoritmo de control no está ligado a un cambio de equipo, solo de su programación.

La desventaja es que a pesar de su versatilidad y flexibilidad aumenta los costos de implementación.

El control analógico: Utiliza señales eléctricas que son procesadas directamente en una red electrónica para generar una acción de control deseada. Cuando existe un nuevo algoritmo, se requiere un nuevo equipo. Esto porque están típicamente contruidos alrededor de A.O., los cuales no son programables, pero en donde es muy simple procesar señales de tensión de acuerdo a las leyes de proporcionalidad, integrativas y derivativas.

La desventaja es que, a pesar de su bajo costo, un control analógico típicamente está asociado a solo una tarea de control, debiendo cambiar parte o la totalidad de su hardware si se requiere su aplicación en otro proceso.

Descritas las características de estos dos tipos de controladores y atendiendo los objetivos del Seminario de Título, se decide seguir el estudio con controladores analógicos ya que el diseño está resuelto para una aplicación específica, por lo que puede ejecutar sin problemas una acción de control y se deja fuera de elección a los digitales por la desventaja de costo que presenta su implementación.

3.2.3 Controlador Proporcional Integral (PI) (Lineal)

Con acción proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente.[2]

El principal objetivo del controlador PI, dispuesto en la Figura N°11, es eliminar el error de estado estacionario generado por la acción Proporcional. El impacto que tiene sobre un sistema, en términos de velocidad de respuesta y estabilidad, es negativo. Esto, porque no tiene la capacidad de predecir los futuros errores del sistema, por lo que no puede eliminar los tiempos de subida y tampoco eliminar las oscilaciones en la salida de los sistemas de circuito cerrado.[3]

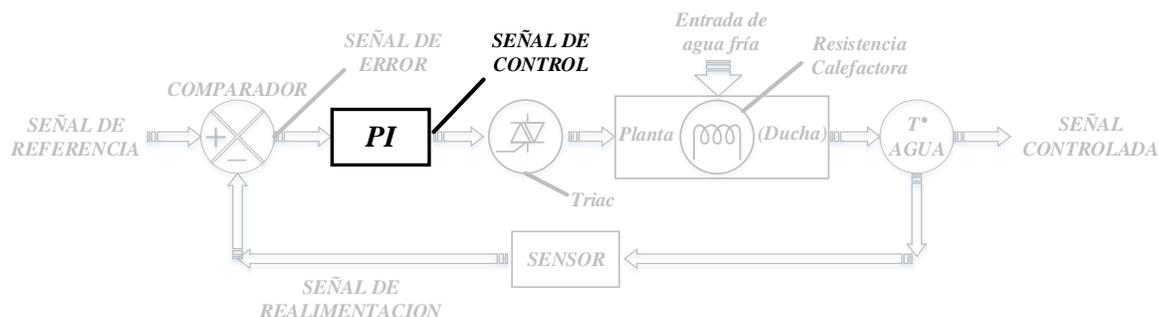


Figura N° 11: Elemento del lazo de control (controlador PI)

Por esta razón, este control no es efectivo para aplicarlo a un sistema de calefacción de agua para ducha. El flujo constante, su presión y los cambios en los parámetros de temperatura iniciales del agua, hacen que el control PI teóricamente presente oscilaciones e inestabilidad en la temperatura de salida del equipo.

3.2.4 Controlador On-Off con A.O. (No lineal)

3.2.4.1 Introducción

Un controlador on-off como circuito no lineal se puede implementar solo con un A.O. y su circuito consiste en un A.O. en configuración de comparador.

Los tipos de comparadores pueden ser en lazo abierto (On-Off puro) o con realimentación positiva (Schmitt Trigger) los que tienen como objetivo determinar cuál de los dos voltajes es mayor.

En la figura N°12 se expone un diagrama de bloques, resaltando el control On-Off.

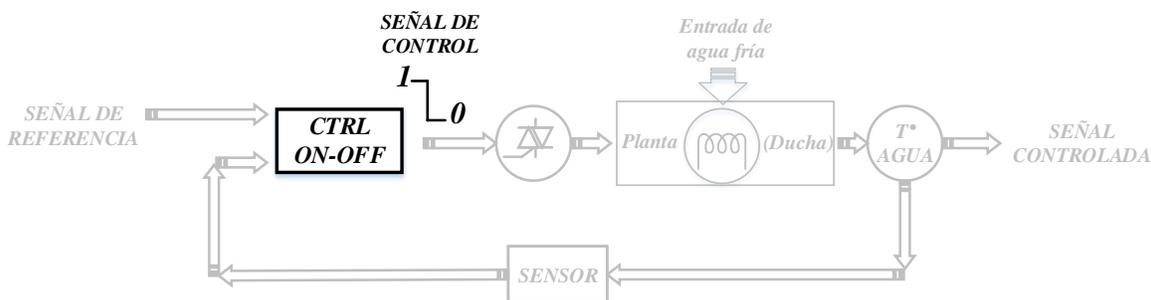


Figura N° 12: Elemento del lazo de control (Controlador On-Off)

A continuación, se da referencia al Comparador de lazo abierto y al Comparador con realimentación Positiva.

Comparador de lazo abierto: La salida de un A.O está dada por la ecuación dispuesta en la Figura N°13 en la parte inferior de cada configuración de comparador. La salida $\pm V_{sat}$ ($\pm V_{cc}$) dependerá de la diferencia entre v^+ y v^- . Si es positiva $v_o = +V_{cc}$ y $v_o = -V_{cc}$ si es negativa. En la figura N°13 se muestra el bloque de control con la topología de comparador de lazo abierto inversor y no inversor y sus respectivas curvas de salida. [4]

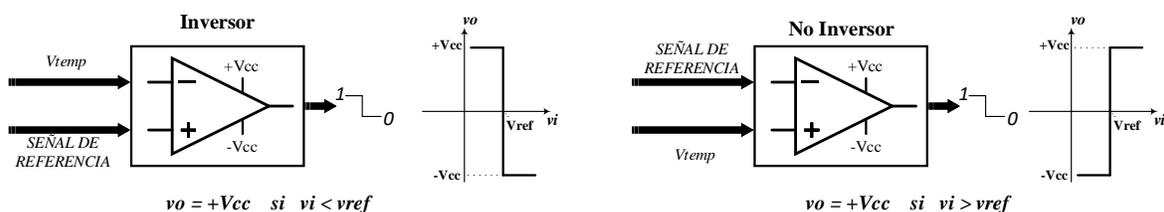


Figura N° 13: Comparador de lazo abierto

Si se implementara este controlador en una ducha, la frecuencia con la que se ejecuta la acción de control sería muy alta, debido al continuo flujo, cambio de presión y temperatura inicial del agua en el sistema. Ya que, al tener un acumulador pequeño con flujo constante de agua fría, requiere de una acción rápida por parte del controlador, lo que perjudica tanto la vida útil del elemento actuador como la del elemento de control.

