

Instituto Tecnológico de Costa Rica

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**Sistema automático de calibración para equipos de medición de temperatura.**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura.**

**Marco Astúa Ulloa**

**Cartago, Junio de 2007**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

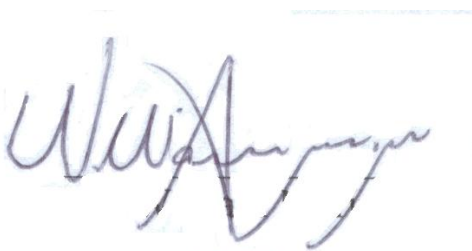
**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. William Marín Moreno.

Profesor lector



Ing. Néstor Hernández Hostaller.

Profesor lector



Ing. Jose Faustino Montes de Oca Murillo.

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

26 de Junio del 2007, Cartago

Declaro que el presente Anteproyecto ha sido realizado por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema, así como la información que haya suministrado la empresa para la que se realizará el proyecto, y aplicando e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad por el contenido de este Anteproyecto.

Cartago, 22 de enero de 2002

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'MAU', is written over a faint rectangular stamp.

Marco Astúa Ulloa

Cédula: 3-0389-333

## RESUMEN

La calibración de los equipos de temperatura es un proceso que se realiza a menudo en las empresas de alimentos y de procesos. Las máquinas automáticas de procesos realizan todos sus controles basados en las temperaturas que se presencian en los materiales a procesar.

Muchos procesos dependen en gran parte de los tiempos de exposición a ciertas temperaturas que se requieren para lograr algún producto. Por ejemplo, la pasteurización es un proceso muy importante en algunos alimentos como lácteos, salsas, etc.

Las mediciones de temperatura de las máquinas sirven para que los controles ajusten la potencia de sus hornos, resistencias o sistemas de enfriamiento, se activen a un nivel necesario para realizar el proceso que se requiere. Un valor preciso de esta medida es fundamental para el correcto funcionamiento de los equipos.

Las calibraciones *in situ* son procesos que se realizan en el lugar donde se encuentra la máquina que realiza las mediciones. Como muchos procesos de temperatura, son generalmente lentos y difíciles de controlar y estabilizar.

El siguiente proyecto tiene como objetivo general disminuir el tiempo de cada calibración, y aumentar la precisión que se obtiene en el sistema de calibración. El sistema debe estabilizar la planta lo más pronto posible, para poder realizar la calibración en tiempos menores, ahorrando costos de mano de obra profesional y complejidad de los procesos.

Palabras claves: Calibración, control, temperatura, regulador, termocuplas, estabilidad, parámetros, adquisición, MODBUS, serial, monitoreo.

## ÍNDICE GENERAL.

Capítulo 1. Introducción. ....	1
1.1. Problema existente y necesidad de su solución. ....	1
1.2. Solución seleccionada. ....	3
Capítulo 2. Meta y Objetivos. ....	6
2.1. Meta. ....	6
2.2. Objetivo General. ....	6
2.3. Objetivos específicos. ....	6
Capítulo 3. Marco teórico ....	7
3.1. Descripción del sistema de calibración anterior. ....	7
3.2. Equipos de calibración similares. ....	8
3.3. Ventajas, desventajas y limitaciones del sistema. ....	9
3.4. Principios físicos y de control del sistema. ....	10
3.5. Descripción de los elementos electrónicos necesarios. ....	16
3.5.1. Sensor. ....	16
3.5.2. Regulador. ....	17
3.5.3. Protocolo de comunicación. ....	17
3.5.4. Dispositivos mecánicos y de interfaz con el usuario. ....	18
Capítulo 4. Procedimiento Metodológico. ....	19
4.1. Reconocimiento y definición del problema. ....	19
4.2. Obtención y análisis de información. ....	19
4.3. Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución. ....	20
4.4. Implementación de la solución. ....	21
Capítulo 5. Descripción detallada de la solución. ....	23
1.1. Análisis de soluciones y selección final. ....	23
5.1. Descripción de hardware ....	25
5.1.1. Hardware de la planta. ....	25
5.1.2. Hardware del acople de potencia. ....	26
5.1.3. Hardware del regulador. ....	27
5.1.4. Hardware del sistema de comunicación. ....	32
5.2. Descripción de software. ....	32
5.2.1. Algoritmo de comunicación con el controlador ....	32
5.2.2. Algoritmo de estabilidad de temperatura ....	34
5.2.3. Algoritmo del proceso de adquisición de datos. ....	35
5.2.4. Algoritmo del proceso de calibración. ....	36
Capítulo 6. Análisis de resultados. ....	38
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones. ....	46
7.1. Conclusiones. ....	46
7.2. Recomendaciones. ....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Diagrama del sistema implementado.....	4
Figura 2. Diagrama del sistema de calibración anterior.....	7
Figura 3. Sistema de calibración de la empresa Techne.....	8
Figura 4. Sistema de calibración de la empresa Hart.....	9
Figura 5. Tiempo muerto del sistema ante una entrada escalón.....	13
Figura 6. Variación de curvas de respuesta respecto a $\xi$ con $\omega_n$ constante.....	14
Figura 7. Identificación de parámetros en la respuesta de un sistema. ....	15
Figura 8. Diagrama básico de comunicación MODBUS. ....	17
Figura 9. Planta implementada en el sistema.....	26
Figura 10. Ejemplo de suma de verificación de LCR para la comunicación MODBUS.....	29
Figura 11. Relaciones de las constantes de control del sistema de regulación.....	30
Figura 12. Diagrama del algoritmo de comunicación MODBUS.....	33
Figura 13. Algoritmo de la verificación de la estabilidad de temperatura del sistema implementado.....	34
Figura 14. Algoritmo del proceso de adquisición de datos.....	35
Figura 15. Algoritmo implementado del proceso de calibración.....	37
Figura 16. Datos tomados de la planta implementada.....	38
Figura 17. Respuesta ante el escalón del modelo del sistema calculado para la planta.....	39
Figura 18. Respuesta real del sistema ante un escalón. ....	39
Figura 19. Respuesta ante el escalón del sistema de orden de grado 2.....	40
Figura 20. Datos obtenidos del sistema con una temperatura de ajuste de 60°C, $K_p = 5$ , $K_i = 1$ , $K_d = 1$ .....	41
Figura 21. Datos obtenidos del sistema con una temperatura de ajuste de 80°C, $K_p = 3.5$ , $K_i = 1$ , $K_d = 1$ . ....	42
Figura 22. Respuesta al escalón del sistema regulado con temperatura de ajuste de 60°C con $K_p = 7.7$ , $K_i = 735$ , $K_d = 183$ .....	43
Figura 23. Respuesta al escalón del sistema regulado con temperatura de ajuste de 80°C con $K_p = 7.7$ , $K_i = 735$ , $K_d = 183$ .....	43
Figura 24. Grafica realizada por el sistema en la calibración de una máquina ABB Commander. ....	44

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Valores de los rangos e incertidumbres de las termocuplas más comunes. ....	16
Tabla 2. Comparación entre termocuplas a distintas temperaturas.....	24
Tabla 3. Registros internos de lectura y escritura en el controlador DTA. ....	27

## **Capítulo 1. Introducción.**

En este capítulo el lector encontrará un resume de la importancia de la calibración en equipos industriales y de los problemas que se presentan a la hora de calibrar equipos con mediciones térmicas. Asimismo, la importancia y la necesidad de integrar una solución. Además, se incluye una descripción sobre el sistema implementado y sus principales características.

### **1.1. Problema existente y necesidad de su solución.**

RF Automatización es una empresa que realiza distintos trabajos de automatización, en distintas áreas. La mayoría de éstos se enfocan principalmente en el control industrial de máquinas de procesos en las cuales se ocupan varios equipos de medición de variables y secuencia. Esto es, en un proceso automático de una máquina de producción se debe medir y controlar diversas variables para poder realizar su acción en determinado tiempo y con determinada secuencia y precisión, esto define la calidad del producto y la rapidez del proceso de producción.

Para un adecuado proceso, se deben tomar varios detalles en cuenta en las mediciones y la ejecución del proceso. Los equipos deben estar calibrados para realizar de forma precisa sus procesos, ya sea en la ejecución o la toma de variables. Si un equipo está descalibrado, la medición de variables es incorrecta, o al menos, imprecisa. Esto produce que, en días distintos, se obtengan productos distintos y de menor calidad.

Un ejemplo aplicado a la medición de temperatura: las máquinas de pasteurización aumentan el calor en un líquido hasta determinada temperatura para matar los patógenos que descomponen los alimentos. En el caso de la leche, se lleva hasta 138°C. Cuando se compra la máquina, el sistema está calibrado, y detiene el proceso hasta que la temperatura medida en la leche, sea de 138°C. Con paso del tiempo, el equipo se descalibra, y se producen lecturas imprecisas en la leche, por lo que el proceso no llega a la temperatura requerida para la correcta pasteurización, por ejemplo, 136°C. Con esta temperatura no se puede obtener una pasteurización adecuada, y la leche puede contener más patógenos que la fabricada hace unos meses.

Todos estos procesos están regulados por organismos internacionales tales como la FDA (Food & Drug Administration), entidad gubernamental estadounidense determinante en las exportaciones de productos costarricenses a otros mercados.

Muchas empresas certifican su calidad asegurando que sus productos son fabricados bajo las mismas condiciones en todo momento, ya que se siguen estándares que aseguran un producto idéntico basados en procesos certificados.



RF Automatización se encarga de realizar el proceso de calibración para que los productos fabricados por el cliente, se mantengan dentro de los estándares.

Para realizar la calibración, se deben cumplir normas establecidas por distintas organizaciones de estandarización y se utilizan instrumentos de precisión, certificados por organismos internacionales, como la NIST<sup>1</sup> (National Institute of Standards and Technology) bajo la norma ITS-90 (International Temperature Scales of 1990). Estos equipos son costosos por su proceso de validación, pero aseguran un instrumento patrón que ha sido probado con los equipos de temperatura más sensibles del mundo.

El proceso de calibración se puede realizar de varias maneras, según las organizaciones de estandarización. En la empresa, se utiliza el estándar de *comparación por constantes físicas* y se utilizan los procesos dados por la NIST<sup>1</sup> que consiste en colocar el instrumento a medir a varias temperaturas estables mediante un ambiente controlado y tomar mediciones de la desviación de la temperatura que se observa entre el equipo a calibrar y el calibrado.

El método que realizaba la empresa, consistía en controlar un calentador de agua de 300W, estilo “baño maría”, que coloca la temperatura del agua a un cierto valor (por ejemplo 80°C), medido con instrumentos de precisión, y mantener ésta temperatura estable. Después de esto, se varían éstas temperaturas para obtener de 5 a 10 mediciones, y con los datos obtenidos, se realiza un análisis de la curva generada por el instrumento patrón y el sensor que se calibra. Variables como “span” y “offset” se ajustan en el equipo. Luego se prueba nuevamente para validar los datos obtenidos dentro del margen de error permisible.

A diferencia de otras empresas que realizan calibraciones, RF realiza la calibración *in situ*, lo que presenta una gran ventaja para compañías que no pueden trasladar sus equipos a laboratorios de calibración. Esta característica sujeta el proceso a variables como la ubicación de los instrumentos a medir, y la posibilidad de trabajar en lugares planos para poner los instrumentos como el calentador.

El proceso necesario para tomar las mediciones del equipo era particularmente lento, debido a que la temperatura del agua debe ser uniforme en todos los puntos y a la potencia de la resistencia eléctrica. Además, se debía comprobar que la temperatura es estable. Esto se hace comprobando que la diferencia de temperatura durante 5 minutos es menor que 1°C.

Las mediciones para poder determinar la temperatura del calentador se realizaban de forma manual. Esto requería largos tiempos para realizar este proceso, y no se contaba con una forma de observar y almacenar los datos del calentador de manera automática, que agilice la adquisición de datos. Todas estas repercusiones afectaban a la empresa de forma económica ya que el personal para realizar las calibraciones debe ser personal calificado y se debe trasladar el equipo a la planta donde se necesita realizar la calibración.

---

<sup>1</sup> NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.

El problema se puede resumir de forma sintética de la siguiente manera: Para la empresa RF Automatización, el proceso para la calibración del equipo de medición de temperatura en sistemas de control, que cumpla las normas NIST, es lento debido a la complejidad de los métodos para la adquisición de datos de temperatura y a la creación de un ambiente térmico controlado.

Las ventajas que permite el sistema que se implementó es la reducción del tiempo requerido por el profesional en el proceso, esto disminuye los costos de mano de obra profesional y brinda disponibilidad de personal. Además, la empresa se asegura que el proceso de calibración será idéntico en todos los lugares, promoviendo la estandarización. A nivel de imagen, la empresa se ve beneficiada en el sentido de que muestra a sus clientes que sus procesos de calibración son automáticos, y los procedimientos humanos, más expuestos a fallas, son menores, ya que el software realiza de forma automática la detección de variables de forma continua y repetida.

## **1.2. Solución seleccionada.**

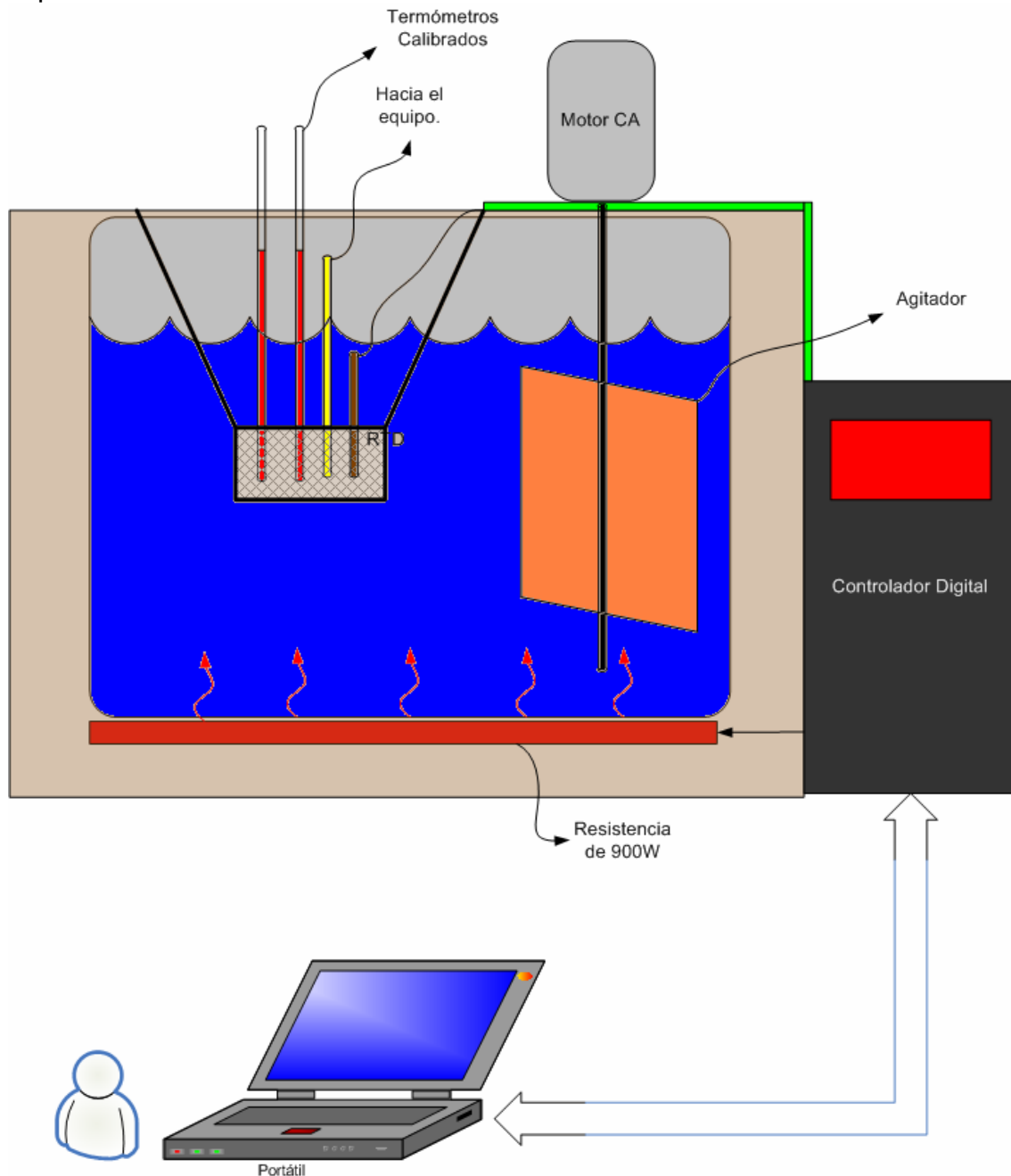
La empresa requiere disminuir el tiempo de calibración al menos a la mitad (el proceso con el sistema anterior duraba entre tres y cuatro horas) y facilitar el proceso de adquisición de datos. Además, el sistema también tiene como propósito estandarizar los procesos de calibración en las empresas, y en la medida de lo posible, utilizar elementos ya adquiridos por la empresa.

