



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“METROLOGÍA: CONSTRUCCIÓN DE UN CALIBRADOR TIPO BAÑO  
PARA INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA CON  
INTERFAZ EN LABVIEW PARA MONITOREO Y OBTENCIÓN DE DATOS.”**

## **INFORME DE PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN  
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**Presentado por:**

David Sebastián Escandón Vizuela

Pablo Andrés Escandón Vizuela

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO 2014

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, a mi familia, al Ing. Holger Cevallos y a todas las personas que me apoyaron y acompañaron durante toda esta etapa de desarrollo del proyecto.

**David Escandón Vizuela**

Le agradezco a Dios por las metas alcanzadas. A cada miembro de mi familia por el apoyo incondicional que me han brindado, a nuestro director el Magister Holger Cevallos por su guía en el desarrollo del proyecto.

**Pablo Escandón Vizuela**

## DEDICATORIA

Deseo dedicar este proyecto a cada miembro de mi familia, a mis amigos más cercanos y a los profesores que supieron guiarme a lo largo de mi carrera.

**David Escandón Vizuela**

Dedico este proyecto a mi familia, amigos, profesores y especialmente a mi futura esposa.

**Pablo Escandón Vizuela**

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

Ph.D. Boris Vintimilla B.  
Subdecano de la FIEC

---

Magister Holger Cevallos  
Director de Proyecto de Grado

---

Ing. Alberto Larco  
Miembro Principal

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad del contenido de este Informe, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)

---

David Sebastián Escandón Vizueta

---

Pablo Andrés Escandón Vizueta

## RESUMEN

El presente trabajo trata sobre la introducción al campo de la metrología con la fabricación de un calibrador de temperatura tipo baño que necesitó de la identificación y diseño de un controlador, además profundizando en el proceso de calibración también se realizó el cálculo de la incertidumbre del calibrador de temperatura y de un termómetro bimetálico.

En los últimos años, la industria en general ha sufrido cambios que lo ha direccionado a rumbos de mayor exigencia. La creciente demanda de productos de consumo con mayor calidad, obligan a que los procesos industriales estén regidos a numerosas normas estandarizadas, con la única finalidad de llegar a tener un producto confiable y adecuado para su consumo.

El presente proyecto se basa en el análisis y explicación de la metrología, que siendo este el estudio de la medición, toma un papel fundamental en el área de la instrumentación y la industria en general. Su importancia ha venido trascendiendo en los últimos años, no solo alrededor del mundo, sino también en nuestro país.

Es por ello, que para el completo entendimiento de nuestro proyecto, fue esencial la fabricación de un calibrador de tipo baño, que por medio de un controlador desarrollado con el software Labview, pueda calibrar sensores de temperatura a un determinado punto.

Cada vez, existen más equipos de medición que deben de estar debidamente calibrados, desde que este sale de la fábrica hasta que termine su tiempo de vida. Y es que el cumplimiento de estas normas, dan como resultado un adecuado conocimiento de la producción y la mejora continua del mismo.

## Capítulo 1

Explicación del concepto de la metrología, terminología y la importancia de ella en el ámbito laboral de las industrias y su efecto en nuestro país. También se da cierta referencia a la organización de las entidades nacionales e internacionales encargadas de la metrología en sus respectivas regiones y/o países.

## Capítulo 2

Definición de los sensores de temperaturas existentes en la actualidad y los tipos de calibradores de temperatura que existen en el mercado. Diseño y

descripción de las partes y dispositivos que conforman el calibrador de temperatura tipo baño desarrollado para este proyecto.

### Capítulo 3

Diseño y programación del controlador de temperatura por medio del software Labview. Se muestran los diversos datos obtenidos con el análisis de los resultados adquiridos.

### Capítulo 4

Definición de homogeneización, su importancia y métodos para la obtención de una sustancia correctamente homogeneizada. Detección de la constante axial de temperatura del calibrador tipo baño desarrollado.