Comparador con realimentación positiva: Denominado también como Schmitt Trigger, es un comparador que puede ser aplicado como circuito de control y que se realimenta positivamente para acelerar el ciclo de conmutación. La comparación se realiza de la misma forma que en el de lazo abierto, obteniendo como resultado $\pm V_{cc}$ dependiendo de la diferencia entre v^+ y v^- .

Lo que diferencia al Schmitt Trigger con el comparador de lazo abierto, es que la comparación genera una banda de histéresis. En la figura N° 14 se presenta el circuito Schmitt Trgger en sus configuraciones inversor y no inversor y la curva de histéresis para cada circuito. [4]

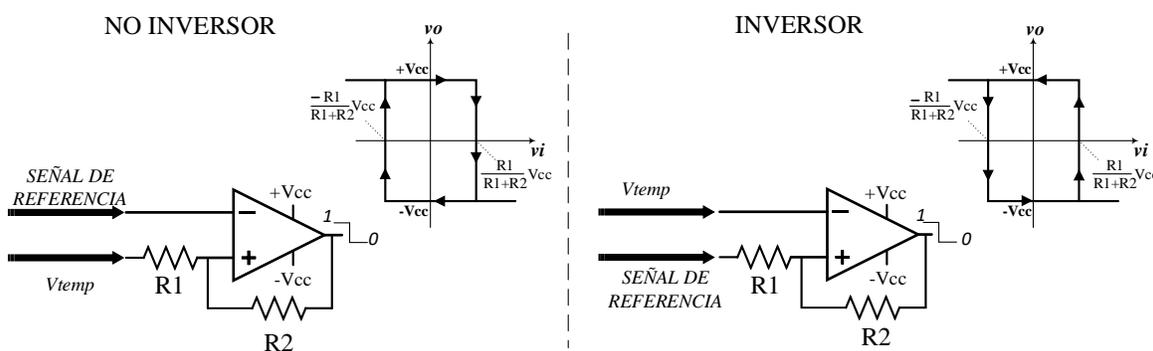


Figura N° 14: Circuito Schmitt Trigger Inversor y No Inversor

Este circuito de control, al ser implementado en un calefactor eléctrico de agua, presenta desventajas, que teóricamente generarían variaciones de temperatura a la salida del equipo. Si la variable medida cae abruptamente fuera de los límites de la banda de histéresis, la salida del comparador toma alternadamente unos de sus dos posibles estados, $+V_{cc}$ o $-V_{cc}$. Esto porque el dato obtenido por el sensor responde a las variaciones de presión o temperatura inicial del agua, aunque estas presenten cambios abruptos. Esta desventaja genera que se pierda el control sobre la variable.

Por el contrario, su ventaja es que mejora considerablemente la frecuencia de conmutación que tendría el elemento de control y por ende el circuito de potencia, alargando la vida útil de ambos elementos. Debido a la ventaja que presenta la aplicación de una banda de histéresis, el diseño del controlador en este Seminario de Título, aplicara este método en una de sus dos propuestas presentadas en el Capítulo 4.

3.2.5 Conclusión y discusión

En este subcapítulo se logró determinar qué tipo de control se ajusta más al objetivo del Seminario de Título.

Al estudiar la elección del controlador analógico, específicamente un control lineal como el PI y un control no lineal como el On-Off, se dedujo que el diseño no puede presentar variaciones significativas en su salida, debido a que las características del sistema en donde será implementado el control se caracterizan por tener variables como la presión o temperatura inicial del agua que cambian constantemente, lo que deja a estos dos tipos de control como diseños no adecuados para la aplicación.

Sin embargo, del comparador On-Off con realimentación positiva (Schmitt Trigger) presento algunas ventajas con la aplicación de su banda de histéresis, por lo que en el capítulo 4 se analizará el diseño de un control con este tipo de aplicación.

3.3 Triac

Es un dispositivo semiconductor bidireccional de la familia de los Tiristores. Lo diferencia de los SCR su capacidad de conmutar la corriente en ambas direcciones. Cuentan con un terminal A1 y A2 y puerta (Gate). El terminal encargado de controlar las conmutaciones es la “patilla” Gate, la que, mediante una pequeña inyección de corriente, del orden de los miliamperes, activa la puerta disparando el Triac. [7]

La aplicación de este dispositivo en el diseño del controlador es conmutar el flujo de corriente que pasa por una resistencia calefactora. En la figura N°15 se expone el diagrama de bloques con el elemento Triac resaltado.

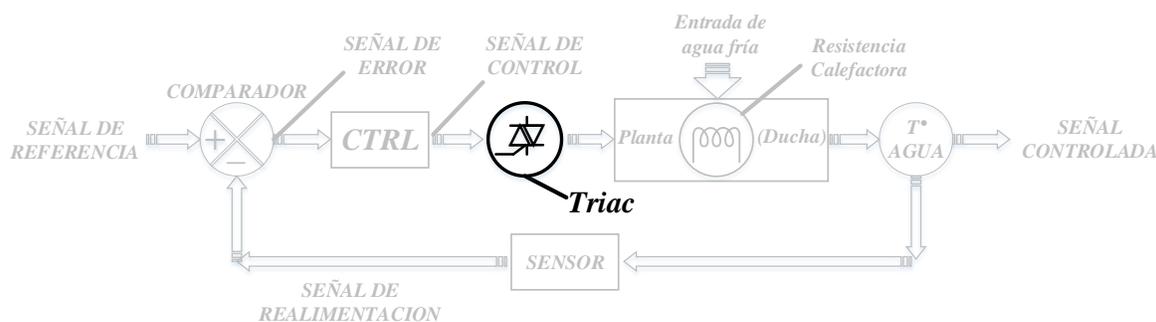


Figura N° 15: Elemento del lazo de control (Triac)

3.4 Resistencia calefactora

3.4.1 Introducción

Las resistencias calentadoras convierten la energía eléctrica en calor. Procesamiento descubierto por James Prescott Joule en el año 1841 y cuyo proceso de conversión de la energía se denomina efecto Joule. [5]

La disipación de calor en general es un efecto secundario no deseado en Ingeniería Eléctrica. Esto porque los componentes que comúnmente conforman los equipos electrónicos alteran sus parámetros cuando son sometidos a altas temperaturas. Por el contrario, existen equipos que para funcionar adecuadamente deben calentarse y uno de los elementos utilizados para esta acción es la resistencia calefactora.[6]

Cuando a una resistencia calefactora se le hace circular corriente eléctrica, existirá una pérdida de potencia, que resulta en forma de energía térmica. Este proceso es aplicado

por el efecto I^2R . A continuación, en la Figura N°16, se presenta el diagrama de bloques con el elemento resistor resaltado.