Debido a todos los pasos que se deben realizar para poder calibrar los instrumentos, el sistema debe ser capaz de hacer más ágil y rápido los procesos necesarios para calibrar el equipo. Además, debe tener una interfaz amigable y fácil de usar, para obtener datos sobre las mediciones de temperatura en varios puntos del calentador.

Todas estas características fueron tomadas en cuenta a la hora de hacer el diseño de la solución a implementar. La solución consiste en construir el equipo necesario para realizar un control rápido y preciso de temperatura en el calentador, implementando una nueva planta con mejores características dinámicas y estáticas, principalmente el tiempo de subida (rise time) y el tiempo de estabilización, ya que un punto importante es acelerar el calentamiento del agua para disminuir el tiempo de la calibración. Además, se debe implementar un sistema de control que regule la planta, de tal forma que sus características de control se mantengan dentro de los márgenes establecidos por la empresa.

Es también requerido un sistema de comunicación entre la planta y un computador, de tal forma que el operador no necesite estar en el lugar de la planta para modificarla o regularla. El computador debe tener un programa especializado que pueda interactuar con el metrólogo que realiza la calibración y brindarle la información que considere necesaria para su trabajo y almacenar los datos obtenidos para informes o comprobaciones. El programa debe correr en cualquier sistema de la empresa, ya sea Windows XP, 2000 o NT.

Para mejorar el tiempo del proceso, se implementó un nuevo diseño de planta que cuenta con una resistencia eléctrica del triple de potencia del valor inicial (900W), y plana, para incrementar el área de contacto de ambas superficies. Al inicio del proyecto, se sugirió utilizar resistencias laterales que también incrementarían el calor por los lados, pero al investigar esta posibilidad, se descartó por peligro a que las resistencias laterales sufrieran daños por recalentamiento. El siguiente diagrama muestra el tipo de sistema que implementó.



**Figura 1.** Diagrama del sistema implementado.

La Figura 1 muestra la forma en cómo se realizan las comunicaciones en todos los equipos. El usuario final desde el computador portátil, puede observar, monitorear y guardar datos del proceso de calibración. Los cambios físicos realizados a la planta tienen como objetivo mejorar las características dinámicas y estáticas. Esto se realiza con el fin de implementar un sistema de control sobre una planta más rápida y de mayor potencia, con una agitación mecánica que disminuye las diferencias de temperatura respecto a la altura del sensor. La planta diseñada debe aproximarse a una modelo de orden no mayor a dos, y se utilizarán herramientas de computación como Matlab y Excel para la obtención y análisis de tales modelos.

El sistema que se desea implementar tiene como objetivo disminuir la complejidad y el tiempo del proceso. Por esto, se desea automatizar en lo posible la adquisición y tratamiento de datos, y que permita al metrólogo tomar decisiones sobre el proceso cuando son necesarias.

## **Capítulo 2. Meta y Objetivos.**

### **2.1. Meta.**

Reducir el tiempo del proceso de calibración a hora y media y simplificar el proceso de calibración automatizando la toma de datos del instrumento patrón en la empresa RF Automatización.

### **2.2. Objetivo General.**

Implementar un sistema de calibración de equipos de temperatura con una precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , que permita al usuario modificar y obtener, datos de la planta mediante una interfaz gráfica en computadora.

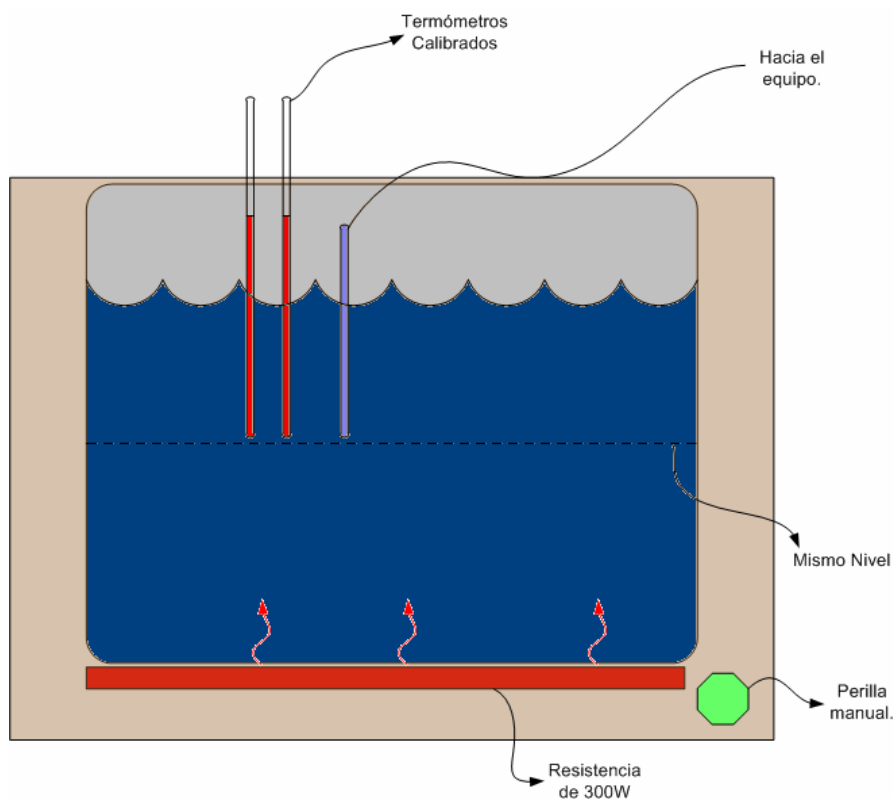
### **2.3. Objetivos específicos.**

- Diseñar una planta que reduzca el tiempo de calentamiento a la mitad y disminuya las diferencias de temperatura del agua en distintos niveles a  $0.5^{\circ}\text{C}$ .
- Describir mediante el modelo matemático de la planta, sus características dinámicas y estáticas.
- Diseñar un controlador capaz de controlar dicha planta para que el error de estado estacionario sea menor a  $0.5^{\circ}\text{C}$ , el sobreimpulso menor del 1%, el tiempo de estabilización de 5 minutos y el tiempo de subida de 15 minutos.
- Implementar el compensador físico en la planta.
- Diseñar el sistema de comunicación entre el controlador y la computadora portátil.
- Diseñar un programa capaz de comunicarse con el controlador mediante los puertos de un computador portátil.
- Diseñar un programa en alto nivel capaz de utilizar Excel para calcular y desplegar información requerida por el metrólogo.

## Capítulo 3. Marco teórico

### 3.1. Descripción del sistema de calibración anterior.

Inicialmente, la planta que realizaba la función de calentar el agua hasta cierta temperatura y mantenerla estable, consistía en una resistencia eléctrica que calienta una parte del calentador, y con ello, el agua distribuye el calor, aunque no necesariamente de forma uniforme, por lo que era necesario agitar el agua de manera manual, el siguiente diagrama muestra el funcionamiento.



**Figura 2.** Diagrama del sistema de calibración anterior.

Para el sistema anterior, el agua se calentaba mediante la resistencia de 300W, tipo serpentina, ésta genera energía en forma de calor que es interceptada por el agua, debido a la diferencia de temperatura entre la resistencia y el agua. En cada nivel, el agua tiene una temperatura aproximadamente uniforme, que varía según la cantidad de energía que entrega la resistencia eléctrica.

Para calibrar un equipo, se colocaban las puntas de los termómetros calibrados y el equipo (generalmente RTDs conectados a graficadores) en un mismo nivel de altura, y se espera a que la diferencia de temperatura en el agua durante 5 minutos no sea mayor a 1 grado. Este método asegura que el agua en ese punto está estable y se pueden tomar los datos del medidor a calibrar y el patrón.

El sistema que se utilizaba contaba con varias deficiencias. La primera y principal, la gran cantidad de tiempo requerido para el calentamiento. Como son varios puntos de calibración, el tiempo para ajustar cada una de las temperaturas debe ser corto. La segunda, la imprecisión, el sistema no era capaz de ajustar una temperatura, si no solamente de entregar menor o mayor potencia al agua mediante una perilla. La tercera, la falta de una canasta o recipiente que sostuvieran los medidores en el mismo punto durante toda la calibración. Otras desventajas como la no uniformidad del agua en el recipiente y la necesidad de estar monitoreando manualmente los instrumentos para comprobar la estabilidad son igualmente importantes. Todos estos problemas son los que generan el gran consumo de tiempo y la complejidad innecesaria para ajustar los equipos.

### 3.2. Equipos de calibración similares.

En el mercado, existen varios fabricantes de equipos de calibración de precisión que contemplan varias características.

La empresa Techne ofrece sistemas de calibración con un grado de estabilización de  $0.01^{\circ}\text{C}$ , con diferentes capacidades de almacenamiento de líquido.



**Figura 3.** Sistema de calibración de la empresa Techne<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Fuente: <http://www.techneusa.com/tempcalibration/calibrationbaths.htm>

El sistema se puede comunicar con la computadora mediante un programa propio de la empresa Techne, pero no almacena ni calcula datos para el metrólogo, sólo ajusta sus parámetros como la temperatura requerida, trabaja para temperaturas mayores de 25 ° C. Su precio ronda entre los \$500 y los \$2000 dependiendo de la capacidad de agua y precisión.

La empresa Hart tiene un baño de calibración portátil que posee enfriamiento y calentamiento, con una estabilidad de temperatura de 0.02°C, y que puede comunicarse con un software propio de la empresa mediante el puerto RS232.



**Figura 4.** Sistema de calibración de la empresa Hart<sup>3</sup>

El precio de estos baños ronda entre los \$3200 y los \$4500. Además, presenta la desventaja que el software de la empresa puede no ser el adecuado por el metrólogo y no puede ser modificado.

Existen varios tipos parecidos en el mercado de baños de calibración térmicos, algunos con mayores ventajas para la necesidad de la empresa, y con precios que dependen de de la precisión, comodidad y facilidad de transporte.

### **3.3. Ventajas, desventajas y limitaciones del sistema.**

La ventaja principal del sistema que se quiere implementar es que el software que se comunica con el baño de calibración debe ser a la completa medida del metrólogo de la empresa, donde presenta las necesidades y las utilidades que debe tener el sistema. Otra ventaja es que se tiene el código abierto para realizar modificaciones en caso de mejorar o renovar el sistema.

Otra de las ventajas es que el sistema puede manejar varias plantas al mismo tiempo, esto es, en el caso de que se construya una nueva planta, se puede comunicar con el mismo programa ya que usa comunicación RS485, y permite comunicarse con los dispositivos con sólo diferenciar sus números de acceso.

<sup>3</sup> <http://www.hartscientific.com/products/bathsindex.htm>



Además, los costos son menores, ya que se usa equipo existente en la empresa, y se mejora la imagen de la empresa al implementar sus propios equipos computacionales y mecánicos.

Una desventaja del sistema con respecto a otros equipos en el mercado es que su estabilidad tiene una incertidumbre de 0.1°C, mientras que para los sistemas de precisión analizados poseen estabilidades en 0.01°C o menos. Sin embargo, en las validaciones de calibración *in situ*, el rango de 0.1°C es adecuado.

Cabe resaltar que a pesar de que el equipo tiene una estabilidad menor a 0.1°C, no se puede asegurar que la temperatura esta donde se indica la medición del sistema en sí. Esto pasa por que los medidores de temperatura electrónicos presentan desviaciones en su medida de forma más común que los termómetros de mercurio y kerosén calibrados y certificados. La función del baño de calibración es entonces, colocar la temperatura del agua en un valor estable cercano al punto que se desea comparar los instrumentos, que permita al metrólogo introducir el instrumento patrón certificado junto con el instrumento a calibrar para realizar las dos mediciones y así comparar<sup>4</sup>. Es por eso que los baños de calibración en el mercado no muestran la precisión de la medida, más bien presentan la precisión de la estabilidad.

### 3.4. Principios físicos y de control del sistema

El método que utiliza el baño de calibración es el calentamiento del agua por medio de conducción. Este tipo de calefacción se da por el contacto de dos superficies, una más caliente que otra, que genera un intercambio de energía entre el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. En la transferencia de calor por conducción, no existe intercambio de materia, a diferencia de la transferencia por convección.

Si suponemos que la transferencia de calor se da solamente hacia arriba de la resistencia, en dirección al agua (carga térmica), entonces, la forma en como se relacionan la velocidad de la transferencia de calor  $Q_y$ , por cierta área de contacto  $A$ , con la variación de las diferencias de temperaturas de ambos cuerpos  $\frac{\partial T}{\partial y}$ , es proporcional, y se define como:

$$Q_y = \lambda \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1)$$

---

<sup>4</sup> NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.

El símbolo  $\lambda$  es la constante proporcional y está definida como la conductividad térmica. En sí, es la capacidad intrínseca de un elemento de transmitir el calor.

Para nuestro caso, el agua tiene un coeficiente de  $0.58 \frac{W}{m \cdot K}$ <sup>5</sup>, o sea, actúa como disipador de calor. Por esta razón, la velocidad con la que se transmite el calor en el agua es más lento que en otros materiales como los metales, y depende en su mayoría de la diferencia de temperatura entre la resistencia y el agua.

La inercia térmica es la propiedad de la materia que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con la que cede o absorbe calor con el entorno. La capacidad calorífica es una forma de medición de la inercia térmica, y se define como la cantidad de energía necesaria para cambiar su temperatura en 1°C. La capacidad calorífica responde a cuánta energía se le debe aplicar al recipiente para variar su temperatura en 1°C. La ecuación se define como:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \left[ \frac{J}{K} \right] \quad (2)$$

Esta cantidad depende de la cantidad de masa que tenga el objeto, para el caso del agua, entre más volumen coloquemos en el baño de calibración, se requerirá más calor para provocar un cambio de temperatura. Por eso, se puede definir la capacidad calorífica en términos de la masa y del calor específico.

$$C = c \cdot m \quad (3)$$

Donde  $c$  es el calor específico correspondiente al agua, y se interpreta como la cantidad de calor que se requiere para cambiar en 1°C la temperatura del cuerpo por unidad de masa, sus unidades son  $\left[ \frac{J}{Kg \cdot K} \right]$ . Esta cantidad es constante mientras no se realice un cambio de estado en el cuerpo.