### Capítulo 5

Cálculo y análisis de la incertidumbre del calibrador y del termómetro a calibrar. De esta manera podemos observar los diferentes factores que afectan en la incertidumbre del instrumento.



# ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>II</b>
<b>TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN</b> .....	<b>III</b>
<b>DECLARACIÓN EXPRESA</b> .....	<b>IV</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>V</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>SIMBOLOGÍA</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>2</b>
1. METROLOGÍA .....	2
1.1. <i>Definición de la Metrología</i> .....	2
1.2. <i>Definición de calibración</i> .....	4
1.3. <i>Clasificación de la Metrología</i> .....	8
1.3.1. <i>La Metrología en la magnitud de temperatura</i> .....	9
1.4. <i>Organización de la metrología en el mundo</i> .....	13
1.4.1. <i>Organización en América</i> .....	15
1.4.2. <i>La metrología en Ecuador</i> .....	16
1.5. <i>Impacto de la metrología en el desarrollo de la sociedad</i> .....	18
1.6. <i>Terminología de la metrología y Unidades de Medida</i> .....	19
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>24</b>
2. CALIBRADORES DE TEMPERATURA.....	24
2.1. <i>Partes generales de un calibrador de temperaturas</i> .....	25
2.2. <i>Tipos de calibradores de temperatura</i> .....	36
2.2.1. <i>Calibrador de temperatura tipo baño</i> .....	38
2.2.1.1. <i>Explicación introductoria del calibrador tipo baño desarrollado</i> .....	38
2.2.1.2. <i>Diagrama de bloque del calibrador tipo baño</i> .....	40
2.2.1.3. <i>Diseño de la estructura del calibrador de temperatura</i> .....	41

2.2.1.4. Partes del calibrador de temperatura tipo baño .....	44
2.2.1.5. Equipo para la Adquisición de Datos .....	57
2.2.1.6. Software LabVIEW .....	59
2.2.1.7. VI's creados para el calibrador tipo baño.....	61
2.2.2. Ejemplos de calibradores de temperatura tipo baño en el mercado .....	64
<b>CAPITULO 3 .....</b>	<b>67</b>
3. DISEÑO DEL CONTROLADOR .....	67
3.1. <i>Obtención del Modelo Matemático</i> .....	67
3.1.1. Adquisición de Datos .....	67
3.1.2. Análisis e identificación del calibrador .....	71
3.2. <i>Sintonización</i> .....	79
3.2.1. Elección de modelo de sintonización .....	79
3.2.2. Pruebas del método elegido.....	84
3.2.3. Análisis de los resultados.....	85
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>88</b>
4. HOMOGENEIDAD DE TEMPERATURA EN EL CALIBRADOR TIPO BAÑO.....	88
4.1. <i>Significado</i> .....	88
4.2. <i>Importancia de la homogeneidad de temperatura en el calibrador     de temperatura</i> .....	89
4.3. <i>Estudio de homogeneidad del líquido a utilizar en el proceso</i> .....	90
4.3.1. Equipos a utilizar en el estudio de homogeneidad .....	98
4.3.2. Pruebas de homogeneidad .....	101
4.3.3. Análisis de Resultados .....	105
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>107</b>
5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	107
5.1. <i>Pruebas y análisis</i> .....	107
5.1.1. Planteamiento de pruebas .....	107
5.1.2. Pruebas y Resultados .....	108
5.1.3. Análisis de resultados .....	122
5.2. <i>Calibración de termómetro</i> .....	124
5.2.1. Pruebas y análisis de la calibración .....	124
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>135</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>138</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>140</b>