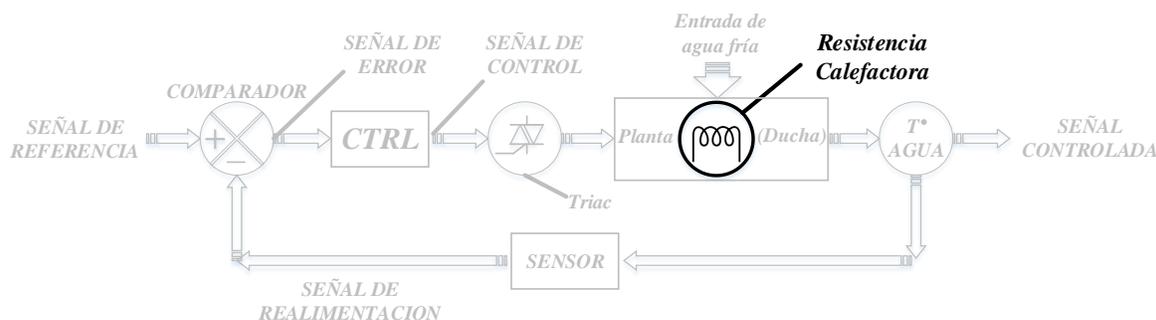


Figura N° 16: Elemento del lazo de control (Resistencia Calefactora)

3.4.2 Descripción de una resistencia calefactora

Su forma y composición en la que comúnmente se encuentra es en alambre que combina una aleación de Níquel y Cromo, estando en proporción de ocho partes de Níquel y dos de Cromo respectivamente.

Las proporciones de la aleación hace de este material altamente resistente a temperaturas elevadas, soportando hasta mil grados Celsius y que además es inoxidable.

En otras aplicaciones este alambre es recubierto con cerámica y con una capa extra de acero inoxidable, cobre cromado o una combinación de hierro, níquel, cromo y cobre (Incoloy). Las de capa extra de cobre o acero inoxidable son utilizadas normalmente en aplicaciones que requieren la completa inmersión del resistor en algún líquido, mientras que las de Incoloy son para ser altamente resistentes a temperaturas de hasta sobre 800 grados Celsius.

Otros materiales menos utilizados son el platino, carburo de silicio, disiliciuro de molibdeno.

El modelo de resistencia que se utiliza a lo largo de este documento es del tipo alambre de aleación de níquel y cromo (alambre 80/20) con recubrimiento extra que garantice un correcto funcionamiento en condiciones de inmersión de líquidos. [5]

3.5 Sensor (termistor)

Un termistor es un elemento que varía su resistencia cuando su temperatura cambia. Existen termistores NTC y PTC los que se diferencian principalmente en su signo de sensibilidad. Ambos nombres son siglas en inglés (Negative Temperature Coeficient y Positive Temperatura Coeficient).

Para este Seminario de Titulo se utiliza un NTC, termistor que tiene un coeficiente de temperatura negativo, lo que quiere decir que su resistencia disminuye a medida que aumenta su temperatura.[8]

El Termistor NTCLE100 es uno de los más comunes y posee variados modelos para una amplia gama de aplicaciones. Entre las principales características de estos modelos son que presentan un rango de medición de entre $-40[^\circ\text{C}]$ y $125[^\circ\text{C}]$, una disipación máxima de $500[\text{mW}]$, un valor de resistencia a $25[^\circ\text{C}]$ entre $3.3[\Omega]$ y $470[\text{k}\Omega]$.

En la Figura N°17 se presenta el diagrama de bloques con el elemento sensor resaltado.

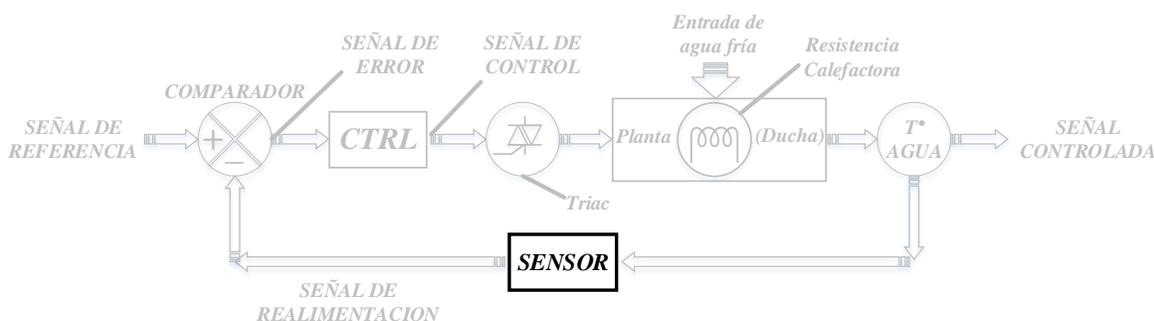


Figura N° 17: Elemento del lazo de control (Sensor)

3.6 Conclusión y Discusión

En este capítulo se dieron a conocer las diferencias entre un control analógico y uno digital. La elección del control analógico llevo a un análisis de algunas de sus alternativas. De estas, el Schmitt Trigger presento algunas ventajas como su bajo costo y la banda de histéresis que puede generar, ventajas que se aplicaran al diseño del controlador.

En general es un capítulo de revisión y selección del tipo de control y un estudio de los elementos electrónicos que componen el lazo de control, para así otorgar al lector información para una mayor comprensión de los capítulos posteriores.

4 Diseño y Simulación

4.1 Introducción

Como vimos en el capítulo 3, los Calefactores Eléctricos de Potencia poseen un selector manual de temperatura, lo que genera peligro de descargas eléctricas si la instalación está mal ejecutada o el equipo se encuentra defectuoso.