Para el caso del agua, su calor específico tiene un valor de  $418 \left[ \frac{J}{Kg \cdot K} \right]$ <sup>6</sup> para el rango de temperaturas de operación del sistema, o sea, se ocupa dar a un kilogramo de agua la cantidad energía de 418J para que cambie un grado. El recipiente tiene capacidad aproximada de 1 galón (3.7 litros), por lo que su masa es de 3.7Kg, ya que la masa y el volumen del agua tienen una razón de 1. La capacidad calorífica para el sistema es entonces:

$$C = 1547 \frac{J}{K} \quad (4)$$

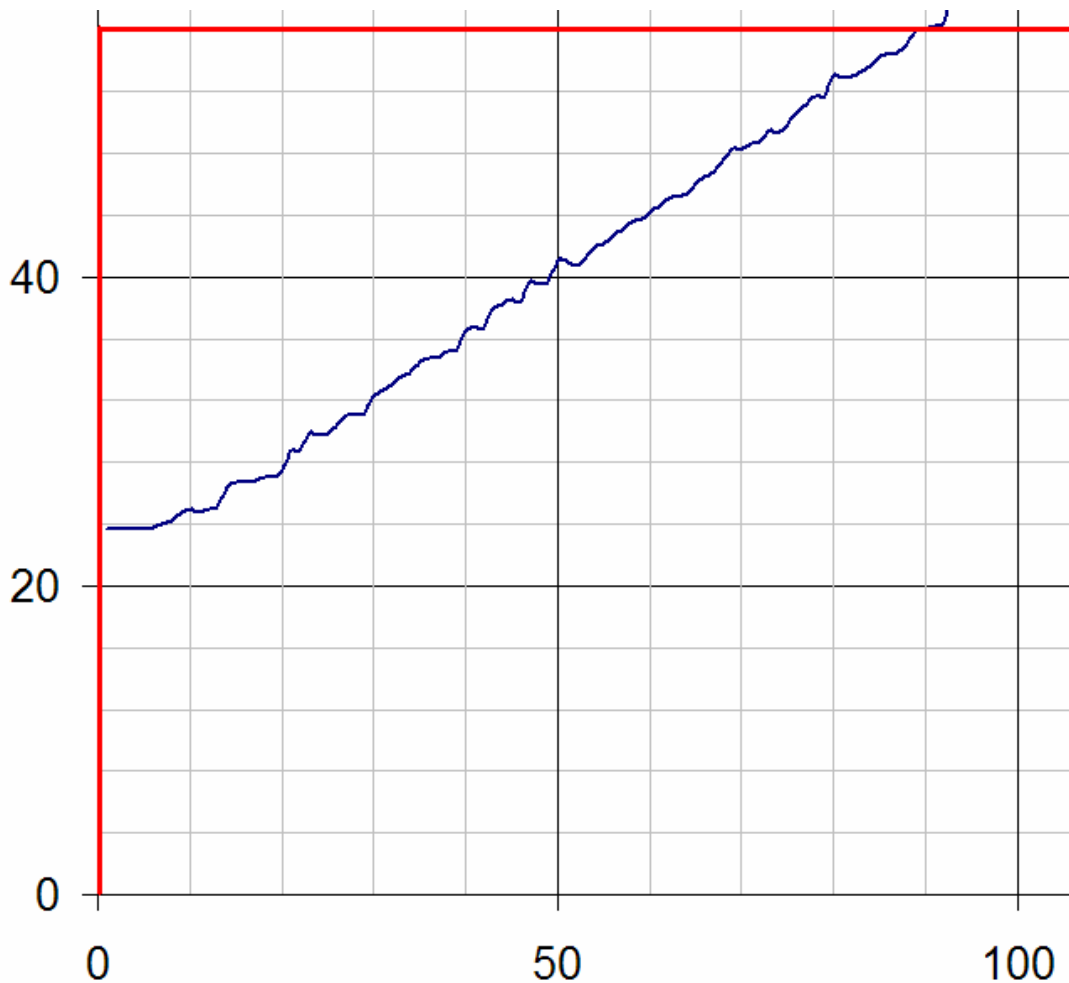
---

<sup>5</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n\\_de\\_calor](http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n_de_calor)

<sup>6</sup> <http://www.cneq.unam.mx/adela/archivos/termoquimica.htm>

Para realizar una comparación entre los sistemas, se harán los siguientes cálculos. Con el sistema inicial de calibración, se utilizaba una resistencia de 300W para calentar el agua, o sea, la resistencia podía entregar una energía de 300J cada segundo. Esto indica que para poder variar en un grado la temperatura del agua, se necesitaba durar más de 5 segundos calentando el recipiente (aclárese que esto no quiere decir que el agua dura 5 segundos en llegar a cambiar la temperatura, lo que quiere decir es que hay que aplicar energía durante 5 segundos para que, en algún momento, la temperatura del agua cambie un grado). La nueva resistencia puede entregar 900J de energía cada segundo, o sea, requiere menos de 2 segundos en brindar la energía para elevar la temperatura la misma cantidad. Estos cálculos son teóricos, y no toman en cuenta las pérdidas de potencia en los materiales, la pérdida con el aire y los tiempos de reacción del sistema, por lo que se tarda más en calentar el agua.

Como se observa, se necesita una cantidad grande de energía para poder generar un cambio significativo de temperatura. Para una resistencia de potencia constante, se debe aplicar energía por varios minutos para cambiar la temperatura. Sin embargo, debido a que la velocidad de transferencia de calor depende de la diferencia de cambio de temperatura, si se aplica por mucho tiempo la energía que se da es mayor que la que se requiere, y el sistema tendrá un sobreimpulso aún cuando se retire la energía tiempo atrás. O sea, el sistema tiene un tiempo muerto que se debe tomar en cuenta a la hora de hacer el regulador. La gráfica siguiente muestra el tiempo que dura el sistema (azul) en reaccionar ante un escalón (rojo).



**Figura 5.** Tiempo muerto del sistema ante una entrada escalón.

Se puede observar que el sistema dura casi 10 segundos en empezar a realizar un cambio de temperatura, esto es consecuencia de la velocidad de transferencia de calor del agua.

Dado que la resistencia es ahora 900W, ésta consume una corriente de

$$I = \frac{P}{V} = \frac{900W}{120V} = 7.5A \quad (5)$$

Por ser una resistencia, no está desfasa respecto al voltaje, por lo que el cálculo anterior es válido. Esta magnitud debe tomarse en cuenta a la hora de seleccionar el equipo con el que se trabaja, como reles, cables, etc.

Para controlar la nueva planta, se debe aplicar un compensador adecuado basado en las especificaciones requeridas. Es necesario obtener un modelo de planta satisfactorio con el sistema, esto es, que su respuesta teórica sea similar a la respuesta práctica.

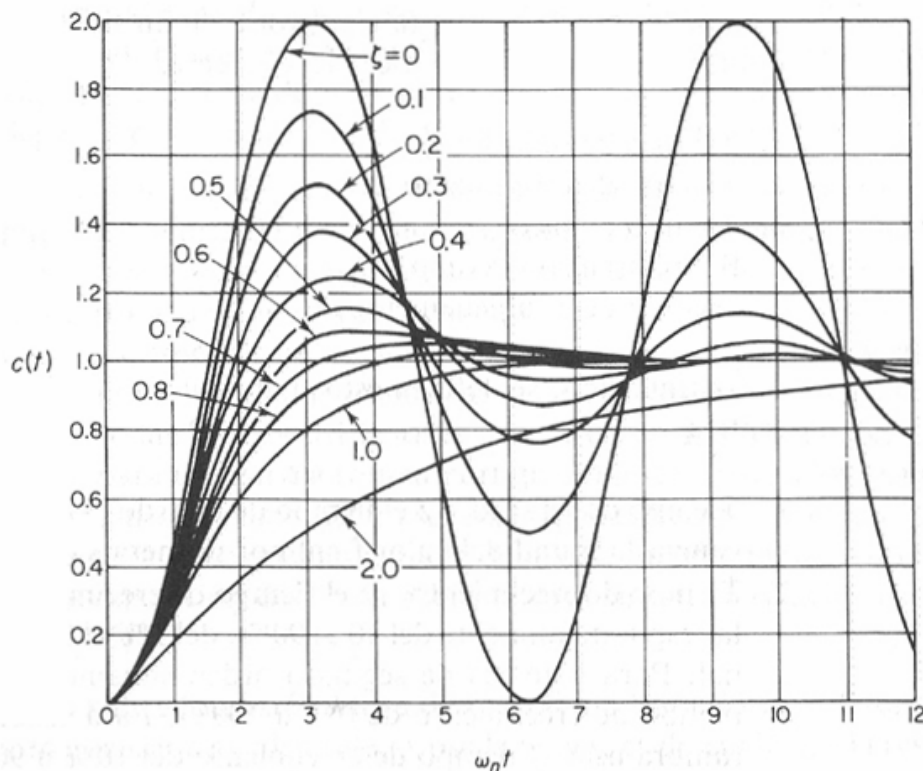
Este sistema se puede aproximar con varios modelos experimentales. Sistemas sencillos como el que se piensa analizar, puede ser aproximado a sistemas de segundo orden. En tiempo continuo, una función de transferencia de un sistema de segundo orden se describe de la siguiente manera.

$$G_{(s)} = \frac{\omega_n}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n + \omega_n^2} \quad (6)$$

Estos sistemas son muy utilizados por que su función describe con los parámetros  $\omega_n$ , conocido como *frecuencia natural no amortiguada* y  $\xi$ , conocido como la *relación de amortiguamiento del sistema*, sus características dinámicas.

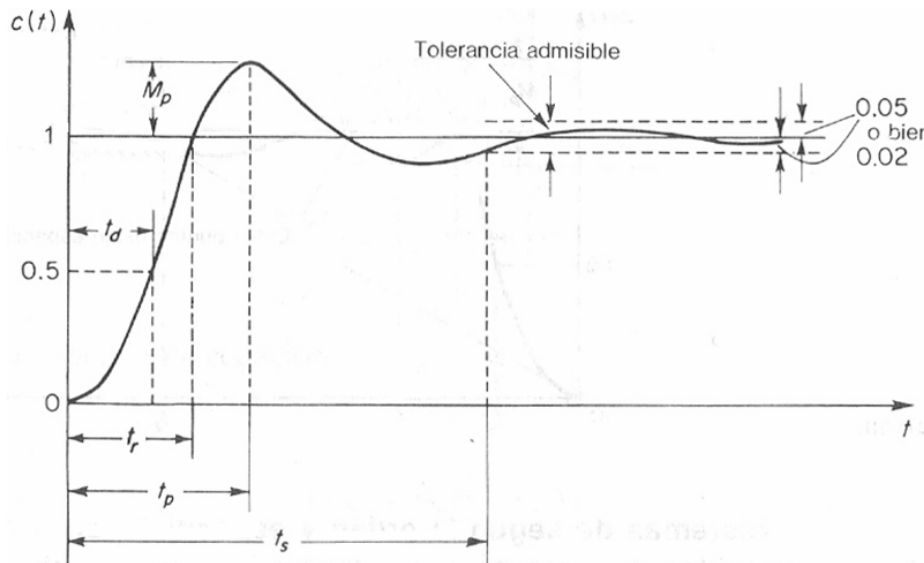
Dependiendo del valor de  $\xi$ , el sistema puede llegar a ser estable o inestable, cuando  $\xi > 1$ , el sistema se denomina como *sobreamortiguado*, y se conoce por ser lento en llegar a su valor final pero sin sobreimpulso. Cuando  $\xi = 1$ , el sistema se conoce como *críticamente amortiguado*, y llega de forma más rápida a su valor final, y también sin sobreimpulso, por último. Cuando  $\xi < 1$ , el sistema se conoce como *subamortiguado*, y presenta sobreimpulso, y llega más rápido al valor final.

La siguiente gráfica muestra estas variaciones cuando se aplica un escalón en la entrada del sistema. Se puede observar las distintas curvas que se obtienen cuando se varía  $\xi$  y se mantiene constante  $\omega_n$ .



**Figura 6.** Variación de curvas de respuesta respecto a  $\xi$  con  $\omega_n$  constante

En los sistemas de control, las comparaciones entre uno u otro sistema depende de parámetros que describen el comportamiento transitorio de ambos, y con esto, elegir el adecuado. Estos parámetros se pueden observar en la siguiente figura.



**Figura 7.** Identificación de parámetros en la respuesta de un sistema.

Estos parámetros definen ciertas características del sistema, se dará una breve explicación.

*Tiempo de retardo  $t_d$* : Tiempo que le toma al sistema alcanzar la mitad del valor final.

*Tiempo de crecimiento  $t_r$* : Existen varios criterios. En este documento utilizaremos el descrito en [1]. Como el tiempo en que dura el sistema en pasar de 0% a 100% de su valor final.

*Tiempo de pico  $t_p$* : Tiempo necesario para que la respuesta alcance el primer pico.

*Sobrepulso  $M_p$* : Es el cociente del valor pico máximo que alcanza la respuesta menos su valor final, y el valor final del sistema. Representa el porcentaje de cuánto se pasó la respuesta.

*Tiempo de estabilización  $t_{2\%}$  y  $t_{5\%}$* : Estos parámetros son los tiempos en los cuales la respuesta no excede el valor de 2% o 5% de su valor final.<sup>7</sup>

Para realizar el control de la planta y limitar estos parámetros a valores definidos, requerimos obtener un modelo de la planta basado en cálculos experimentales. Existen varias formas de realizar este modelo, pero en el proyecto se utilizará el método estocástico por la existencia de herramientas computacionales que realizan el cálculo.

<sup>7</sup> Ogata, K. (1993) *Ingeniería de control moderna*. (Segunda Edición), México, Prentice-Hall Hispanoamericana.

El método estocástico consiste en un algoritmo que utiliza las mediciones tomadas a la planta con un cierto tiempo de muestreo al aplicar un escalón unitario en su entrada. El modelado estocástico por el método de mínimos cuadrados ha sido implementado en varios lenguajes, entre ellos, Matlab.

### 3.5. Descripción de los elementos electrónicos necesarios.

#### 3.5.1. Sensor.

Para medir la temperatura en el agua, se requiere un sensor que pueda brindar una variable eléctrica que sea proporcional con la temperatura que posee. Estos sensores pueden ser de dos tipos:

*RTD (resistance temperature detector):* Estos son sensores metálicos, generalmente de platino, que varían su resistencia eléctrica conforme se varía la temperatura, conforme al principio de Davy. Aunque no son completamente lineales sus relaciones, para un rango específico se puede aproximar. Su nombre depende de la resistencia que tenga el elemento a 0°C, existen Pt100, Pt1000 y Pt10000, entre otras. Presentan la ventaja de que pueden estar a varios metros del receptor o controlador, y se comunican con cable corriente.<sup>8</sup>

*Termopares (Termocuplas):* Estos sensores consisten de la unión de dos metales. Se basan en el principio de Seebeck, que dice que la unión de dos metales distintos, producen una diferencia de potencial en uno de sus extremos. Esto produce que conforme se haga un cambio de temperatura en la unión, los extremos del termopar tienen un voltaje distinto.<sup>9</sup>

Existen varios tipos de termopares, que se han estandarizado por la combinación de sus metales. Cada una tiene rangos de operación y precisiones distintas, las más conocidas se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 1.** Valores de los rangos e incertidumbres de las termocuplas más comunes.<sup>10</sup>

Tipo	Unión	Rango (°C)		Incertidumbre
E	Cromel	-200	900	±1.7
	Constatan			
T	Cobre	-200	350	±1
	Constatan			
J	Hierro	0	750	±2.2
	Constatan			
K	Cromel	-200	1200	±2.5
	Alumel			
S	Platino	0	1600	±1.5
	Platino Rh (10%)			

<sup>8</sup> <http://www.me.ucsb.edu/~mclean/me105/lectures/Lec1&2.pdf>

<sup>9</sup> [http://www.viditec.com.ar/prensa/prensa\\_art\\_18.htm](http://www.viditec.com.ar/prensa/prensa_art_18.htm)

<sup>10</sup> Ídem

Entre las ventajas de las termocupas se encuentran su precio, su amplio rango y sus tiempos de respuesta ante los cambio de temperatura.

### 3.5.2. Regulador.

Para poder controlar el sistema, es necesario tomar en cuenta los aspectos de tiempo muerto, potencia del sistema, y se requiere un regulador que permita modificar estas características, ya que el ambiente donde se va a someter no es siempre constante, por ejemplo, en ocasiones, se debe calibrar el sistema en cuartos fríos, donde la temperatura del ambiente es menor que la normal. También en lugares calientes y húmedos como cuartos de calefacción. Todas estas variaciones deben ser tomadas a la hora de la implementación del regulador.

### 3.5.3. Protocolo de comunicación.

Como se piensa brindar la posibilidad de comunicar varios equipos a un mismo software en una computadora, se utilizará un equipo de comunicación que permita utilizar un “bus común”, que tenga a todos los equipos en comunicación con el central, en este caso, el computador. La estructura que se sugiere es la de comunicación MODBUS ASCII, que presenta la ventaja de referenciar cada uno de los equipos con un número

La estructura de MODBUS ASCII consiste en cadenas de caracteres maestro-esclavo, que, según su posición en el mensaje, realiza cierta función. El siguiente diagrama muestra un esquema básico.

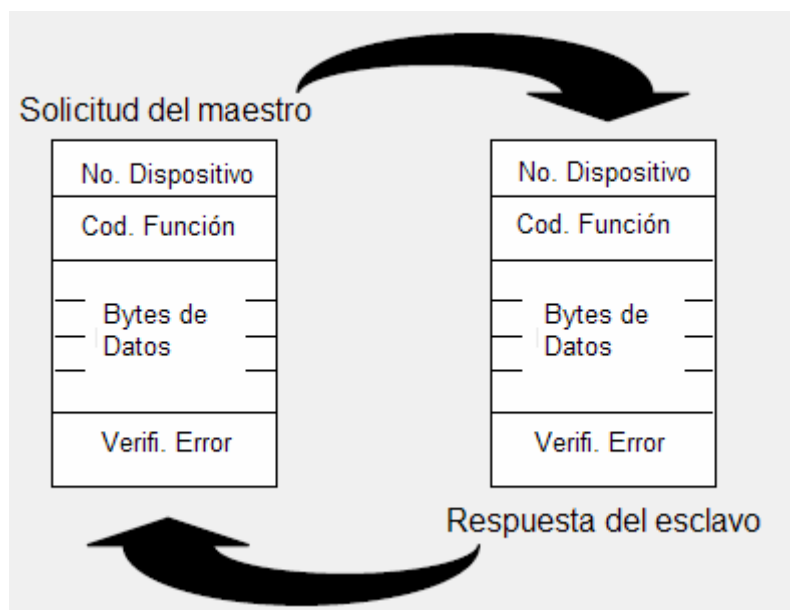


Figura 8. Diagrama básico de comunicación MODBUS.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Fuente: Modicon Modbus Protocol Reference Guide.