ANEXO A.....	140
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>146</b>

## ABREVIATURAS

<b>ANDIMET:</b>	Asociación Andina de metrología.
<b>BIPM:</b>	Bureau International de Poids et Mesures.
<b>CAMET:</b>	Central America Metrology Cooperation.
<b>CARIMET:</b>	Caribbean Metrology Cooperation.
<b>CEM:</b>	Centro Español de Metrología.
<b>CGPM:</b>	Conferencia General de Pesas y Medidas.
<b>CMEE:</b>	Centro de Metrología del Ejército Ecuatoriano.
<b>CTB:</b>	Calibrador de Temperatura tipo Baño.
<b>DC:</b>	Direct Current.
<b>DIN:</b>	Deutsches Institut für Normung.
<b>EURAMET:</b>	European Association of National Metrology Institutes.
<b>INEN:</b>	Instituto Ecuatoriano de Normalización.
<b>INM:</b>	Institutos Nacionales de Metrología.
<b>JCDCMAS:</b>	Joint Committee on Co-ordination of Assistance to Developing Countries in Metrology, Accreditation and Standardization.
<b>JCGM:</b>	Joint Committee for Guides in Metrology.
<b>JCTLM:</b>	Joint Committee for Traceability in Laboratory medicine.
<b>JIS:</b>	Japanese Industrial Standards.
<b>NCSL:</b>	National Conference of Standard.
<b>NI:</b>	National Instruments.
<b>NIST:</b>	National Institute of Standard and Technologies.

- NORAMET:** North American Metrology Cooperation.
- OEA:** Organización de Estados Americanos.
- P:** Proporcional.
- PI:** Proporcional, Integral.
- PID:** Proporcional, Integral, Derivativo.
- RTD:** Resistance Temperature Detector.
- SERLAM:** Servicio Latinoamericano de metrología.
- SIM:** Sistema Interamericano de Metrología.
- SURAMET:** Asociación Sudamérica de metrología.
- VIM:** Vocabulario Internacional de Metrología.

## SIMBOLOGÍA

A:	Amperios
cd:	Candela
Q:	Cantidad de calor
$\tau$ :	Constante de tiempo
I:	Corriente
k:	Ganancia del sistema
$^{\circ}\text{C}$ :	grados centígrados
$^{\circ}\text{F}$ :	grados Fahrenheit
K:	Kelvin
kg:	Kilogramos
$k_{\text{cert}}$ :	valor k del certificado
ms:	milisegundos
min:	Minutos
Pot:	Potencia
T:	Retardo
s:	Segundos
t:	tiempo
$u(\text{comb})$ :	Incertidumbre combinada
$U_{\text{cert}}$ :	Incertidumbre del certificado
$u(\text{pat})$ :	Incertidumbre del patrón

u(exp):	Incertidumbre expandida
u(der pat):	Incertidumbre por la deriva del patrón
u(his):	Incertidumbre por la histéresis
u(rep):	Incertidumbre por la repetibilidad del instrumento
u(res):	Incertidumbre por la resolución del instrumento
u(var):	Incertidumbre por la variación de temperatura
u(axc):	Incertidumbre por variación de la temperatura axial
V:	Voltaje