Para evitar el control manual deficiente se implementa un sistema de control automático de bajo costo, para reemplazar el selector manual antes descrito. Esto con el objetivo mejorar el sistema de funcionamiento otorgando al usuario niveles de temperatura con rangos estables, independiente de los cambios de presión en la red de agua del hogar.

En este capítulo se darán a conocer A.O. en configuración comparador, un circuito típico de potencia, además de dos tipos de control, el primero con solo un resistor del tipo calefactor y el otro con múltiples resistores y se describirán las etapas que componen cada uno de los controles. Con esto se consigue determinar qué control genera menos impacto a la red eléctrica y que control presenta mejoras sustanciales con respecto al que presenta un Calefactor Eléctrico de Potencia.

Para finalizar se entra en una discusión de las ventajas y desventajas de las soluciones propuestas en este capítulo.

4.2 Circuito comparador

Un A.O. en configuración de comparador no hace más que eso, comparar señales. Están el comparador no inversor y el comparador inversor.

Para el no inversor, la señal que varía en el tiempo, ósea la señal medida se aplica a la entrada no inversora, mientras que a la entrada inversora se le aplica una señal acondicionada proveniente del usuario.

Para el caso del comparador inversor, se aplican las mismas señales, pero en opuestos terminales. Esto quiere decir que se aplica la señal que representa la variable temperatura a la entrada inversora y la señal acondicionada proveniente del usuario a la no inversora. [4]

Como se puede ver en la Figura N°18 hay una configuración de comparador inversor y no inversor para cada uno de los A.O., los que conforman el circuito comparador.

Cuando se hace la comparación, la salida de cada A.O. puede ser del tipo $+V_{sat}$ (Tensión de saturación Positiva) o $-V_{sat}$ (Tensión de saturación Negativa), cuyos valores máximos alcanzan entre $\pm 12[V]$ y $\pm 15[v]$.

La combinación de los dos A.O. en configuraciones distintas, entrega al Flip-Flop una serie de diferentes estados de saturación conforme a las comparaciones hechas por los A.O. que generan respuestas del tipo High o Low suficientes para activar la etapa de potencia.

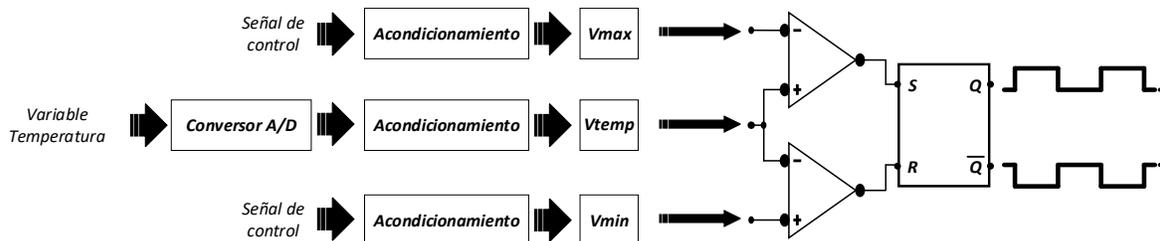


Figura N° 18: Circuito Comparador con A.O.

4.3 Circuito de potencia

Se caracteriza por contar con elementos que soportan altos niveles de corriente y tensión. Es el circuito encargado de ejecutar la acción de control por medio de dispositivos semiconductores de potencia que pueden ser del tipo no controlados, semi-controlados o completamente controlados.

El semiconductor aplicado es el Triac, dispositivo al que se le puede controlar los pulsos de disparo. Es el elemento encargado de conmutar los estados del circuito de potencia.

En la figura N°19 se muestra el circuito de potencia propuesto. Este cuenta con una alimentación de 220[v] alternos, los que se aplican al elemento actuador que en el circuito es una resistencia calefactora, encargada de transferir energía en forma de calor por convección al agua.

Y como switch de control, se utiliza un Triac de potencia del tipo completamente controlado.

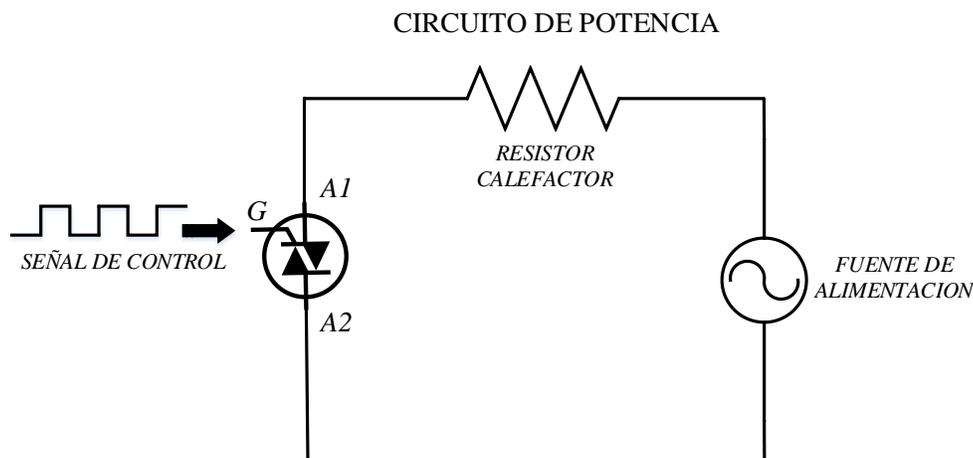


Figura N° 19: Circuito de Potencia propuesto

4.4 Circuito propuesto con una resistencia

En la figura N°20 se observa que el circuito de control a base de A.O en configuración de comparador más un Flip-Flop del tipo Set-Reset, activan el circuito de potencia y en la Figura N°21 los gráficos de la V_{temp} vs Pulso de disparo y de la Corriente(i_o) vs Pulso de disparo.

El accionamiento de la etapa de potencia responde a un control con histéresis, en donde se presenta flujo de corriente por el resistor si y solo si la variable mediada (V_{temp}) está por debajo del límite inferior (V_{min}) de la histéresis y, por el contrario, si la V_{temp} está por encima del límite superior (V_{max}) cesara el flujo de corriente por el resistor.