La ventaja de este protocolo es que varios dispositivos tienen implementado este tipo de comunicación por medio de puerto EIA485. Además, es sencillo de implementar con lenguajes de alto nivel, y existe gran cantidad de documentación sobre su protocolo.

#### **3.5.4. Dispositivos mecánicos y de interfaz con el usuario**

La parte de agitación mecánica para distribuir el líquido debe lograr cambiar el tipo de transferencia de calor de conducción a convección, es decir, ahora se mezcla la materia de tal forma que el calor quede distribuido por todo el recipiente.

El computador debe tener un puerto serie para poder comunicarse con el equipo de calibración, también debe tener un sistema operativo basado en Windows para poder utilizar otras aplicaciones con el fin de calcular los datos necesarios.

## **Capítulo 4. Procedimiento Metodológico.**

En este capítulo se muestran los procesos que se llevaron a cabo para identificar los principales problemas, las pruebas realizadas, y la implementación del nuevo sistema de calibración.

### **4.1. Reconocimiento y definición del problema.**

Cuando se sugirió el desarrollo de éste proyecto, se notaron varios problemas en la duración de cada calibración y la pérdida que esto representaba para la empresa. El ingeniero a cargo de la supervisión del proyecto, Ing. Juan Carlos Rodríguez, señaló que era importante reducir este tiempo, y además facilitar el proceso, para lograr un proceso óptimo.

Como los sistemas de calibración deben ser estables, un baño de calibración no puede tener cambios bruscos de temperatura, si no más bien llevar la temperatura a niveles estables lo más rápido posible, es por esto que se vio la necesidad de construir una nueva planta que incrementara la velocidad de cambio de temperatura sin provocar cambios bruscos. La limitante de esto, es un sistema que tiene que durar también cierto tiempo en realizar el calentamiento. Se definió como objetivo que el sistema puede lograr reducir a la mitad el tiempo de calibración, o sea, la calibración de cada máquina no debe superar la hora y media.

### **4.2. Obtención y análisis de información.**

Para observar el proceso, realizamos una calibración en una empresa de alimentos en el parque industrial de Cartago a inicios de enero del 2007. El tiempo que se requirió en la calibración de dos máquinas fue de 7 horas en total, con dos profesionales en el campo. Por lo que el Ing. Juan Carlos propuso un sistema que automatizara la adquisición de datos y aumentara la potencia con el fin de disminuir el tiempo.

Después de observar este proceso, se empezó a realizar pruebas con el equipo, para obtener parámetros de tiempo de respuesta, y poder obtener un modelo matemático que describa la planta y defina sus características dinámicas y estáticas. Para esto, se tomaron mediciones con un tiempo de muestreo de 1 minuto, y se aproximó el modelo utilizando herramientas de software como Matlab y Excel. Con esto, se comprobó los grandes tiempos de letargo que presentaba el sistema, al tener polos en cero en tiempo discreto de orden 10.

Además, se utilizó un termómetro diferencial, marca Meterman que se encarga de medir diferencias de temperatura entre un punto y otro en el recipiente. Con esto se observó que la temperatura tenía una diferencia de 1 grado aproximadamente cuando la diferencia de altura entre ambos es de 10cm. Esto muestra que es requerida la agitación para distribuir el agua caliente y transferir el calor por convección (con éste tipo de transferencia de calor sí es necesario el desplazamiento de masa).

### **4.3. Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución.**

Para resolver el problema fundamental, el tiempo de duración, estaba claro que era necesario utilizar más resistencias o más potencia. Por lo tanto se pretendía colocar resistencias laterales en la olla para aumentar la potencia y distribuir el calor en distintas superficies y no sólo en la superficie del fondo. Después de consultar con una empresa proveedora, se recomendó al ingeniero a cargo no utilizar ese método ya que el calor no iba a ser en su mayoría consumido por el agua (el aire caliente tiende a subir y el frío a bajar, no hacia los laterales) y esto podía generar recalentamiento y deteriorar o descomponer las resistencias.

Se propuso entonces una resistencia que transmitiera mayor potencia al sistema, y que utilizara toda su superficie de contacto con el recipiente para incrementar la rapidez de la transferencia de calor. Por esto, se construyó una nueva resistencia de 900W, siendo este el valor máximo que se podía fabricar con las dimensiones del recipiente. Otra característica es que la resistencia tiene la superficie plana, no tipo serpentina como la anterior, esto para aumentar el área de contacto entre las superficies, como se vio en el marco teórico, la velocidad de la transferencia de calor depende del área de la superficie de contacto.

Se propuso un controlador que incorporara la regulación con un compensador PID, para poder ajustar sus parámetros de forma independiente. Además, el mismo debe tener la opción de comunicarse por EIA485, y utilizar un protocolo estándar como el MODBUS RTU o el MODBUS ASCII. Este controlador fue sugerido por el Ing. Juan Carlos Rodríguez, por ser un equipo barato y confiable, del cual ya tenía experiencia en su manejo.

Se acordó que un programa de computación de alto nivel que lograra comunicarse con el controlador para obtener datos, modificar parámetros, almacenara los datos, y realizara cálculos requeridos por el metrólogo era la mejor opción. Un programa capaz de realizar las comunicaciones entre el baño de calibración y aplicaciones de Windows como Excel, facilita el trabajo del metrólogo.

#### **4.4. Implementación de la solución**

El procedimiento de implementar una solución requirió inicialmente una investigación de los equipos físicos que se necesitaban. Por esto, se investigó el comportamiento del agua cuando se calienta, la cantidad de “inercia térmica” que posee y el mínimo de potencia que requiere la resistencia eléctrica para poder cumplir con el objetivo de reducir el tiempo de calentamiento a la mitad.

Seguido de esto, se investigó la mejor forma de construir la planta, tomando en cuenta precios, confiabilidad, y equipo disponible. Para esto, se contactó con un proveedor, quienes fabricaron la resistencia que cumplía con los parámetros de potencia y dimensiones requeridas, y además, realizó recomendaciones como el uso de grasa térmica para eliminar los posibles vacíos, y nos señaló las limitantes de uso.

También se definió la forma en cómo se debe aislar la etapa de potencia con la etapa de control, tomando en cuenta parámetros como la potencia y los rangos de voltaje, así como el tiempo que va a estar activo y el espacio requerido.

Seguidamente, se investigaron los equipos necesarios para la comunicación que se requiere. Se investigó sobre el protocolo MODBUS ASCII, y sobre los lenguajes de programación que pueden comunicarse con el puerto serie de forma simple, además del equipo que realiza la conversión entre puertos EIA485 y EIA232 y las opciones de comunicación que presenta el controlador.

Terminada esta etapa, se procedió a la implementación de la planta con el controlador, para facilitar la activación de la resistencia. Construida la planta nueva, se procedió a tomar datos y a probar el nuevo modelo, donde se obtiene un calentamiento del agua mayor.

La etapa más larga del proyecto se observó a la hora de implementación de la comunicación entre el computador y el controlador. Se requirió investigar bastante en el lenguaje de programación que tenga la capacidad de comunicar su aplicación propia con otras aplicaciones de Windows para guardar, extraer o renovar datos. También el programa necesitaba comunicar su aplicación con el puerto serie, utilizando cadenas de protocolo MODBUS, con etapas de envío, recepción y verificación.

Con el programa se realizaron las primeras pruebas de adquisición de datos desde el controlador mediante el puerto serie, así como el despliegue en pantalla de los datos recolectados.

Más adelante, se realizaron las pruebas de control sobre la planta desde el computador. Esto se realizó con el propósito de transferir parámetros al controlador y obtener información sobre el estatus de la planta y del controlador.

La etapa siguiente consistió en una investigación sobre las formas en cómo comunicar la aplicación del programa con otras aplicaciones de Windows. Al inicio, se quería implementar una aplicación que al obtener los datos desde el controlador, funcionara como intérprete para convertir el dato a DDE (Dynamic Data Exchange) y que con otras aplicaciones (como Excel o RSView), utilizar su información para visualizar o para sacar nuevos datos, como la desviación o el promedio.

Sin embargo, debido a factores como la antigüedad del DDE y que los nuevos lenguajes de programación no aceptan estas estructuras, se decidió realizar la comunicación entre aplicaciones con OLE Automation, una estructura que no necesita llamar a las estructuras de datos desde el programa, sino que desde la misma aplicación llama a propiedades o métodos de las aplicaciones de Windows y realiza tareas específicas.

También se realizaron aplicaciones específicas que eventualmente pueden ser usadas por el metrólogo si fueran requeridas, como la vigilancia del proceso, el ajuste de parámetros del controlador, las constantes del regulador, el tiempo de muestreo, el offset, y otros.

## **Capítulo 5. Descripción detallada de la solución.**

Este capítulo expone la solución implementada con sus descripciones divididas en módulos. También se explican los criterios utilizados para decidir los métodos y materiales con los que se diseñó.

### **1.1. Análisis de soluciones y selección final.**

Básicamente, la estructura principal del proyecto, fue realizada por el ingeniero supervisor. Él sugería una estructura similar a la mostrada en la Figura 1, a la hora de iniciar el proyecto. Este diagrama es la base del diseño e implementación del sistema deseado.

La investigación consistió principalmente en determinar las herramientas óptimas para el desarrollo de cada bloque o módulo.

Para la implementación del controlador, se analizaron dos opciones: Utilizar un PIC de Microchip® o un controlador de temperatura Delta Serie A que se encontraba en bodega. La ventaja del PIC es su precio, que comparado con muchos controladores, es bastante bajo. Sin embargo, la complejidad de utilizar variables en punto flotante en el controlador, la dificultad de implementar un algoritmo de regulación con lenguaje C, y la construcción de la interfaz del PIC con los otros dispositivos, como la etapa de potencia o el puerto serie o pantallas LCD, son los factores por los cuales se desechó esa solución. En cambio, el controlador Delta, presenta ya implementado un algoritmo propio para la regulación, por lo que no hay que construir todo con el lenguaje, si no más bien, adaptar sus valores basados en el modelo de planta obtenido. Además, el controlador ya posee incorporado pantallas de 7 segmentos, reles pequeños y se comunica a través de MODBUS ASCII mediante EIA485.

Para tomar la decisión sobre el lenguaje de programación en alto nivel a utilizar para la aplicación en el computador, se realizó una investigación sobre lenguajes que tienen la capacidad de comunicarse fácilmente con el puerto serie, en los cuales se fijó la atención en Visual Basic .Net, Visual Basic 6.0, y C++. Analizando varios ejemplos y documentación sobre la comunicación con el puerto serie y la forma de comunicarse con otros programas de Windows, se eligió utilizar al inicio Visual Basic .Net, ya que era una plataforma más novedosa que Visual Basic 6.0, y C++ presenta dificultades en el manejo de la interfaz gráfica y tratamiento de números en punto flotante.

Cuando se empezó a realizar la investigación del proyecto, el ingeniero a cargo sugirió realizar la comunicación entre los programas de Windows y la aplicación con DDE, ya que él había trabajado con varias aplicaciones utilizando este protocolo y tenía varios ejemplos. Sin embargo, la comunicación por DDE no es permitida en Visual Basic .Net, por lo que se decidió partir de la base ya hecha en Visual Basic 6.0.

Conforme se avanzó en la investigación, en las nuevas aplicaciones de Windows, se utiliza entre aplicaciones comandos OLE, ya que DDE es un protocolo más viejo y un poco más complicado. Visual Basic 6.0 puede trabajar con ambos protocolos y por eso se decidió migrar hacia la comunicación más reciente.

El sensor fue elegido según sus tiempos de reacción, su precisión y su rango. Se analizó la posibilidad de utilizar dos tipos, termocuplas y RTDs (resistance temperature detectors). Para fabricar un sensor con termocupla, se debe unir dos cables que contienen distintos metales y extender este cable hasta el controlador, ya que no se puede combinar con otros metales como el cobre por que pierde su capacidad de variar el voltaje respecto a la temperatura. Este cable es más caro que el cable UTP de varios hilos, por su consistencia. La RTD por el contrario, utiliza cable UTP para conectarse con el controlador, sin embargo su elemento de medición es bastante más caro que la termocupla. Se eligió la termocupla por que el controlador está muy cerca del elemento de medición, y no se ocupa mucho cable, por lo que la solución es más económica. Además, realizando pruebas con ambos sensores, se determinó que las RTD's presentan mayores tiempo de reacción que las termocuplas.

Para decidir cuál termocupla utilizar, se utilizaron los rangos de precisión de cada uno, y se probaron varias disponibles en la empresa, entre ellas, las tipo K, T, y J. Estos datos se resumen en la siguiente tabla

**Tabla 2.** Comparación entre termocuplas a distintas temperaturas.<sup>12</sup>

SET VALUE	Termómetro patrón	Termocupla			Promedio de Patrones	Desviación		
		K	J	T		K	J	T
0°C	0	0	0	0	0	0	0	0
Ambiente	21.8	21.6	21.5	21.7	21.8	0.2	0.3	0.1
40°C	40.5	40.4	40	40.6	40.5	0.1	0.5	-0.1
60°C	60.2	60.1	60.5	60.1	60.2	0.1	-0.3	0.1
80°C	79.4	79.3	79.8	79.5	79.4	0.1	-0.4	-0.1
<b>Promedio de desviación</b>						0.1	0.02	1.4E-15
<b>Correlación</b>						0.99999	0.99995	0.99999

A pesar de que cada una de las termocuplas tiene un promedio bajo de desviación, se prefiere utilizar la función de correlación con el patrón para decidir cuál es más cercana en comportamiento. Se puede observar que para las termocuplas K y T, ambas correlaciones son mayores a 0.99999. Esto quiere decir la diferencia en la precisión de las termocuplas son debido a errores de medición. En la termocupla J, el sistema tiene un decimal menos de correlación. Seguido de esto, se puede observar que la desviación más baja se observó con la termocupla T, en la temperatura ambiente. Esta fue la razón para escoger la termocupla T por encima de la termocupla K.

<sup>12</sup> Fuente: Datos tomados del sistema con termómetro patrón.

## **5.1. Descripción de hardware**

El hardware utilizado se puede dividir claramente en cuatro elementos o bloques. Estos son: Planta, acople de potencia, regulador y comunicación.

### **5.1.1. Hardware de la planta.**

La planta fue construida, como se mencionó antes, con base a una planta anterior, por lo que se utilizaron muchos de sus componentes, agregando nuevos elementos para mejorar el desempeño. El contenedor es un recipiente de acero inoxidable delgado, que permite una buena transmisión de calor y no se herrumbra con el agua. Contiene una caja tipo “case”, donde se coloca la resistencia eléctrica y los elementos necesarios para el paso de corriente. Se cambió la resistencia eléctrica por una nueva de 900W, que proporciona, como se mencionó, mayor calor en menos tiempo al agua en el recipiente. Además, la resistencia y el recipiente están aislados del “case” por lana de vidrio.