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 ORGANIZACIÓN DE LA CONVENCION DEL METRO [8].	15
FIGURA 2.1 SENSORES RTDs [15].	26
FIGURA 2.2 GRÁFICA RESISTENCIA VS. TEMPERATURA [15].	27
FIGURA 2.3 SENSOR INFRARROJO [15].	30
FIGURA 2.4 TERMISTORES [15].	31
FIGURA 2.5 CONTROLADOR [18].	33
FIGURA 2.6 TARJETA DE ADQUISICIÓN [28].	33
FIGURA 2.7 CALIBRADORES BLOQUE SECO [16].	36
FIGURA 2.8 CALIBRADOR DE BAÑO LÍQUIDO [17].	37
FIGURA 2.9 DIAGRAMA DE BLOQUE DEL CALIBRADOR.	40
FIGURA 2.10 DIAGRAMA DE ESTADOS.	41
FIGURA 2.11 COMPARTIMIENTO DE CALENTAMIENTO	42
FIGURA 2.12 COMPARTIMIENTO DE CIRCUITERÍA	43
FIGURA 2.13 VISTA EXTERNA DEL CALIBRADOR DE TEMPERATURA	44
FIGURA 2.14 DISEÑO DEL CILINDRO DEL CALIBRADOR TIPO BAÑO (EN CENTÍMETROS).	45
FIGURA 2.15 GRÁFICA INTERNA DEL RELÉ [19].	46
FIGURA 2.16 CARGA RESISTIVA CONECTADA A SSR [19].	49
FIGURA 2.17 DIMENSIONES DEL SSR [20].	50
FIGURA 2.18 AGITADOR MAGNÉTICO [21].	50
FIGURA 2.19 RTDs PARA UTILIZAR EN EL CALIBRADOR [23].	54
FIGURA 2.20 PASTILLA TRANSMISORA.	57
FIGURA 2.21 VI DEL PANEL FRONTAL DEL CALIBRADOR DE TEMPERATURA	62
FIGURA 2.22 VI DEL DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CALIBRADOR DE TEMPERATURA	63
FIGURA 2.23 CALIBRADOR DE TEMPERATURA TIPO BAÑO 1 [27].	64
FIGURA 2.24 CALIBRADOR DE TEMPERATURA TIPO BAÑO 2 [28].	65
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL CALIBRADOR.	69
FIGURA 3.2 GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE TEMPERATURA EN LA ADQUISICIÓN DE DATOS.	70
FIGURA 3.3 GRÁFICA DE LA SEÑAL CUADRADA DE ESTIMULACIÓN.	70
FIGURA 3.4 VARIABLES A UTILIZAR PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA.	72
FIGURA 3.5 TOMA DE MUESTRA PARA ANALIZAR.	73
FIGURA 3.6 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMA.	74



FIGURA 3.7 SEÑAL DE RESPUESTA REAL Y SIMULADA CON MODELO ARMAX. ....	76
FIGURA 3.8 SEÑAL DE RESPUESTA REAL Y SIMULADA CON MODELO OUTPUT- ERROR. ....	76
FIGURA 3.9 SEÑAL DE RESPUESTA REAL Y SIMULADA CON MODELO BOX JENKINS. ....	76
FIGURA 3.10 SEÑAL DE RESPUESTA REAL Y SIMULADA CON MODELO ARX. ....	77
FIGURA 3.11 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DISCRETA. ....	77
FIGURA 3.12 GRÁFICA DE SEÑAL DE PRIMER ORDEN CON RETARDO [30]. ....	78
FIGURA 3.13 SEÑALES DE ESTÍMULO Y RESPUESTA .....	80
FIGURA 3.14 SIMULACIÓN DE CONTROLADOR P. ....	82
FIGURA 3.15 SIMULACIÓN DE CONTROLADOR PI. ....	82
FIGURA 3.16 SIMULACIÓN DE CONTROLADOR PID. ....	83
FIGURA 3.17 SEÑAL CON CONTROLADOR PI. ....	84
FIGURA 3.18 SEÑAL CON CONTROLADOR PID. ....	85
FIGURA 3.19 SEÑAL DE TEMPERATURA CON EL PI FINAL. ....	87
FIGURA 4.1 MOVIMIENTO DEL LÍQUIDO AL SER AGITADO [32]. ....	93
FIGURA 4.2 SE MUESTRA EL CALIBRADOR DE BAÑO SIN TAPA, DONDE SE PUEDE APRECIAR EL FLUJO CIRCULATORIO GENERADO POR EL AGITADOR. ....	94
FIGURA 4.3 MÉTODO SENCILLO Y EFICAZ PARA DESTRUIR LOS REMOLINOS, INSTALAR PLACAS VERTICALES PERPENDICULARES A LA PARED DEL TANQUE [32]. ....	95
FIGURA 4.4 ESTRUCTURA CON REJILLA EN LA PARTE INFERIOR. ....	96
FIGURA 4.5 REJILLA PARA CALIBRADOR DE TEMPERATURA. ....	96
FIGURA 4.6 ESTRUCTURA CON REJILLA DENTRO DEL LÍQUIDO DEL CALIBRADOR. ...	97
FIGURA 4.7 PATRÓN DE TEMPERATURA DTI -1000 [16]. ....	99
FIGURA 4.8 SONDA DE TEMPERATURA DEL PATRÓN DE TEMPERATURA [16]. ....	100
FIGURA 4.9 PUNTO INFERIOR, PUNTO CENTRAL Y PUNTO SUPERIOR. ....	102
FIGURA 5.1 FRAGMENTO DEL CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL PATRÓN A UTILIZAR. ....	110
FIGURA 5.2 TERMÓMETRO CALIBRANDO EN EL PUNTO 75°C. ....	130
FIGURA 5.3 TERMÓMETRO CALIBRANDO EN EL PUNTO 55°C. ....	131
FIGURA 5.4 CALCULADORA DE INCERTIDUMBRE EN LABVIEW .....	134