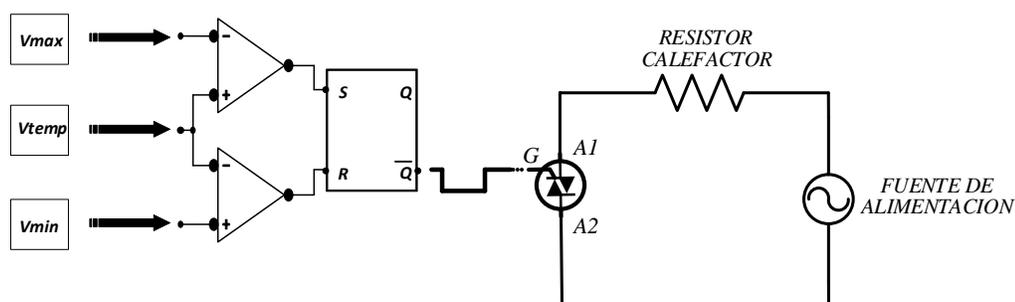


Figura N° 20: Circuito propuesto con un Resistor

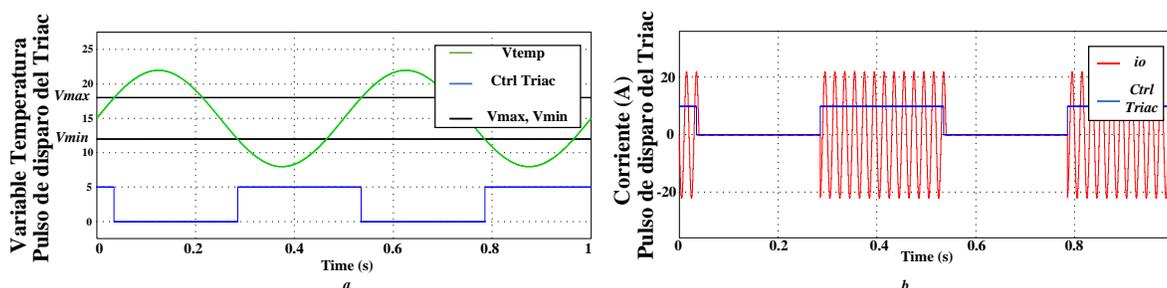


Figura N° 21: a) Pulso de disparo vs V_{temp} b) Corriente (i_o) vs Pulso de disparo

El circuito está compuesto por tres etapas que a continuación se describen más detalladamente.

Etapas 1: Aquí es donde los datos obtenidos del sensor son aplicados a un convertidor A/D para luego ser acondicionados a una señal eléctrica útil para el controlador.

Lo mismo ocurre con el dato ingresado por el usuario, pero aquí no hay una conversión A/D debido a que esa señal ya es un dato digital. Lo que se hace con esta señal es, mediante un algoritmo matemático, generar dos señales que representen los niveles de temperatura máximo y mínimo. Con esto logramos obtener señales que sirven como límites para un control con histéresis.

Etapas 2: En esta etapa está el control propiamente tal, ya que es donde se encuentran los dos A.O. y el Flip-Flop del tipo Set-Reset. Aquí las señales ya acondicionadas de la etapa 1, se aplican al terminal inversor y no inversor de los A.O., configurados de tal modo que la salida de cada A.O llega al Set y Reset del Flip-Flop.

Como se puede apreciar en la Figura N°20 es la salida negada del Flip-Flop la que se utiliza para activar la etapa de potencia. Si esta se encuentra en estado alto significa que la V_{temp} está por debajo de la V_{min} por lo tanto el circuito se cierra por acción del Triac. Por el contrario, si V_{temp} está por encima de la V_{max} , el circuito se abre.

Etapas 3: Por último, tenemos la etapa encargada de la transferencia de calor al agua. Está compuesta por un elemento resistor del tipo calefactor, un swich que en este caso corresponde a un Triac de potencia y una tensión impuesta de 220[V].

El circuito se encuentra en serie y se activa o desactiva dependiendo del control explicado en la etapa 2. Si lo hace, envía una señal de control al Gate del Triac dando paso al flujo de corriente a través de este elemento y de la resistencia calefactora.

4.5 Circuito propuesto con dos resistencias

En la siguiente propuesta se busca disminuir los periodos de tiempo en que el circuito de potencia no está activo. Esto con el objetivo de obtener una respuesta que reduzca los impactos negativos asociados a la red eléctrica. Para ello, en la Figura N°22 se presenta la segunda propuesta que presenta dos resistores en paralelo más una configuración extra en la etapa de comparación, mientras que la Figura N°23 se presenta los Gráficos de Pulsos de disparo vs V_{temp} y el de Corriente(i_o) vs Pulsos de disparo.

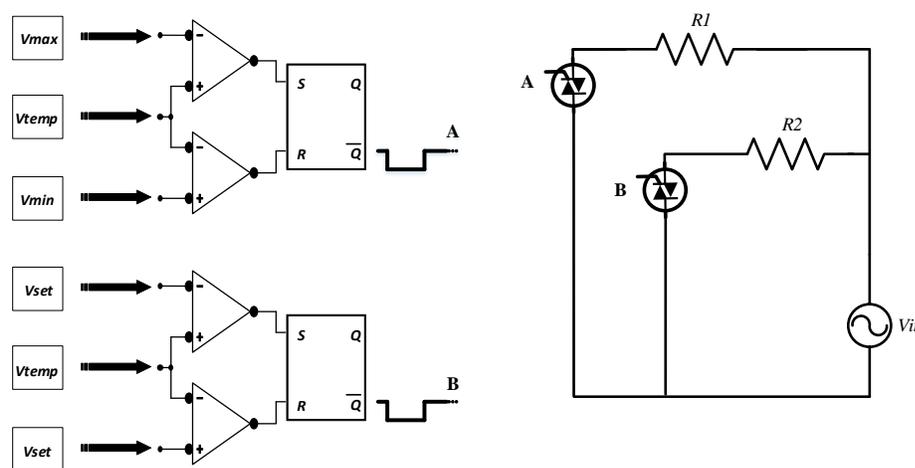


Figura N° 22: Circuito propuesta con 2 Resistencias en paralelo

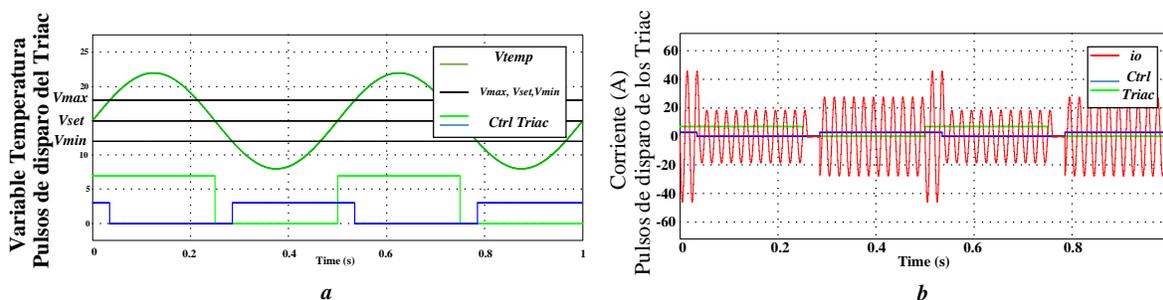


Figura N° 23: a) Pulsos de disparo vs V_{temp} b) Corriente (i_o) vs Pulsos disparo

Este circuito posee las mismas tres etapas de la primera propuesta y que a continuación se describen haciendo énfasis a los cambios realizados.