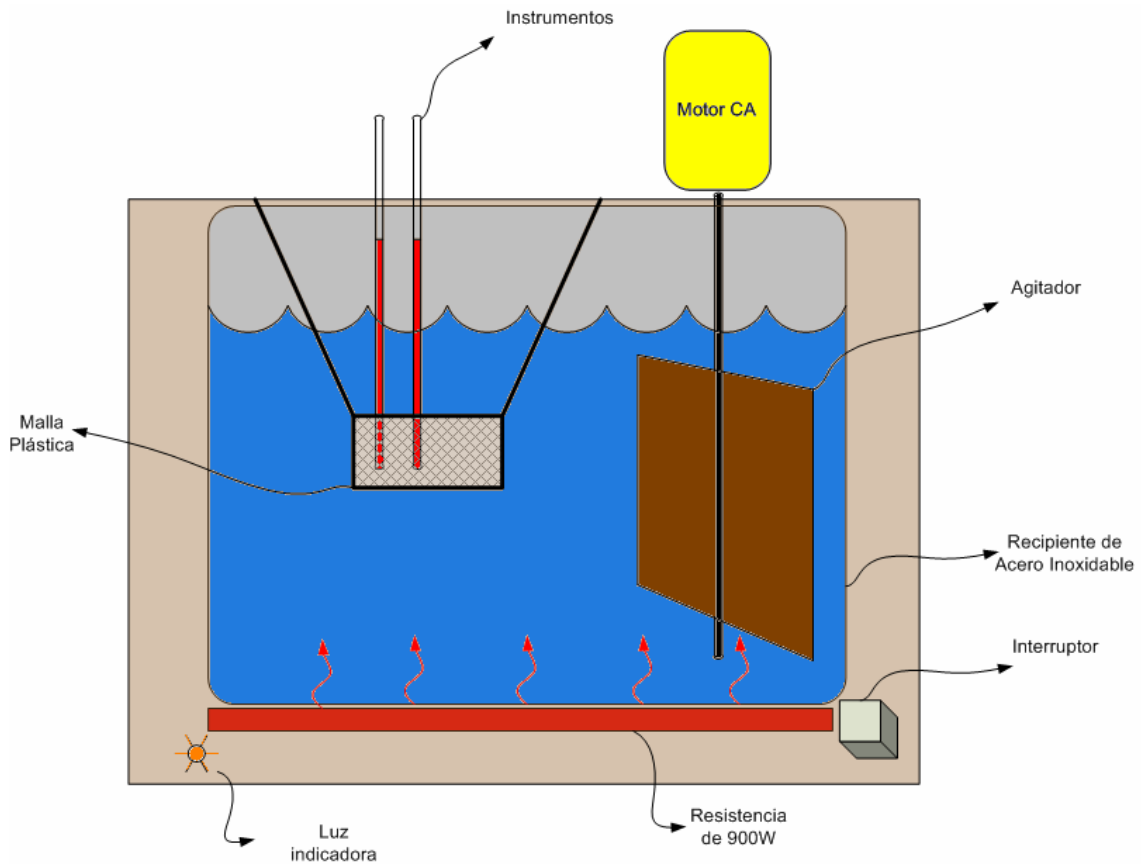
También se implementó un sistema de agitación mecánica, consiste en un motor AC que gira a una velocidad de 6 r.p.m. colocado su eje de forma vertical, moviendo el líquido con una veleta ubicada en el agua. Su potencia es de 3.3W. El motor tiene una velocidad constante a pesar de manejar una carga grande relativamente a su tamaño. Este motor es activado de forma inmediata cuando se enciende el sistema.

Los sensores calibrados y los instrumentos a calibrar tienen que ubicar toda su superficie en agua, y no puede tocar el metal del recipiente, pues éste tiene mayor temperatura que el agua. Por lo tanto, se colocó un sistema sencillo pero eficaz para poder sostener los instrumentos. Consiste en una estructura hecha con varilla de hierro que sostiene una malla de plástico resistente, a la cual se le aseguran los instrumentos con amarras plásticas.

La planta tiene una luz que indica cuando tiene energía, y un interruptor mecánico que permite el paso de corriente.

El diagrama siguiente muestra la planta y sus principales características.





**Figura 9.** Planta implementada en el sistema.

### 5.1.2. Hardware del acople de potencia

Para esta etapa, se decidió utilizar un relé de estado sólido. Esto por que, por la corriente que demandan es regulada por un PID, con una salida PWM, provocando frecuentes cambios en la magnitud de la corriente en poco tiempo. En un relé corriente, se puede activar la interrupción cuando la red tenga un voltaje pico, y esto genera un cambio brusco de corriente que produce chispas entre los contactos, que van deteriorando los materiales y los terminales.

Por esto, se utilizó un relé de estado sólido de la marca Crydom, modelo D2475.<sup>13</sup> Se utilizó este modelo por que resiste una corriente de hasta 75 amperios en corriente alterna y se activa en los cruces por cero, por lo que no tiene cambios bruscos de corriente y no se daña el dispositivo. Además, puede ser controlado por una señal CD de 3V hasta 32V. Como se verá más adelante, esta característica es útil por que otros dispositivos funcionan con 24V, y se puede aprovechar esa fuente para controlar la planta. El dispositivo también tiene toda la protección a los sobrevoltajes y “snubber” (protecciones  $dv/dt$  y  $di/dt$ ) presentes internamente, por lo que no se requirió implementarlas.

<sup>13</sup> [www.crydom.com](http://www.crydom.com)

### 5.1.3. Hardware del regulador.

El regulador utilizado es el Delta Serie A modelo DTA4848R1.<sup>14</sup> Este controlador presenta varias características útiles para el desarrollo del proyecto. Posee una pantalla que muestra el valor medido de temperatura y el valor ajustado. Tiene varios tipos de accionamiento del control, ON-OFF y PID por PWM. Para el ajuste del PID, se ajustan sus parámetros Kp, Ki y Kd, además del tiempo que utiliza el PWM.

El controlador posee un puerto EIA485, y se comunica mediante protocolo MODBUS ASCII. Se pueden ajustar sus parámetros de forma manual o por software por el puerto serie. La siguiente tabla muestra las opciones que presenta el controlador para ser ajustadas y su registro interno.

**Tabla 3.** Registros internos de lectura y escritura en el controlador DTA.<sup>15</sup>

Registro (Hexadecimal)	Parámetro	Función
4700	Valor actual de temperatura	Registro que almacena la temperatura obtenida, cada medio segundo
4701	Valor ajustado de temperatura	Almacena la temperatura que se desea
4706	Límite máximo de temperatura	Máximo valor de temperatura que se puede medir
4707	Límite mínimo de temperatura	Mínimo valor de temperatura que se puede medir
4708	Valor de Kp	Constante proporcional Kp para el PID
4709	Valor de Ki	Constante integral Ki para el PID
470 <sup>a</sup>	Valor de Kd	Constante derivativa Kd para el PID
4711	Método de control	PID = 0; ON-OFF = 1
4712	Segundos del PWM	0-99s, valor de tiempo de control para el PID
4714	Desviación de la medición	Desviación "offset" de la medición tomada"
4717	Unidad de temperatura	°C = 0; °F = 1
4729	Auto-tuning	OFF = 0; ON = 1
472B	código 0	Operación normal
	código 1	Iniciando proceso
	código 2	Temperatura no estable
	código 3	Sensor no conectado
	código 4	Error en la medición del sensor
	código 5	El valor de temperatura medido excede el rango
	código 6	Error desconocido
	código 7	Error en la EEPROM

<sup>14</sup> <http://www.delta.com.tw/>

<sup>15</sup> Fuente: *A Series Temperature Controller Instruction Sheet*, [www.delta.com.tw](http://www.delta.com.tw)

Para solicitar al controlador algún parámetro o modificar algún valor mediante el puerto serie, se debe realizar un pedido mediante protocolo MODBUS ASCII. El inicio de la comunicación empieza con el carácter dos puntos “.”. Cuando el controlador recibe e identifica este carácter, empieza una etapa de recepción que almacena el resto de la cadena.

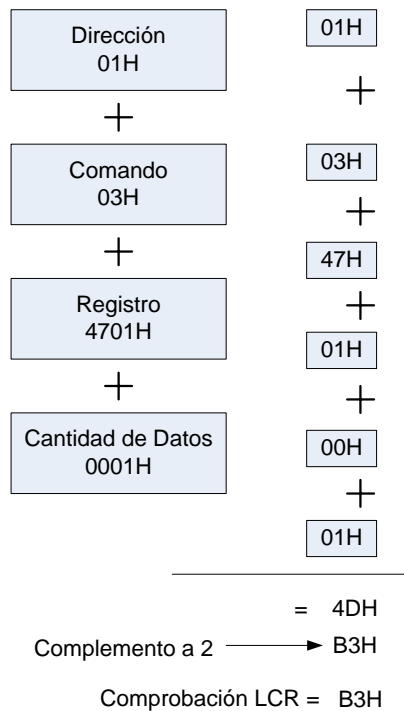
Seguido del carácter de inicio, el controlador recibe los dos siguientes bytes, que definen la dirección del controlador, o su “nombre”. En una red MODBUS, cada controlador debe tener una dirección específica y única, para que el maestro pueda decidir con cuál controlador hacer la comunicación.

Cuando el controlador identifica que su dirección es la solicitada, recibe el comando que se va a realizar. A pesar de que MODBUS tiene estandarizado muchos comandos que realizan distintas funciones, el controlador Delta sólo tiene dos, y con esas realiza las funciones necesarias para el control, a diferencia de sistemas más complejos que requieren más comandos. Estas funciones son escribir en el registro, y leer del registro, con valores hexadecimales de 06H y 03H.

Seguido de recibir el tipo de comando, el controlador ajusta la memoria y el bus para acceder a los datos. Los siguientes cuatro bytes que recibe representan la dirección del registro que se quiere escribir o leer. Algunos registros son de sólo lectura, como el 4700, que almacena el valor medido de temperatura, o el 472B, que almacena el estado del controlador y los errores.

Cuando el controlador identifica y accede a la posición de memoria que se solicita, recibe nuevamente cuatro bytes. Estos datos, dependiendo si el comando es lectura o escritura, pueden ser datos a escribir o cantidad de datos a leer. Cuando es escritura, el controlador recibe los datos y los almacena en un registro temporal, hasta que termine la verificación de errores, que se realiza más adelante. Para el caso de la lectura, el maestro puede solicitar hasta 3 registros, esto con el fin de no mandar un mensaje, uno por uno, sino agilizar la comunicación. Por ejemplo, se pueden obtener los valores de Kp, Ki y Kd con un solo comando, sin tener que enviar tres mensajes distintos. En el comando se coloca lectura “03”, en el registro se pone la dirección “4708”, y en los siguiente 4 caracteres se coloca “0003”.

Después de haber realizado estos procedimientos, se realiza la comprobación del error, donde se realiza una suma llamada LRC. Con los datos recibidos anteriormente, el dispositivo maestro realiza un cálculo que envía al controlador para comprobar que se entregaron bien los datos. El controlador, con los datos recibidos, realiza la misma operación y compara con los dos bytes últimos enviados por el maestro. Este procedimiento se basa en sumar todos los datos, y luego sacar su complemento a dos. En la Figura 10 se muestra un ejemplo de la suma y su respuesta.



**Figura 10.** Ejemplo de suma de verificación de LCR para la comunicación MODBUS.<sup>16</sup>

Por último, el maestro envía los caracteres ASCII correspondientes al retorno de carro (CR) y avance de línea (LF). Estos caracteres indican el final de la comunicación del maestro. Cuando el controlador recibe e identifica estos dos caracteres, se realizan los procedimientos que solicitó el maestro, y empieza a transmitirle el mensaje de respuesta.

La cadena de respuesta del controlador varía dependiendo de la solicitud hecha por el maestro, o por la presencia de algún error en la comunicación, o estructura del mensaje.

Si la comunicación es exitosa, entonces el mensaje de respuesta depende de la solicitud del maestro. En el caso de que se desea escribir en algún registro de los antes mencionados, el mensaje de respuesta del controlador es idéntico al del maestro, confirmando que se realizó la escritura pedida.

En el caso de que se solicite algún dato desde el registro, la escritura se maneja igual, excepto que en vez de enviarse la dirección del registro y la cantidad de bytes, se envía el contenido del registro. Además, se hace otro cálculo de LRC.

Por último, en el caso que se presente un error, el controlador envía su dirección única y además, en vez de reenviar el comando solicitado, envía un comando de error, que indica al maestro que tipo de falla encontró en el mensaje (por ejemplo, no coincide el LRC, o la estructura esta mal hecha, o se pide un comando inexistente).

<sup>16</sup> Delta Temperature Controllers. *DTA Series User Manual*.

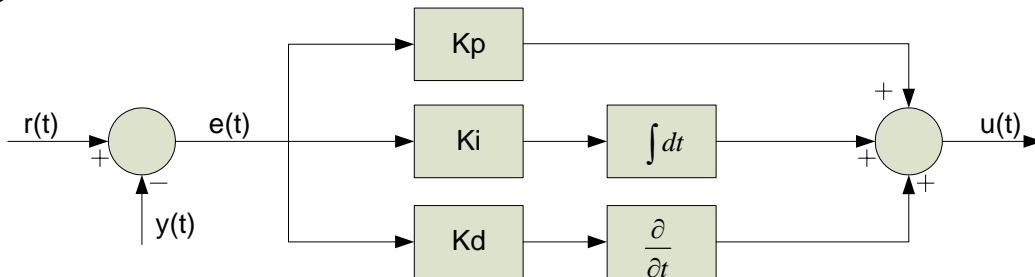
El controlador tiene un regulador interno tipo PID, que permite modificar sus parámetros respecto a las constantes que se obtengan en experimentos y análisis. La ecuación que corresponde a la salida de un regulador PID con parámetros proporcionales, integrales y derivativos, frente a una entrada aleatoria, se define de la siguiente forma.

$$u_{(t)} = K_p \cdot e_{(t)} + K_i \cdot \int e_{(t)} + K_d \frac{\partial e_{(t)}}{\partial t} \quad (7)$$

O en el plano s.

$$u_{(t)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (8)$$

Esta ecuación muestra que existe una relación entre la salida y la entrada de forma proporcional, relacionadas por  $K_p$ . También se relaciona la salida con la integral del error y con la derivada del error de forma proporcional con  $K_i$  y  $K_p$  respectivamente. El diagrama siguiente muestra los bloques del sistema regulador.



**Figura 11.** Relaciones de las constantes de control del sistema de regulación.<sup>17</sup>

Este sistema de regulación es el más común, y se llama modelo paralelo, en la que las constantes son independientes entre sí. Para ajustar las constantes, se realizaron experimentos y toma de mediciones de la planta con su potencia al máximo para sacar el modelo experimental de planta y con esto obtener un regulador que la controle.

Para realizar esto, se utilizó el método sugerido y enseñado por Ing. Eduardo Interiano *método de respuesta ante escalón*<sup>18</sup>. El método se encuentra bien explicado en el documento referenciado. Básicamente, con una gráfica con un tiempo de muestreo adecuado de la planta, se puede obtener un modelo aproximado de orden uno del sistema. Con base a los cálculos realizados en el muestreo, se obtuvo el siguiente modelo.

$$G(s) = 80 \frac{e^{-80s}}{(s + 0.001)} \left[ \frac{\mu K}{W} \right] \quad (9)$$

<sup>17</sup> Interiano, E. *Diseño de reguladores de un solo lazo*, [www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase](http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase)

<sup>18</sup> Interiano, E. *Modelado Estocástico por el método de mínimos Cuadrados*.  
[www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/3.6ModeladoEstocastico.pdf](http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/3.6ModeladoEstocastico.pdf)

Debido a que lo que se requiere es precisión en la medición, se sugirió implementar un regulador PI que corrigiera el error de estado estacionario, y lo llevara lo más cerca posible al punto de ajuste. Con esta planta, se agregó mediante las técnicas estudiadas en clase, un compensador PI que regule el error en la planta. Al implementar el controlador en la planta, se observó que funcionaba bien sólo para cierto rango de temperatura, y no brindaba la estabilidad necesaria a temperaturas altas.

Se calculó por ende, otro modelo de planta a través del programa stochastic hecho en Matlab<sup>19</sup>. Para esto se obtuvo el siguiente modelo.

$$G(s) = 62,8 \frac{e^{-60s}}{(s + 0.0005)} \left[ \frac{\mu K}{W} \right] \quad (10)$$

Como ambos modelos se aproximan bastante, el regulador es el mismo, y por tanto, los mismos resultados. Se decidió aproximar la planta entonces a un modelo de grado 2 con el fin de aproximar a un mejor modelo y encontrar un regulador pertinente. Para esto, se utilizó el programa Stochastic2<sup>20</sup>. Con este programa se obtuvo el siguiente modelo.

$$G(z) = \frac{2.47(z + 0.47)}{z^2(z - 0.98)(z - 0.04)} \left[ \frac{mK}{W} \right] \quad (11)$$

Al implementar un regulador que lograra estabilizar la planta a los valores de sobreimpulso y estabilización adecuados, se observó que, igual que para el modelo de orden 1, el regulador sólo funcionaba para ciertas temperaturas. Al final del análisis, se implementó el regulador que tiene propio el controlador mediante la opción Autotuning, con la que se obtuvieron resultados precisos para cada temperatura en el rango que se requiere. Así, al final el regulador está hecho de la siguiente forma.

$$u_{(t)} = 7.7 + \frac{735}{s} + 183 \cdot s \quad (12)$$

Donde se observa que el controlador tiene las siguientes constantes:

$$Kp = 7.7 \quad (13)$$

$$Ki = 735 \quad (14)$$

$$Kd = 183 \quad (15)$$

Se puede observar que el regulador que se obtuvo tiene su mayor parte integral para corregir el error de estado estacionario, así como una parte derivativa bastante grande para evitar el sobreimpulso.

<sup>19</sup> [www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/trabajosmatlab](http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/trabajosmatlab).