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 TABLA DE TERMOMETRÍA CON SUS SUB-CAMPOS Y PATRONES IMPORTANTES [3].	9
TABLA 1.2 PUNTOS <i>FIJOS</i> DE DEFINICIÓN DE LA ESCALA EIT-90 [8].	11
TABLA 1.3 UNIDADES USADAS POR EL SISTEMA INTERNACIONAL [14].	23
TABLA 2.1 COEFICIENTE DE DIVERSAS RTDs [15].	27
TABLA 2.2 TIPOS DE TERMOPARES [15].	29
TABLA 2.3 CORRIENTE POR CALIBRE DE CABLES [22].	53
TABLA 3.1 FORMULAS PARA OBTENER DATOS DEL CONTROLADOR.	80
TABLA 3.2 DATOS DE CONTROLARES.	81
TABLA 4.1 DATOS PARA ESTUDIO DE HOMOGENIZACIÓN.	104
TABLA 4.2 TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS.	105
TABLA 4.3 DESVIACIÓN EN EL CALIBRADOR DE TEMPERATURA.	106
TABLA 5.1 DATOS DE TEMPERATURA AL CALIBRAR EL CTB.	114
TABLA 5.2 TEMPERATURA EN DIVERSAS PARTES DEL CALIBRADOR.	115
TABLA 5.3 VARIACIÓN DE TEMPERATURA A 50°C.	117
TABLA 5.4 VARIACIÓN DE TEMPERATURA A 75°C.	118
TABLA 5.5 DATOS DE TEMPERATURA PARA EL CÁLCULO DE LA REPETIBILIDAD.	120
TABLA 5.6 TABLA DE VALORES DE INCERTIDUMBRES OBTENIDOS.	122
TABLA 5.7 DATOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL TERMÓMETRO BIMETÁLICO.	131

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como objetivo explicar el concepto de la metrología, así como la implementación de un calibrador de temperatura de tipo baño fabricado por los autores de este proyecto.

La metrología es un tema de gran importancia en el entorno industrial, por lo cual hemos tomado este tema para desarrollarlo en nuestro proyecto de graduación. La necesidad de implementar un calibrador para realizar la calibración de instrumentos de temperatura, nos va ayudar a desarrollar el tema de metrología.

Empezamos con ciertos conceptos dentro de la metrología, buscamos explicar y orientar al lector el significado de la metrología, sus fundamentos y su contribución en la industria. Además, se detalla los distintos sensores y calibradores de temperatura que existen en la actualidad, y las partes y piezas que conforman el calibrador de tipo baño construido para este proyecto.

Explicar la programación del controlador de temperatura con Labview, donde el manejo de software nos permite desarrollar los PIDs necesarios. Los resultados obtenidos nos van a permite revisar el comportamiento del sistema. Cada punto servirá para construir un calibrador acorde a las necesidades.