Etapa 1: Se conservan las señales V_{max} y V_{min} y a partir de estas se obtiene una nueva señal llamada V_{set} , que no es más que el promedio entre V_{max} y V_{min} , todas señales obtenidas del dato ingresado por el usuario y que se comparan con la variable medida V_{temp} .

Etapa 2: Se adiciona una nueva configuración de comparador, pero en la que ahora las señales de comparación serán entre V_{temp} y la nueva V_{set} . Para cuando V_{temp} esté por debajo de V_{set} se activa el Triac B, mientras que si V_{temp} está por encima de V_{set} este se desactiva.

El circuito comparador para activar el Triac A permanece igual que para la primera propuesta.

Etapa 3: Esta etapa corresponde a la de potencia. En esta segunda propuesta se muestra esta etapa compuesta por dos resistores y dos Triac de Potencia. Cada resistor en serie con un resistor y ambos lazos en paralelo.

4.5 Circuito propuesto con cuatro resistencias

Acá la propuesta es más ambiciosa, demostrando que tan solo utilizando algunos componentes extras los resultados mejoran considerablemente.

Agregar más resistores en paralelo ayuda a suavizar el impacto de carga sobre la red. Vimos en la primera propuesta que estar conectando y desconectando una carga tiene efectos negativos sobre la red eléctrica. Utilizando esta configuración se asegura que en todo momento se active una o la combinación de varios resistores. Así se logra reducir la frecuencia de conmutación del Triac, aumentando la vida útil de este elemento y del resistor.

En la figura N°24 se muestra el circuito proponiendo más resistores en paralelo y en la Figura N°25 se presentan los Gráficos de Pulsos de disparo vs V_{temp} y el de Corriente(i_o) vs Pulsos de disparo.

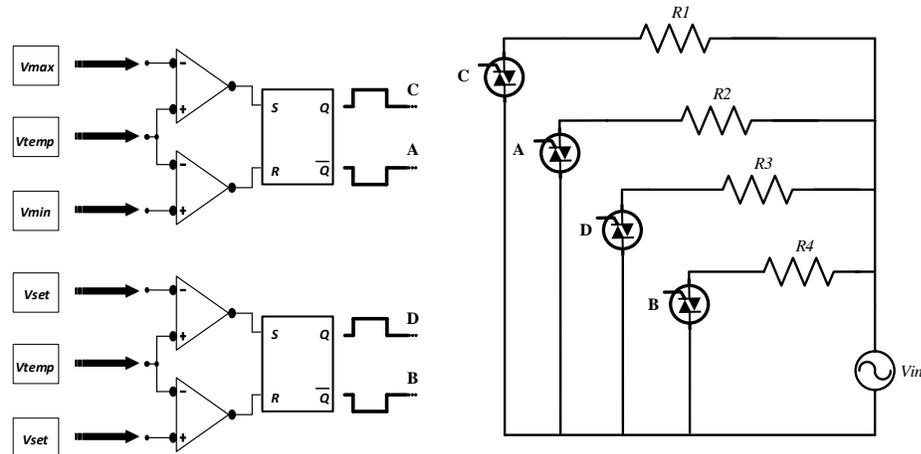


Figura N° 24: Circuito propuesto con 4 resistencias en paralelo

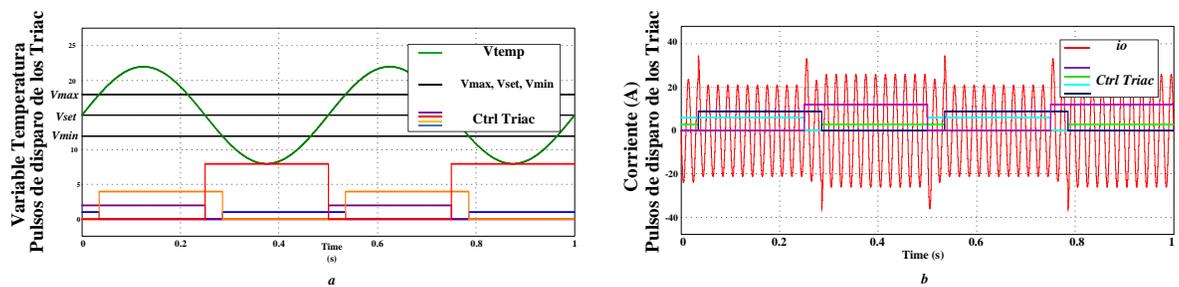


Figura N° 25: a) Pulsos de disparo vs Vtemp b) Corriente (i_o) vs Pulsos de disparo

Al igual que la propuesta anterior, este circuito está compuesto por tres etapas descritas a continuación.

Etapa 1: El dato ingresado por el usuario ya digitalizado se replica, pero a diferencia de la primera propuesta y al igual que la segunda, ésta lo hace en 3 límites diferentes siendo el nivel de temperatura seteado por el usuario V_{set} , el límite promedio entre la V_{min} y la V_{max} .

Etapa 2: Esta etapa corresponde al control, ya que es donde mediante los estados de $\pm V_{sat}$ a la salida de cada A.O., deciden los niveles High o Low a la salida de los Flip-Flop. Estos niveles High y Low responden a una serie de comparaciones entre las señales V_{min} , V_{max} , V_{temp} , V_{set} .

Etapa 3: Por último, está la etapa de potencia, en donde los resistores dispuestos en paralelo actúan al aplicar sobre sus terminales una tensión de 220[v].

Para cambiar de resistor, el circuito posee una serie de Triac de potencia, completamente controlados, que se disparan dependiendo de los niveles High o Low que entregue cada Flip-Flop.

Con cada Triac que se dispare o con una combinación de estos, se activaran la o las resistencias necesarias para mantener la variable temperatura dentro de los límites establecidos (V_{max} , V_{min}) en la etapa 1.