<sup>20</sup> Ídem

#### **5.1.4. Hardware del sistema de comunicación.**

Para lograr comunicar la computadora con el controlador y utilizar protocolo MODBUS, es necesario cambiar el tipo de puerto con el que se transmite y recibe las cadenas. El controlador tiene un puerto EIA485, que tiene dos pines, mientras que el computador utiliza el puerto EIA232 de nueve pines para comunicarse con el regulador. Las diferencias de estos puertos son básicamente las líneas de control. Como se utiliza MODBUS, no existen choques de señales si se conectan varios controladores en paralelo al puerto EIA485, no así con el 232, que no puede tener varios puertos pegados sin hardware de control. Por esto, se utilizó un convertidor de puertos de la empresa Allen Bradley, llamado Advance Interface Converter 1761-NEC-AIC. Este dispositivo convierte el protocolo utilizado por el EIA232 a EIA485, sin que existan problemas de choques de datos por el bus.

### **5.2. Descripción de software**

Como se mencionó anteriormente, el software se implementó en Visual Basic 6.0 por la comunicación con Excel y el puerto serie del computador. El problema se atacó por partes distintas para poder integrar todo con métodos que sirvieran en cualquier parte del programa.

#### **5.2.1. Algoritmo de comunicación con el controlador**

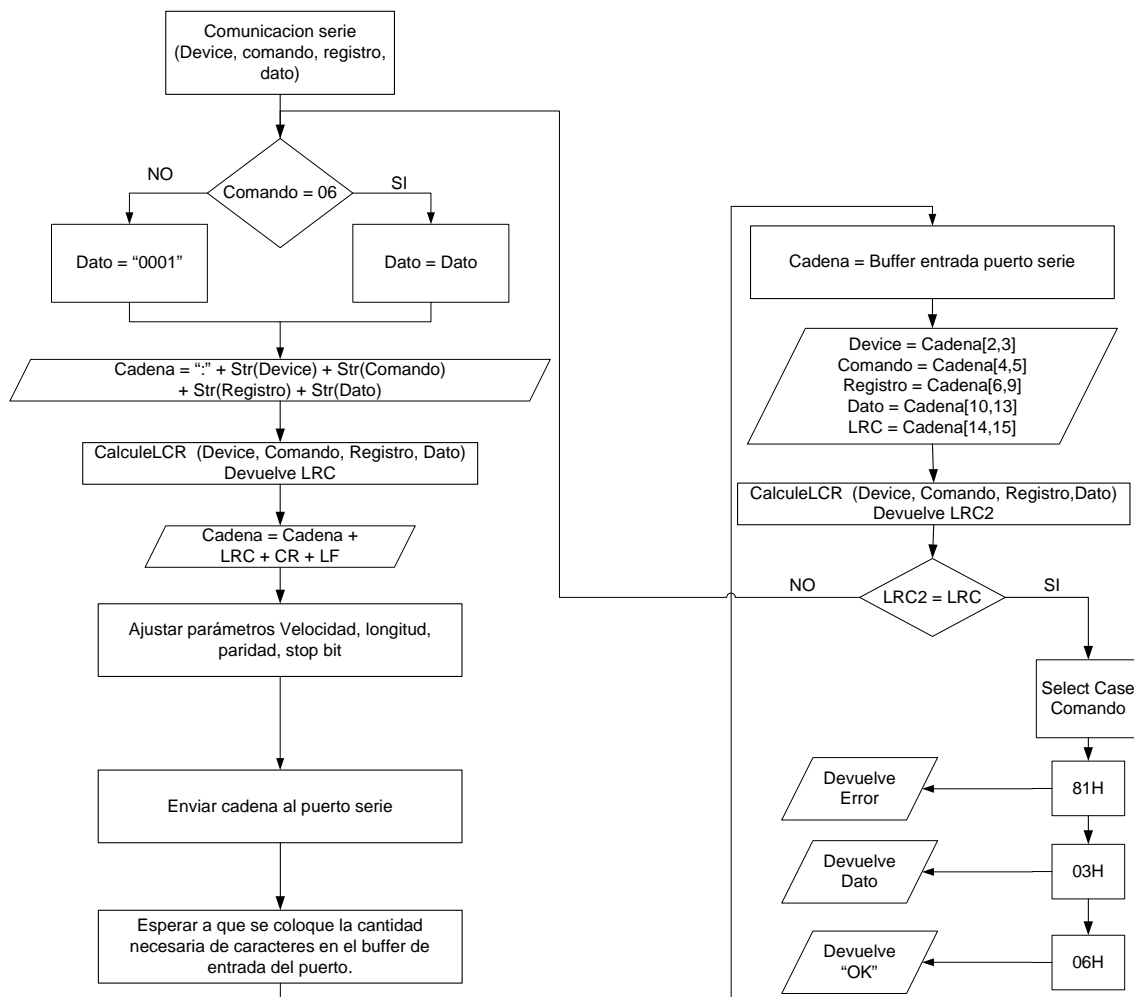
Para implementar la comunicación MODBUS, se implementó un algoritmo que organizara la cadena según los requerimientos del mensaje (escritura/lectura, número de dispositivo, cálculo del LRC). Se desarrolló un método capaz de comunicarse con el puerto serie, y con los parámetros que se le indican, genera la cadena que se desea enviar y la convierte en valores hexadecimales. El usuario del computador puede elegir parámetros del puerto serie como velocidad, paridad, longitud de datos y el stop bit.

El algoritmo para el envío de algún comando al controlador se muestra en la Figura 12. El programa principal llama al método entregando el comando (lectura-escritura), el dispositivo (número de controlador), el registro (47XX) y el dato a escribir si es escritura. En el caso de que sea lectura, el dato no importa, ya que siempre envía la cadena "0001", que indica que tomaremos sólo un registro.

El programa empieza a formar la cadena que se requiere para enviarla al puerto, como se vio en el marco teórico, el programa coloca de primero un carácter ".", seguido del número de controlador, comando y registro en formato de cadena, que se realiza mediante la función Str(). También anexa dato y calcula el valor de la redundancia cíclica. Este dato es calculado por otro método que suma los valores Registro, Dato, Comando y Device. Devuelve un número con formato de cadena, se anexa a la cadena, se ajustan los parámetros del puerto serie, y se envía la cadena al puerto.

Después de esto, el programa cuenta la cantidad de caracteres que llegan al puerto serie luego de enviar la cadena, también tiene un contador interno que cuando llega al límite, obliga al programa a terminar la aplicación y lo hace regresar al punto donde el usuario genera la instrucción. Si la comunicación fue exitosa y se logró recoger todos los caracteres, se compara la redundancia cíclica calculada del mensaje con la enviada por el controlador, si hay error, se repite el procedimiento, hasta que el contador interno termine la aplicación o haya una comunicación exitosa.

El programa separa las partes de la cadena recibida según la estructura de MODBUS, que fue explicada anteriormente. El programa reconoce si el comando era escritura o lectura y retorna el dato que se solicita en caso de que sea escritura, o la cadena OK en caso de que sea escritura. Si el controlador detecta un error en la comunicación y envía un comando de error, el programa indica al usuario que existe un error con los datos, y genera un código de error en el programa.

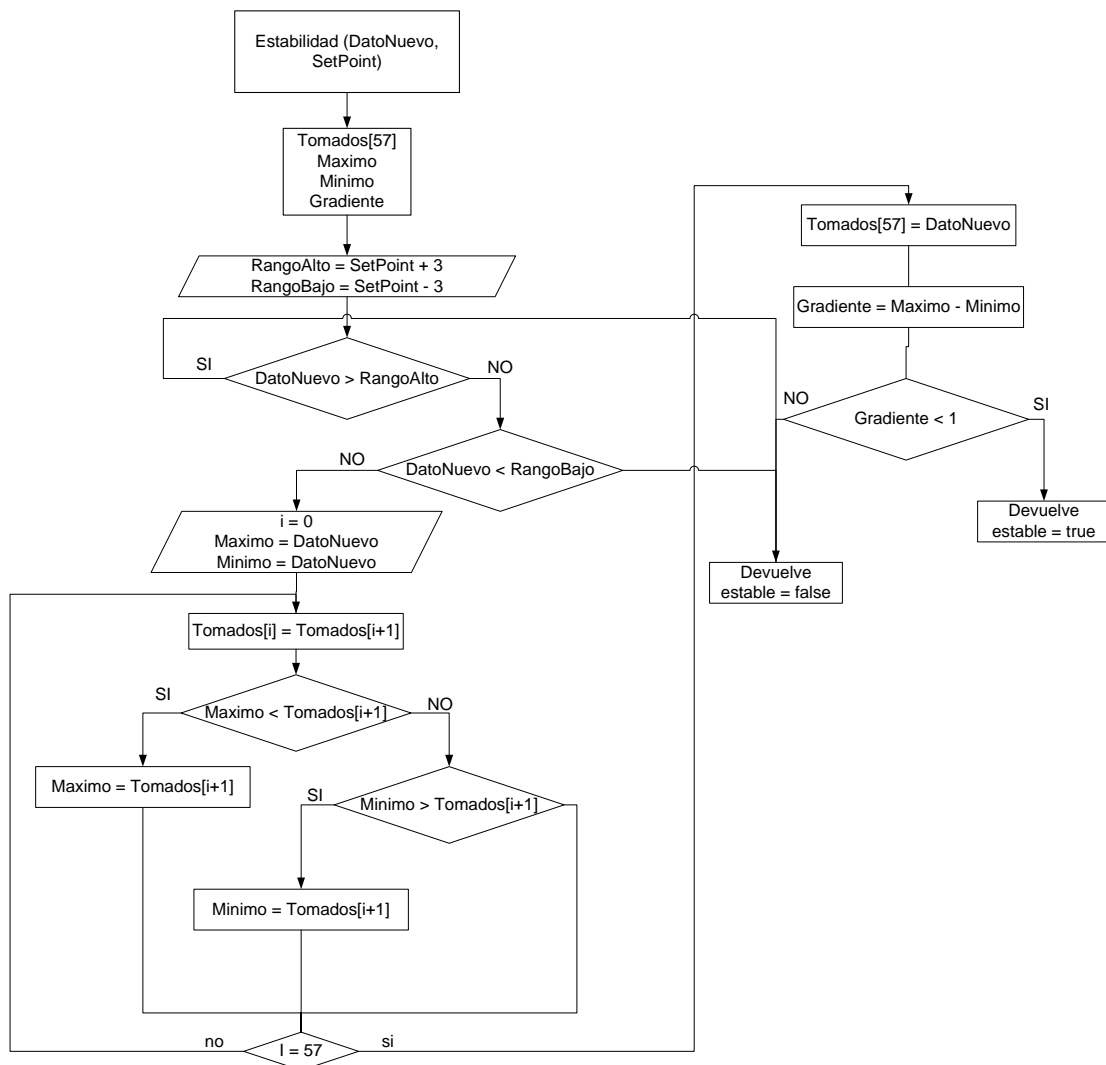


**Figura 12.** Diagrama del algoritmo de comunicación MODBUS



## 5.2.2. Algoritmo de estabilidad de temperatura

El algoritmo de estabilidad se basa en las normas NIST<sup>21</sup>. Estas dicen que para calibrar un instrumento, el agua debe estar con una temperatura estable, esto es, que durante 5 minutos, el agua se mantenga en el rango de un grado Celsius. Este método es llamado para averiguar si el agua está estable y cerca del rango de la temperatura de ajuste. Utiliza un contador con una frecuencia de 10 segundos, para tomar datos. Almacena los datos en un registro y saca la diferencia entre el mayor y el menor de los datos tomados cinco minutos atrás, o sea hasta 57 muestras. Cada dato es almacenado estilo FIFO (*first in, first out*) o cola. Los nuevos datos se almacenan y se comparan con las 57 muestras anteriores, y se define el máximo y mínimo de las muestras, luego se realiza una resta con el fin de verificar que la diferencia máxima es de 1°C, en este punto, la función Estabilidad tiene un valor *true*.

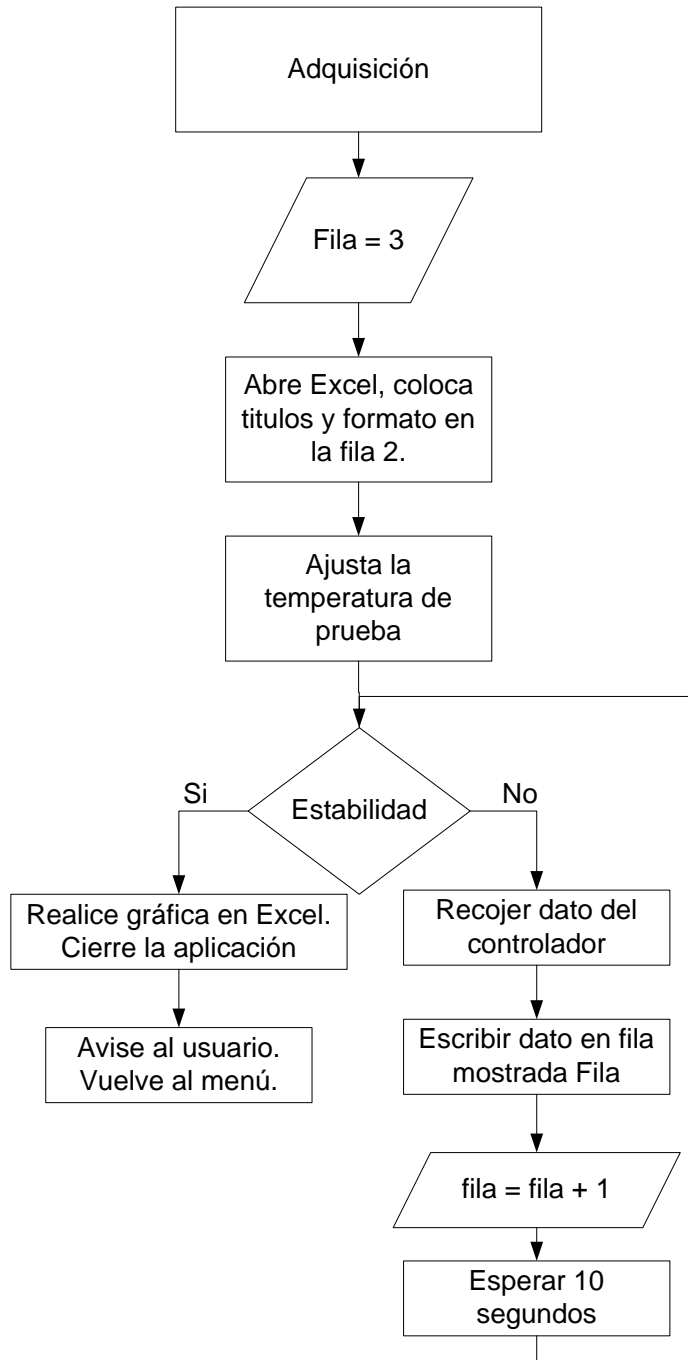


**Figura 13.** Algoritmo de la verificación de la estabilidad de temperatura del sistema implementado.

<sup>21</sup> NIST/SEMATECH *e-Handbook of Statistical Methods*, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.

### 5.2.3. Algoritmo del proceso de adquisición de datos.

Como una opción, el programa tiene la capacidad de adquirir datos de temperatura del sistema con un periodo de muestreo de 10s, y almacenarlos en Excel®, hasta que el sistema establezca a un punto de temperatura definido por el usuario. Además, realiza una gráfica de estos datos automáticamente y los guarda en el disco duro, brindando la oportunidad de nombrar el archivo y su ubicación al usuario desde la aplicación.