Al final de nuestros proyecto, vamos a presentar el proceso de homogeneización, las observaciones que hay que considerar para que un sistema esté lo más homogéneo posible. Otro punto es el análisis para la detección de la incertidumbre del sistema y del instrumento a calibrar.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. Metrología**

El calibrador de temperatura es una herramienta para poder realizar procesos de calibración, lo cual forma parte del campo de la metrología. En este primer capítulo vamos a realizar una introducción que nos permita entender con mayor claridad la metrología, dando paso a los siguientes capítulos donde nos centraremos en el equipo, pero primero necesitamos de un mayor conocimiento sobre la metrología.

Hemos realizado un compendio de definiciones, ejemplos, y estructuras sobre la metrología que nos ayudarán a entender este campo tan necesario en nuestra vida cotidiana. La metrología nos ayudará a ser eficientes y eficaces.

## 1.1. Definición de la Metrología

**La Metrología es la ciencia que tiene por objeto el estudio de las propiedades medibles, las escalas de medida, los sistemas de unidades, los métodos y técnicas de medición, así como la evolución de lo anterior, la valoración de la calidad de las mediciones y su mejora constante, facilitando el progreso científico, el desarrollo tecnológico, el bienestar social y la calidad de vida [1].**

Si buscamos un significado simple dado por el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española obtenemos que la metrología es “la ciencia que tiene por objeto el estudio de los sistemas de pesas y medidas” [2]. Pero pasando a una explicación más detallada dada por el libro “Metrología – Abreviada” [3] tenemos que la metrología cubre tres actividades principales:

- La definición de las unidades de medida internacionalmente aceptadas.
- La realización de las unidades de medida por métodos científicos.

- El establecimiento de las cadenas de trazabilidad, determinando y documentando el valor y exactitud de las mediciones y diseminando dicho conocimiento.

Para entender mejor los puntos anteriores podemos dar los siguientes ejemplos:

- Como unidad de medida internacionalmente aceptada tenemos al metro (m).
- Un método científico sería la realización del metro mediante el empleo de láseres estabilizados.
- Las cadenas de trazabilidad y documentación necesaria se observa en la relación documentada existente entre un micrómetro de exteriores utilizado en una sala de ingeniería de precisión y el laboratorio primario en metrología óptica de longitudes.

Como la metrología abarca todo lo relacionado a la medición, va muy de la mano con cualquier proceso dentro de la industria, donde medimos las variables críticas que afectan al proceso y se desean regular.

## 1.2. Definición de calibración

Una referencia importante en la metrología es el CEM (Centro Español de Metrología), con uno de sus procedimientos que es el TH-001, el cual define a la calibración como:

**El conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones [4].**

En ocasiones solemos confundir la calibración con otros procesos. Si buscamos el significado de calibración en el VIM (Vocabulario internacional de términos metrológicos) vamos a encontrar la misma definición de calibración dada por el CEM. Una explicación mayor sobre este tema es que:

**La calibración determina las características metrológicas del instrumento o del material de referencia y se realiza mediante comparación directa con patrones de medida o materiales de**



**referencia certificados. La calibración da lugar a un Certificado de Calibración y, en la mayoría de los casos, se fija una etiqueta al instrumento calibrado [5].**

Dentro de la definición de calibración aclararemos lo que son las características metrológicas de un instrumento. Del libro “Metrología: Introducción, conceptos e instrumentos” tenemos que las características metrológicas son las siguientes [6]:

***Campo de medida:*** Intervalo de valores que puede tomar la magnitud a medir con un instrumento determinado; un instrumento puede poseer varios campos de medida.

***Alcance:*** Valor máximo que se puede medir con el instrumento, no siempre coincide con el valor máximo indicado en la escala del instrumento.

***Sensibilidad:*** Para un cierto valor de la magnitud a medir, se expresa como el cociente entre el incremento observado en la variable y el incremento correspondiente de la magnitud medida.

***División de escala:*** Intervalo entre dos valores sucesivos en la escala de medida. Algunos instrumentos disponen de más de una división de escala. Si un instrumento trabaja con el empleo

simultáneo de más de una escala, consideramos como división de escala de ese instrumento a la menor.