4.6 Conclusiones y discusión

La propuesta a base de una sola resistencia resulto ser perjudicial para la red eléctrica del domicilio. Cuando se sobrecarga la red activando y desactivando una carga resistiva, genera en la práctica bajas de tensión intermitentes por todos los terminales electricos del domicilio.

La segunda propuesta se diseñó con 2 resistores en paralelo obteniendo resultados mucho mejores. Debido a su configuración de resistencias en paralelo y las señales de disparo del Triac para activar el circuito de potencia, el impacto a la red eléctrica se redujo considerablemente.

Mientras que en la tercera propuesta se aplica sobre el control, el pulso de la salida no negada del Flip-Flop, para activar una o una combinación de resistencias que “amortiguan” la corriente. Aplicar estos pulsos extras en la tercera propuesta reduce aún más el impacto a la red eléctrica, al no dejar abierto el circuito en ningún periodo de tiempo mientras el equipo esté en funcionamiento.

5 Análisis de resultados

5.1 Introducción

Se obtuvieron tres propuestas con resultados muy diferentes. En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos de cada una de las propuestas.

La corriente es la variable que se ajusta según el control aplicado en la etapa de potencia. El control que genere menos impacto a la red eléctrica será el controlador a diseñar. Si los resultados muestran mejoras significativas con respecto al Calefactor Eléctrico de Potencia, se dará por cumplido el objetivo de este seminario.

A continuación, se hace referencia a los resultados obtenidos de las simulaciones del capítulo anterior, comparando gráficamente las ventajas y desventajas de cada uno, para finalizar con la elección de aquel que presente gráficamente el control deseado.

5.2 Datos con una sola resistencia calefactora

5.2.1 Análisis con una resistencia calefactora

La etapa de adquisición y acondicionamiento, tanto del dato ingresado por el usuario como la del dato obtenido por el sensor, se encuentra simulada correctamente. La señal acondicionada del sensor, se aplica de manera simulada como fuente sinusoidal de muy baja frecuencia y que representa el ascenso y descenso de la temperatura del agua. Mientras que la señal ingresada por el usuario es acondicionada para generar una banda de histéresis alrededor de ese punto de consigna.

Las señales de disparo para el Triac responden correctamente, activando la etapa de potencia cuando el control con histéresis detecta que la variable V_{temp} está por debajo del límite inferior de la banda de histéresis (V_{min}), lo que en la práctica será un alza de la temperatura por acción de la resistencia. Por el contrario, una vez sobrepasado el límite superior (V_{max}) se desactiva la etapa de potencia, enviando un nivel bajo al Gate del Triac. Esta acción hace que la circulación de la corriente por el resistor sea cero, cesando la transferencia de energía al agua y por ende esta se enfría nuevamente.

Esta acción se repite de forma irregular pero que para efectos de simulación se presenta como una variación cíclica.

Los datos muestran que el control está bien ejecutado, con su respectiva banda de histéresis, una correcta comparación de señales aplicadas a los A.O. y una respuesta en la etapa de potencia acorde a la acción requerida.

5.2.2 Discusión

A pesar de que en general el controlador está bien ejecutado, en la práctica representaría problemas a la red eléctrica del hogar. La frecuencia con la que se estará activando y desactivando la etapa de potencia es muy alta, producto del continuo flujo de agua fría entrando al equipo.

Este problema perjudica a la red eléctrica al generar sobreconsumos intermitentes por la acción de la carga resistiva. Con esta acción se ponen en riesgo otros artefactos eléctricos de la casa.

La alta frecuencia que requiere este sistema también genera deterioro progresivo en los elementos de control y el actuador, lo que hace de esta solución propuesta poco atractiva.

5.3 Datos con dos resistencias en paralelo

5.3.1 Análisis con múltiples resistencias calefactora

La nueva configuración agregada en esta propuesta consta de una nueva señal a comparar con V_{temp} . Se trata de V_{set} que se obtiene a partir del promedio entre V_{max} y V_{min} . A diferencia de la primera propuesta en donde el control solo se ajusta a la banda de histéresis, en esta se agrega un pulso obedeciendo a un control On-Off puro en donde el punto de consigna es V_{set} .

Agregando esta configuración se aplica al control un nuevo pulso de disparo pero que activa el Triac B en intervalos diferentes de tiempo en el que se activa el Triac A. Con esto se reduce el impacto a la red eléctrica al tener activada la etapa de potencia por un periodo más extenso de tiempo.

Tanto las comparaciones de las señales como las salidas de los Flip-Flop responden correctamente. La etapa de potencia se activa en los intervalos de tiempo definidos por la configuración de los circuitos comparadores.

5.3.2 Discusión

A pesar de mejorar la calidad de la carga en la red eléctrica, aun el circuito presenta periodos de tiempo en el que el circuito de potencia esta desactivado. Específicamente en los intervalos de tiempo donde la variable medida desciende por debajo del punto de consigna.

5.4 Datos con cuatro resistencias en paralelo

5.4.1 Análisis con múltiples resistencias calefactora

Aquí se propone diseñar tres bandas de histéresis alrededor del punto de consigna y elevar a cuatro los elementos actuadores. Con esto se logró disminuir significativamente los impactos intermitentes de sobreconsumo y aumenta la vida útil del elemento de control.

El control ejecuta bien las comparaciones y genera correctas salidas de control a pesar de haber agregado dos A.O. y dos Flip-Flop.

La ventaja en este controlador es que diseña tres bandas de histéresis con límites distintos para cada uno, aumentando el número de acciones que se pueden generar dentro de esos rangos. Así se le logra dar solución a la segunda propuesta que aun presentaba periodos en el que la corriente se hace cero.

Además, la configuración en paralelo de los resistores contribuye a mejorar el control, al poder hacer combinación de estos resistores y obtener una transferencia de energía diferente para cada estado de la variable.

Por ejemplo, en la simulación se activa la resistencia de menor valor cuando la variable está por debajo de la V_{min} , una combinación diferente para más de un Triac está activo y una de mayor valor para cuando sobrepase la V_{max} . Esto con el fin de entregar diferentes cantidades de energía en forma de calor al agua, minimizando las variaciones de temperatura, generando un control sencillo, funcional y económico.

5.4.2 Discusión

Este tipo de control a pesar de agregar elementos a su diseño, sigue siendo de un costo muy por debajo de otros equipos calefactores de agua. Si bien los problemas del primer diseño fueron resueltos, existe un problema de implementación en domicilios que cuenten con diferenciales generales de entre 10[A] y 20[A], los que normalmente encontramos en domicilios de bajos recursos económicos

Los Calefactores Eléctricos de Potencia actuales poseen un consumo máximo de entre 4500[W] y 5500[W] y un consumo medio de entre 2000[W] y 2500[W] requiriendo para su máximo consumo diferenciales superiores a 30[A] para calefaccionar el agua a niveles típicamente deseados por usuarios.