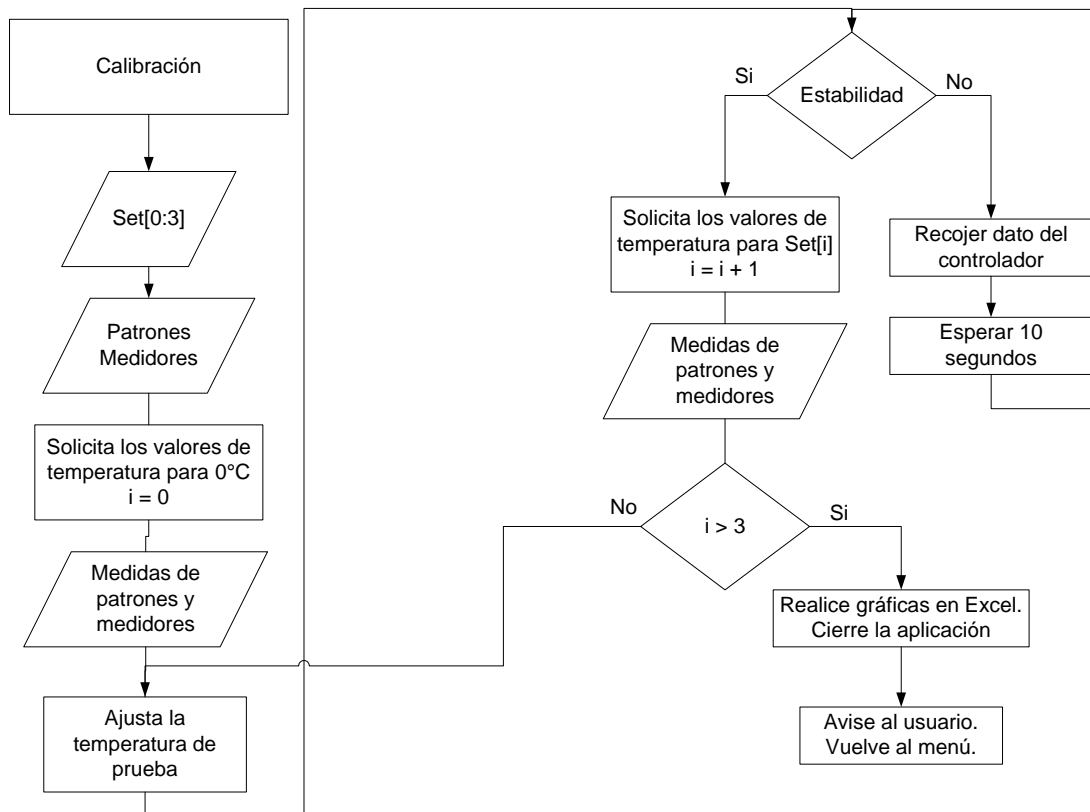


**Figura 14.** Algoritmo del proceso de adquisición de datos.

#### **5.2.4. Algoritmo del proceso de calibración.**

El sistema implementado tiene como característica principal, una rutina de programa que simplifica el tiempo que se utiliza en la calibración de los equipos, la complejidad de la toma de datos y además, asegura una temperatura constante en el agua. Esta rutina consta de un algoritmo basado en una máquina de estados, que pase por varias rutinas para llevar a cabo el procedimiento de calibración. Se puede considerar como la parte más importante del programa. Cuando el usuario pide realizar el proceso de calibración, el sistema solicita varios datos. Se requieren al menos 5 puntos en el rango de 0°C a 100°C para validar una calibración. El sistema solicita 4 puntos, ya que el cero está presente por defecto (basado en los procesos de calibración de NIST). También solicita los nombres de los instrumentos patrones e instrumentos a calibrar, con el fin de que el metrólogo tenga claridad a la hora de definir los equipos.

Cuando el sistema recoge todos los datos pedidos, empieza el proceso, al inicio, se solicitan al usuario los valores para 0°C en los medidores, brindando el espacio para escribir con el nombre respectivo de cada patrón y medidor. Cuando el usuario ingresa todos los datos, el sistema empieza a llevar la temperatura al primer punto definido por el usuario. La temperatura que continúa generalmente es la temperatura ambiente. El sistema espera la estabilización de la temperatura, y cuando se comprueba la estabilidad, solicita al usuario las medidas de los instrumentos. Continúa con el siguiente punto, hasta terminar. Al finalizar todos los puntos, el programa realiza las gráficas de cada medidor comparándolas con el promedio de los instrumentos patrones obtenido. También saca una desviación promedio, y seguido de esto vuelve al menú principal.



**Figura 15.** Algoritmo implementado del proceso de calibración.

Cabe destacar que el programa total fue hecho de tal forma que evitara al máximo tener problemas con archivos de Excel. En el caso de que el sistema detectara un error al abrir, sustituir, guardar o cerrar un archivo, se indica al usuario que se encontró un problema, y el programa vuelve al menú principal. El propósito de este tipo de programación tan robusta se debe a que el sistema no puede perder los datos por que se irrumpió la comunicación con el controlador o con Excel, ya que esto representa una pérdida de tiempo en el proceso de calibración.

## Capítulo 6. Análisis de resultados.

En este apartado se analizan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al sistema. Se muestran algunas tablas y gráficas del comportamiento del sistema ante distintos valores de PID para el controlador, y las características favorables y desfavorables halladas en la implementación del sistema.

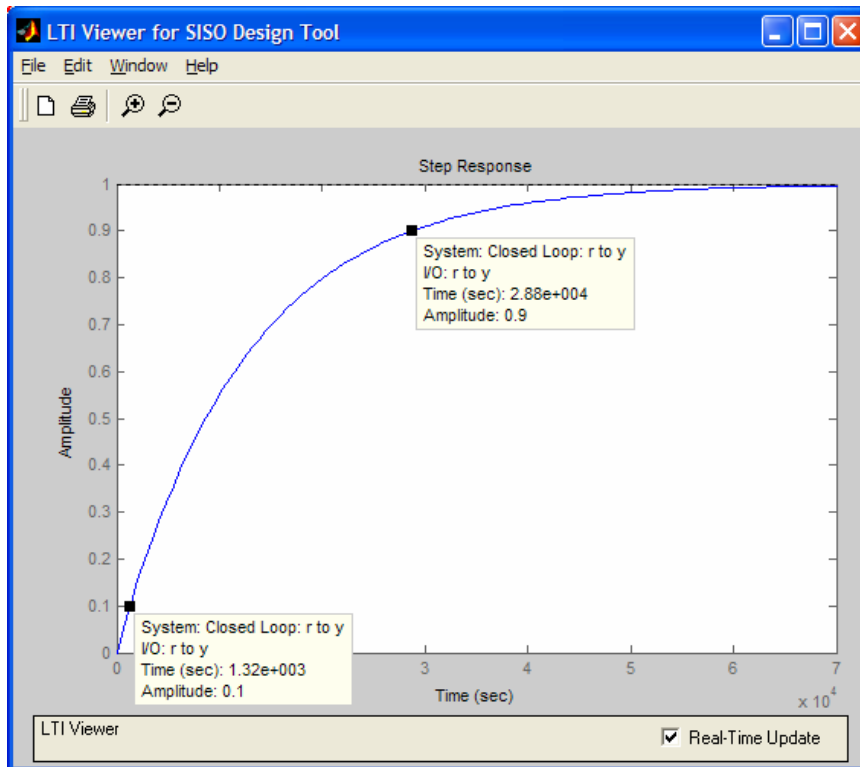
La primera parte del proyecto, consistió en el ensamblaje de la planta que sustituye la anterior. Cuando se implementó, se obtuvieron los datos necesarios para realizar el modelo de la planta. Como el sistema es relativamente lento se eligió un tiempo de muestreo de 10s. Los resultados se graficaron en Excel.



**Figura 16.** Datos tomados de la planta implementada.<sup>22</sup>

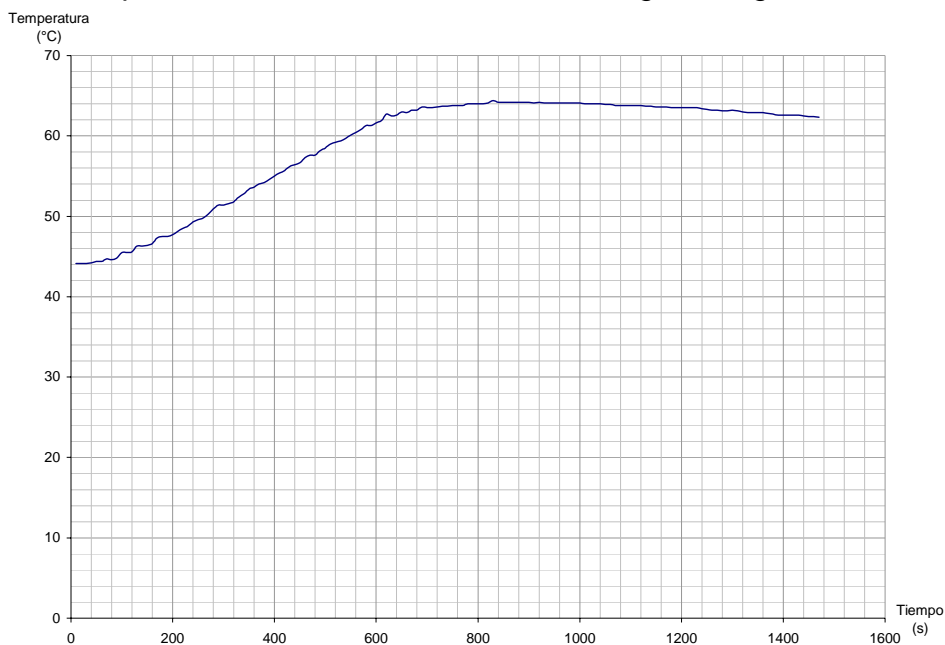
Bajo esta gráfica y otras tomadas, se realizaron los cálculos para obtener el modelo de primer orden calculado anteriormente y se determinó el tiempo de muestreo necesario. Se implementó un regulador con base a este modelo. Por ser de orden uno y con el polo prácticamente en cero, no se requería un regulador integral, sólo el proporcional. La siguiente figura fue realizada con Matlab, y se obtuvo con el modelo calculado en (9).

<sup>22</sup> Fuente: Datos tomados en el sistema.



**Figura 17.** Respuesta ante el escalón del modelo del sistema calculado para la planta.<sup>23</sup>

El modelo muestra un sistema lento, con un tiempo de subida de 7 horas, y se estabiliza sin sobreimpulso. El sistema real fue probado y se recolectaron datos del mismo periodo de muestreo, se obtuvo la siguiente gráfica.

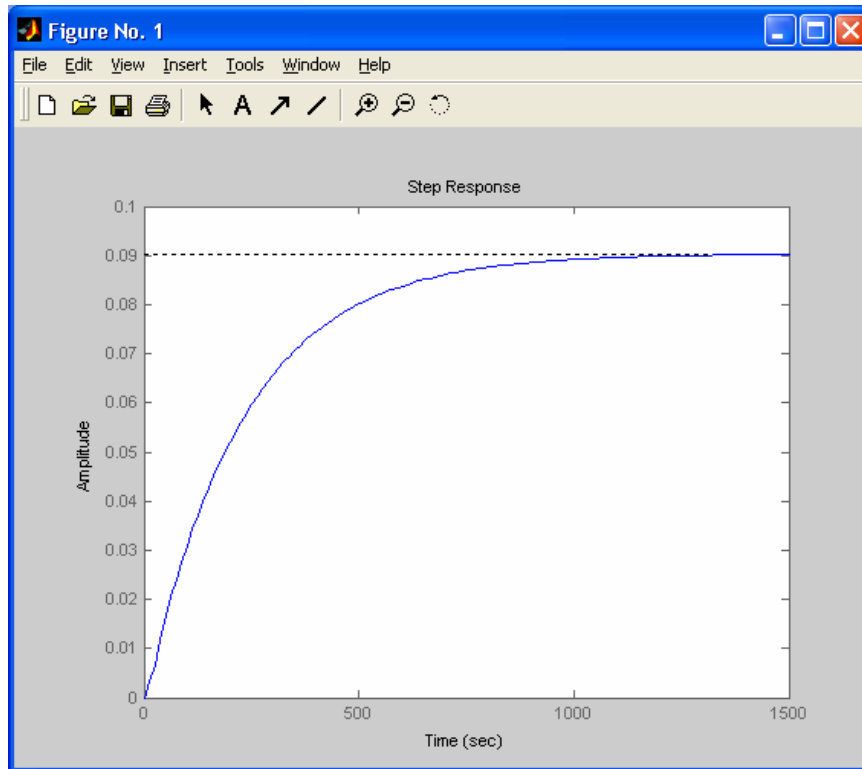


**Figura 18.** Respuesta real del sistema ante un escalón.<sup>24</sup>

<sup>23</sup> Fuente: Simulación de los datos hecha en Matlab.

<sup>24</sup> Fuente: Datos tomados al sistema.

Puede observarse que el sistema efectivamente presenta un sobreimpulso de 4 grados, equivalente al 25%. Podemos concluir que el sistema no se aproxima a un sistema de orden 1, ya que presenta sobreimpulso y además, tarda mucho para llegar a estabilizar. Para encontrar otro sistema con base a las mediciones tomadas en la planta, que logre aproximarse de manera más precisa al modelo de la planta, se utilizó la herramienta stochastic2, desarrollado en Matlab. Se utilizaron las mismas mediciones para desarrollar el modelo.

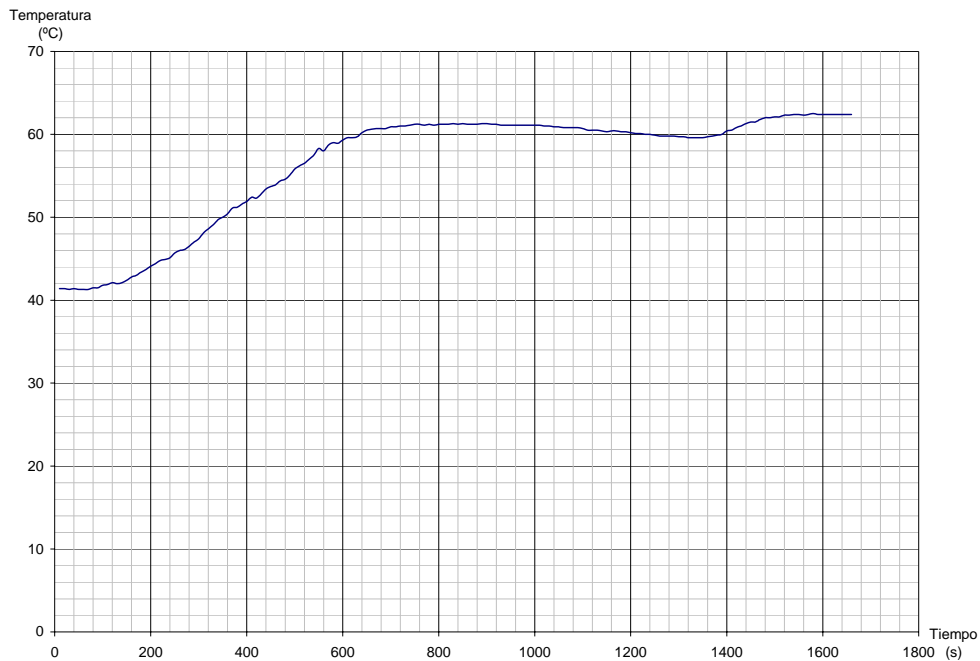


**Figura 19.** Respuesta ante el escalón del sistema de orden de grado 2.<sup>25</sup>

Este resultado muestra que existe un comportamiento integrador en el sistema, con un error de estado estacionario de 10%. El sistema es más rápido que el anterior, lo que si concuerda con el sistema. Sin embargo, la simulación del sistema no se asemeja con la prueba hecha en la Figura 18, ya que no presenta sobreimpulso, lo que indica que el sistema no concuerda con el modelo deseado.

<sup>25</sup> Fuente: Simulación realizada en Matlab.

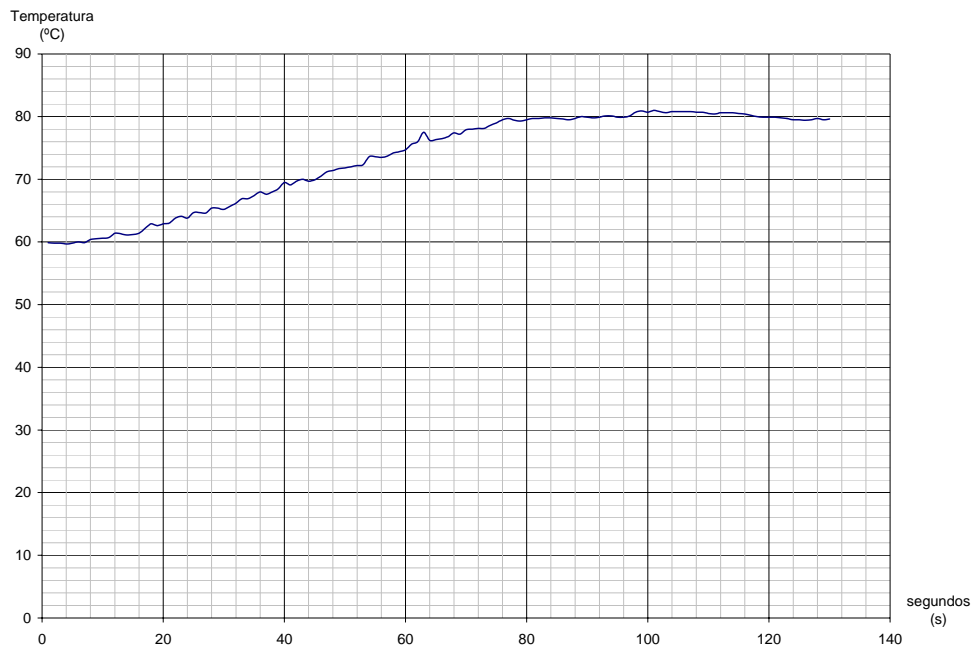
Se intentaron utilizar aún así varios reguladores basados en los métodos vistos en clase y explicados en la bibliografía. Se realizaron entonces pruebas empíricas para determinar las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  necesarias, basadas en sus características de control del sistema. Se variaron los valores de estas constantes dependiendo del comportamiento intrínseco de control. Los resultados obtenidos eran satisfactorios para una temperatura de ajuste en un rango pequeño de temperatura, de aproximadamente  $\pm 10^\circ\text{C}$ , por lo no se contaba con constantes únicas para el control del sistema en todo el proceso de calibración. Algunos ejemplos que se realizaron se muestran a continuación.