Este problema está solucionado parcialmente con este controlador, ya que, a diferencia de los calefactores actuales, este control propuesto tiene consumos de potencias que varían en relación a la temperatura del agua. Como la presión de agua que ingresa al equipo está en directa relación con temperatura de salida del mismo, mientras menos cantidad de agua pase a través del equipo menor será la potencia requerida para alcanzar el punto de consigna.

Esto quiere decir que, si el usuario requiere una temperatura deseada y no tener problemas de sobre consumo al utilizar el equipo, debe utilizar el equipo con un flujo de agua que garantice un consumo máximo de energía eléctrica por debajo de lo admitido por el diferencial general.

5.5 Conclusiones y discusión

Los resultados obtenidos para cada una de las propuestas muestran diferencias relevantes entre ellas.

En la primera propuesta los resultados fueron no admisibles al tener un impacto negativo en la red eléctrica.

La segunda propuesta a pesar de presentar mejoras en la forma de onda de la corriente aun presentaba periodos de desconexión.

La propuesta tres resulto ser la que cumple con los objetivos del Seminario de Titulo. Este diseño funciono correctamente disminuyendo el impacto a la red y se comporta como control On-Off con banda de histéresis. Además, es de bajo costo de implementación.

6 Conclusión

6.1 Sumario

En el primer capítulo se realizó una recopilación de información de equipos para calefaccionar principalmente el agua en duchas tales como: Calefon, Termotanques Solares y Termotanques Eléctricos, todas alternativas al Calefactor Eléctrico de Potencia. Se estudiaron algunas ventajas y desventajas de cada equipo, dando énfasis en el costo de adquisición y mantención de los equipos. Se describen los objetivos del Seminario de Título, la motivación del estudiante y la metodología con la que se abarca el documento.

En el segundo capítulo se describe el circuito típico de un Calefactor Eléctrico de Potencia, estudiando su funcionamiento, ventajas y problemas asociados a estos equipos. Se da una reseña de la norma 4/2003 para instalaciones de consumo en Baja Tensión para confirmar el no cumplimiento de esta norma para estos equipos. Terminando el capítulo se presenta una solución propuesta como primer acercamiento al objetivo del Seminario de Título ilustrándolo en un diagrama de bloques.

En el tercer capítulo se estudian los elementos electrónicos del lazo de control. Comenzando con las diferencias de un control analógico versus un control digital y con la elección de uno de los dos. Se dan a conocer algunos controladores según la elección del tipo de control (analógico o digital). Siguiendo el capítulo se estudian los siguientes elementos electrónicos en el lazo de control los cuales son: El Triac de Potencia, Resistencia Calefactora y el Sensor de Temperatura.

En el cuarto capítulo primero se describen las etapas que conforman el circuito controlador propuesto. Comenzando con el circuito comparador encargado de generar los pulsos de disparo según las comparaciones realizadas por los Amplificadores Operacionales en conjunto con los Flip-Flop, para seguir con el circuito de potencia encargado proporcionar la energía, la que una vez transformada, calienta el agua a través de una Resistencia Calefactora. Posteriormente se describen tres propuestas, cada una con el circuito y gráficos simulados en PowerSim.

El quinto capítulo se analizan los resultados obtenidos del capítulo anterior para cada una de las propuestas.

6.2 Conclusión

Las conclusiones de este Seminario de Título son las siguientes:

- Se cumplió uno de los objetivos principales de este Seminario de Título que comprende el bajo costo de implementación que tiene el diseño del controlador. Esto por utilizar en el diseño elementos de muy bajo costo como los son los amplificadores operacionales y los Flip-Flop.
- Es la tercera propuesta de diseño, la que contempla 4 resistores en paralelo, la que logro cumplir con todos los objetivos establecidos. Esta propuesta se basa en la conmutación de la etapa de potencia. Estas conmutaciones las aplican diferentes Triac dispuestos en paralelo y que son accionados de forma automática dependiendo de los valores seteados por los usuarios.
- Se logro eliminar en la tercera propuesta las complicaciones de la primera y segunda propuesta, las que generaban impactos negativos en la red eléctrica.
- Se concluye que este equipo puede controlar la temperatura del agua automáticamente gracias a los resultados de las simulaciones. Y también, que, en un futuro producto, este diseño dispuesto en un equipo funcional, puede cumplir con la norma 4/2003 para instalaciones de consumo en Baja tensión.

Como conclusión final del Seminario de Título, este diseño puede ser implementado a un bajo costo en un sistema de calefacción eléctrico de agua.

6.3 Trabajos Futuros

Los trabajos futuros que ayudaran a la fabricación de un prototipo y un futuro producto comercializable son:

- Mediciones reales de variables que afectan al sistema como presión, flujo y temperatura inicial del agua.
- Simulación de dinámica de funcionamiento de un Calefactor Eléctrico de Potencia para calcular los valores de las resistencias calefactoras, las dimensiones del equipo y el flujo más conveniente de agua para el correcto funcionamiento de este.
- Fabricación de un prototipo de producto con el fondo ya adjudicado Do i+T de la Macro-Facultad de ingeniería.
- Postulación a fondos concursables para lograr obtener un Producto Mínimo Viable (PMV).

7 Bibliografía

- [1] Super Intendencia de Electricidad y Combustible (SEC), «Norma chilena 4/2003 para instalaciones de consumo en baja tension». dic-2004.
- [2] Virginia Mazzone, «Automatización y Control Industrial». Universidad nacional de Quilmes-2002.
- [3] S. T. Semih Yagli, Semih Goren, «EE402- DISCRETE TIME CONTROL SYSTEMS, RECITATION 4 REPORT». MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY-2013.
- [4] J.I. Huircan, «Aplicaciones del Amplificador Operacional». Universidad de La Frontera, 2012.
- [5] I. M. de A. Carlos Cuadrado Armando Astarloa, «Electronica Industrial». Automatica y Electronica.
- [6] José Luis Giordano, «EL CALEFACTOR ELÉCTRICO (Efecto Joule) - ...» 2005.
- [7] J.Webster, «Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering». 2007.
- [8] Eugenio Wernekinck A., «Electónica Industrial Moderna». Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2007.