**Figura 20.** Datos obtenidos del sistema con una temperatura de ajuste de  $60^\circ\text{C}$ ,  $K_p = 5$ ,  $K_i = 1$ ,  $K_d = 1$ .<sup>26</sup>

<sup>26</sup> Fuente: Datos tomados al sistema

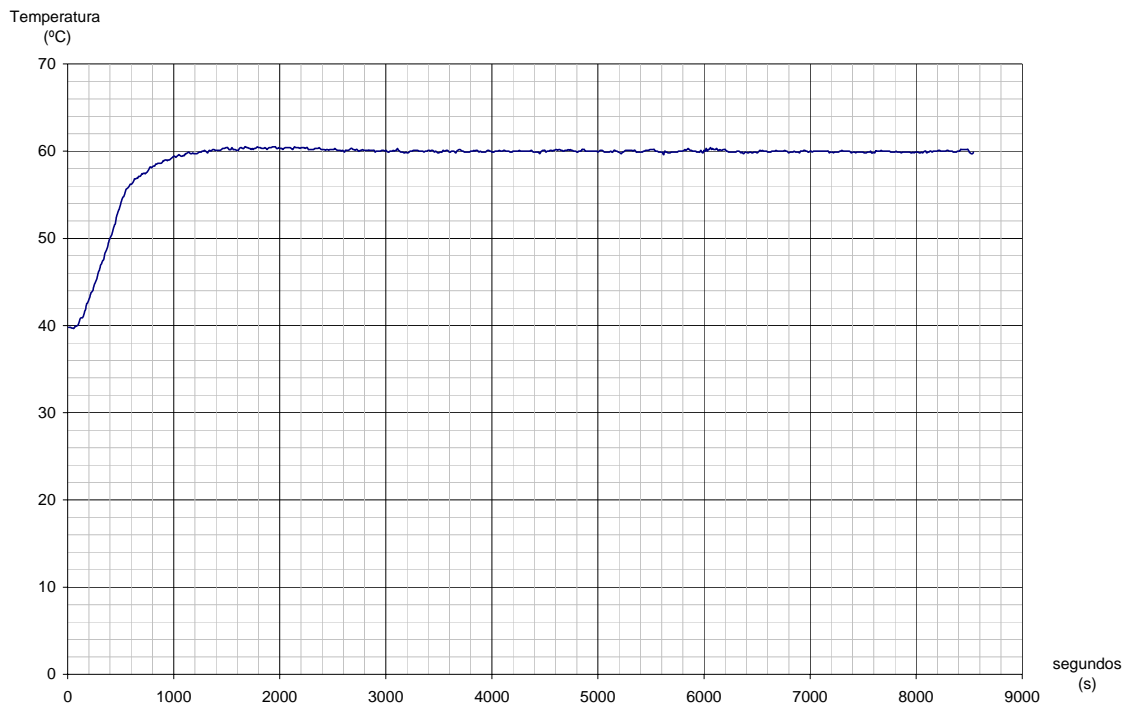




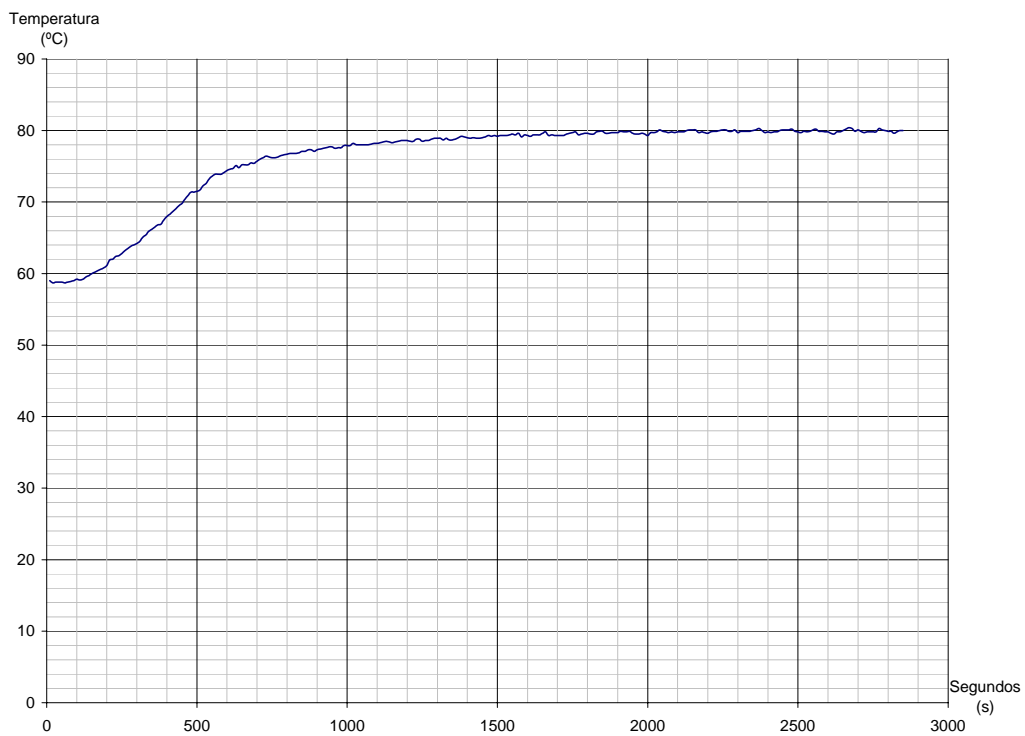
**Figura 21.** Datos obtenidos del sistema con una temperatura de ajuste de 80°C,  $K_p = 3.5$ ,  $K_i = 1$ ,  $K_d = 1$ .<sup>27</sup>

Estas gráficas muestran varios puntos de ajuste y diferentes constantes para cada uno, ya que no se logró implementar constantes que funcionaran para todos los puntos de forma similar. Se escogió realizar por ende el ajuste de parámetros, mediante la opción Autotuning. Se probaron tales datos y se llegaron a las siguientes gráficas.

<sup>27</sup> Ídem.



**Figura 22.** Respuesta al escalón del sistema regulado con temperatura de ajuste de 60°C con  $K_p = 7.7$ ,  $K_i = 735$ ,  $K_d = 183$ .<sup>28</sup>

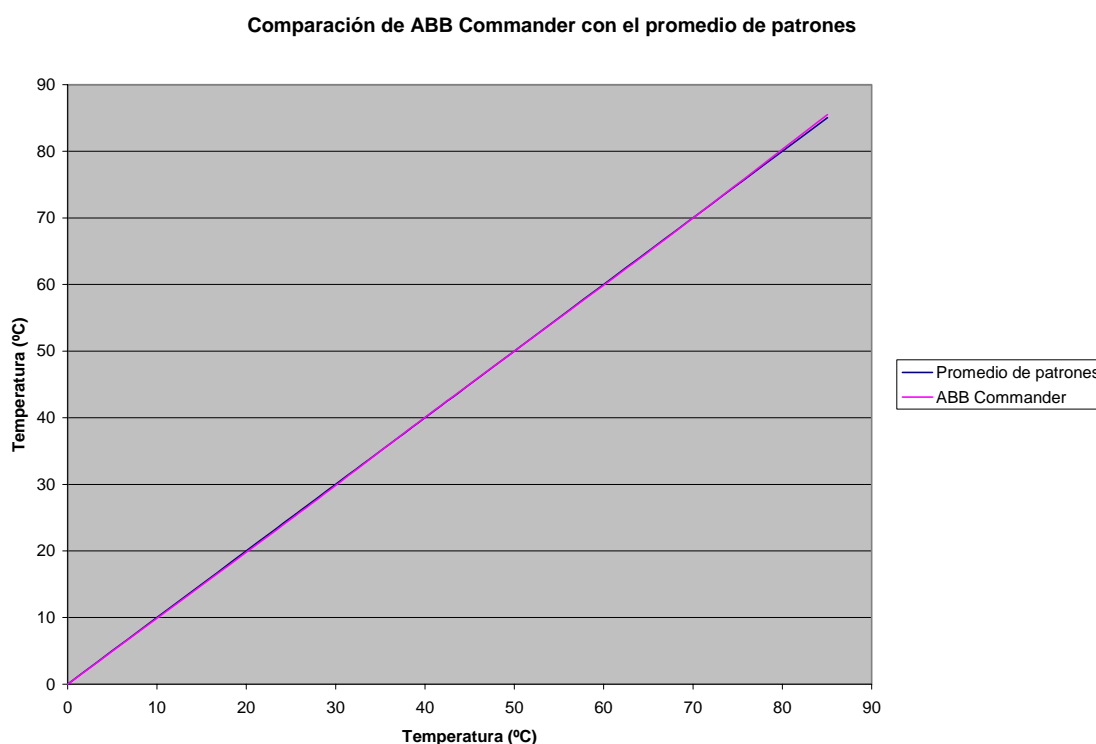


**Figura 23.** Respuesta al escalón del sistema regulado con temperatura de ajuste de 80°C con  $K_p = 7.7$ ,  $K_i = 735$ ,  $K_d = 183$ .<sup>29</sup>

<sup>28</sup> Ídem.

<sup>29</sup> Ídem.

El sistema de software implementado fue probado en múltiples ocasiones y se han realizado con éxito la calibración de 9 máquinas en una empresa cliente. Se redujo a menos de la mitad el tiempo de calibración común de tres horas en cada máquina, además de facilitar la adquisición de los datos que se requieren. El sistema genera varias gráficas de los instrumentos que se requieren calibrar para que el metrólogo analice los datos de una forma gráfica. Además, estas gráficas ayudan a la realización de informes técnicos que se deben presentar a la empresa donde se realiza la calibración. La siguiente gráfica muestra un ejemplo de los resultados de una calibración en un graficador ABB commander 1900.



**Figura 24.** Grafica realizada por el sistema en la calibración de una máquina ABB Commander.<sup>30</sup>

Esta gráfica le muestra al metrólogo que el instrumento a calibrar está bastante cercano a la medida de los patrones, por lo que no es necesario hacer un ajuste en el equipo.

Se realizaron varias pruebas con distintos sistemas operativos, y se encontró que el programa es compatible con versiones de Windows XP, Windows 2000 y Windows 98. Sin embargo, para las aplicaciones de Excel, es necesario tener instalado en el computador Microsoft Office 2003, o Microsoft Office 2000, en idioma inglés, ya que en otras versiones no es posible realizar todas las funciones deseadas como las gráficas. No obstante, en otras versiones de Office, como Office 2007 en español e inglés, se pueden adquirir los datos, pero no se realizan las gráficas.

<sup>30</sup> Fuente: Datos tomados en el proceso de calibración en la empresa.

Cabe destacar que el programa identifica los errores en los formatos sin perder los datos adquiridos y sin tener problemas en tiempo de ejecución.

También se verificaron las diversas funciones del programa como la modificación de los parámetros del puerto serie y del controlador, además de la adquisición de datos cada 10 segundos del sistema. Además, reconoce e identifica errores varios del manejo de Windows, Office, y la comunicación del controlador, informando al usuario mediante ventanas de alarma que ha ocurrido algún problema con el sistema.

## **Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones.**

### **7.1. Conclusiones.**

Se implementó un sistema mecánico capaz de distribuir el agua por convección de forma uniforme en el sistema, disminuyendo el gradiente de temperatura en distintos niveles del agua a 0.3°C.

Se construyó un sistema de calentamiento en la planta que reduce el tiempo de calentamiento a 15 minutos, utilizando una resistencia de 900W tipo plana, incrementando la cantidad de energía calórica generada y la velocidad de la transferencia de calor.

Se diseñó un sistema capaz de controlar los parámetros estáticos y dinámicos del sistema. Se utilizaron varios valores en las constantes de regulación de la planta en forma experimental y se comprobó que la constante de regulación proporcional  $K_p$  de 7.7, la constante de integración de 735, y la constante derivativa de 183, disminuyen el sobreimpulso al 1%, el error de estado estacionario a 0.5°C y el tiempo de estabilización a un tiempo menor de 5 minutos.

En un controlador Delta, la opción de Autotuning obtiene los valores más precisos y óptimos para obtener los parámetros de regulación del sistema.

Un convertidor de EIA232 a EIA485 permite la comunicación entre un servidor (master) y varios esclavos(slaves) utilizando protocolo MODBUS, por lo que se pueden tener varios sistemas funcionando en paralelo para hacer más rápido el proceso de calibración.

Se realizó un programa en Visual Basic 6.0 capaz de comunicarse con el sistema utilizando algoritmos de comunicación por el puerto serie. El programa puede obtener datos desde el controlador, colocarlos y tratarlos en Microsoft Excel. Los datos recolectados son utilizados para ayudar al metrólogo a tomar decisiones sobre las modificaciones que se deben hacer sobre los instrumentos a calibrar.

Las aplicaciones que utilizan OLE Automation, pueden comunicarse con otras aplicaciones de Windows y Office para realizar por ejemplo cálculos y diagramas. El programa actual utiliza este protocolo para realizar tablas numeradas y gráficas para cada uno de los instrumentos a calibrar.

Visual Basic 6.0 permite detectar errores del sistema operativo Windows para solucionar conflictos en el programa. El programa está hecho de tal forma que la mayoría de los errores comunes son reconocidos, por lo que se puede afrontar estos conflictos sin que el programa se desestabilice o entre en errores de ejecución.

## **7.2. Recomendaciones.**

El sistema se comportó problemático con los valores de regulación obtenidos mediante los reguladores calculados por los métodos estocásticos descritos anteriormente. Estos reguladores se probaron para distintos puntos de ajuste, y no se logró un controlador aceptable para cumplir los objetivos. También se probaron, mediante los comportamientos individuales de las constantes, variables empíricas, pero con resultados igualmente problemáticos.

Al utilizar la opción de Autotuning en el controlador, se obtuvieron las constantes que realizaban una estabilización adecuada de la planta, que cumpla con los objetivos propuestos. Se recomienda que en otros proyectos, se realizara el análisis de estos resultados, para justificar el modelado y el regulador con el sistema real.

Un problema del sistema es que, cuando se presenta un sobreimpulso, el sistema tarda mucho en lograr bajar su temperatura, ya que el agua posee mucha inercia térmica. Una mejora que se puede implementar al sistema, es algún tipo de control de enfriamiento, donde se aplique refrigerante en el recipiente, y con esto aumente la velocidad de la estabilización.

## Bibliografía.

1. *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*, [En línea]. Disponible: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.
2. *Conducción de Calor* [En línea]. Disponible: [http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n\\_de\\_calor](http://es.wikipedia.org/wiki/Conducci%C3%B3n_de_calor)
3. Castillejos, Adela. (No hay fecha). *Química General* [En línea]. Disponible: <http://www.cneq.unam.mx/adela/archivos/termoquimica.htm>
4. Ogata, K. (1993) *Ingeniería de control moderna*. (Segunda Edición), México, Prentice-Hall Hispanoamericana.
5. Malean, S. *Lectures 1 and 2 of the Mechanical Engineering Laboratory* [En línea]. Disponible: <http://www.me.ucsb.edu/~mclean/me105/lectures/Lec1&2.pdf>
6. Modicon. *Modicon Modbus Protocol Reference Guide*. [En línea]. Disponible: [www.eecs.umich.edu/~modbus/documents/PI\\_MBUS\\_300.pdf](http://www.eecs.umich.edu/~modbus/documents/PI_MBUS_300.pdf).
7. Delta Temperature Controllers. *DTA Series User Manual*.
8. Interiano, E. *Diseño de reguladores de un solo lazo* [En línea]. Disponible: [www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/clase/1.1.0Dise%20de%20reguladores%20de%20un%20solo%20lazo.pdf](http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/clase/1.1.0Dise%20de%20reguladores%20de%20un%20solo%20lazo.pdf)
9. Interiano, E. *Modelado Estocástico por el método de mínimos Cuadrados*. [En línea] Disponible: [www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/3.6ModeladoEstocastico.pdf](http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/3.6ModeladoEstocastico.pdf)