***Incertidumbre:*** Es el parámetro cuantificador de la precisión de un instrumento. La incertidumbre de medida es una característica individual del mismo que se obtiene tras su calibración. Se representa como  $\pm$ , que nos indica el error que podemos cometer al medir con dicho instrumento.

***Fiabilidad:*** Es la facultad para realizar una función bajo condiciones determinadas, durante un tiempo. Se expresa con un valor numérico que nos indica la probabilidad de dicha función se cumpla.

***Repetibilidad:*** Decimos que un conjunto de mediciones de una misma magnitud se realiza en condiciones de repetibilidad cuando lo lleva a cabo el mismo operario utilizando el mismo instrumento, el mismo método, en el mismo laboratorio y en intervalos de tiempo pequeños.

***Reproducibilidad:*** Un conjunto de mediciones de la misma magnitud se realiza en condiciones de reproducibilidad cuando es llevado a cabo por distintos operarios con distintos instrumentos en diferentes laboratorios y/o en intervalos de tiempo grandes. Cualquier medición debe estar documentada de tal modo que permita su repetición o su reproducción según el caso.

Al tener claramente las características metrológicas podemos ver de mejor manera la diferencia entre otros términos que se suelen confundir con la palabra calibración.

Uno de los procesos con los que se puede confundir es con la verificación, que por su parte, consiste en:

**Revisar, inspeccionar, ensayar, comprobar, supervisar, o realizar cualquier otra función análoga, que establezca y documente que los elementos, procesos, servicios o documentos están conformes con los requisitos especificados. La verificación no tiene la complejidad que tiene la calibración, a simple vista podría ser lo mismo pero ahora sabemos que la calibración exige un trabajo metrológico [5].**

En muchos casos se observa que se confunde a la calibración con el ajuste del instrumento. Una definición simple de ajuste la tomamos de la revista de metrología "YOTTA" que dice: "Ajuste es una operación que se le hace a algunos instrumentos para llevarlos a un estado en que puedan ser utilizados, por ejemplo cuando se gira un tornillo en una balanza para que su lectura sea cero" [7]. Una diferencia entre el ajuste y la calibración que define cada proceso es el uso de un equipo

patrón, en la calibración necesitamos de este equipo mientras que el ajuste en muchos casos solo necesita de la percepción de la persona.

### **1.3. Clasificación de la Metrología**

La metrología se puede dividir en tres categorías, las cuales tiene una complejidad y exactitud diferentes [3]:

- La Metrología Científica es la encargada de organizar, desarrollar patrones de medida, y darles mantenimiento, este es el nivel más alto.
- La Metrología Industrial debe asegurar el adecuado funcionamiento de los instrumentos de medida empleados en la industria, en los procesos de producción y verificación para asegurar la calidad de vida de los ciudadanos y para la investigación académica.
- La Metrología legal se ocupa de aquellas mediciones que influyen sobre la transparencia de las transacciones económicas, particularmente cuando hay un requisito de verificación legal del instrumento de medida.

### 1.3.1. La Metrología en la magnitud de temperatura

Dentro de la metrología industrial y científica tenemos un campo temático llamado termometría, el cual se divide en:

- Medición de temperatura por contacto.
- Medición de temperatura sin contacto.
- Humedad.

TERMOMETRÍA		
	Medición de temperatura por contacto	Termómetros de gas, puntos fijos de la Escala Internacional de temperatura de 1990 (EIT 90), termómetros de resistencia, termopares
	Medición de temperatura sin contacto	Cuerpos negros de alta temperatura, radiómetros criogénicos, pirómetros, fotodiodos de Silicio
	Humedad	Medidores de punto de rocío o higrómetros electrónicos, generadores de humedad de doble presión/temperatura

Tabla 1.1 Tabla de termometría con sus sub-campos y patrones importantes [3].

A continuación vamos a revisar las diferentes situaciones donde se necesita medir la temperatura con ayuda del libro “Metrología para no metrologos” [8]. Identificamos las siguientes aplicaciones:

- Para medir la temperatura corporal de los enfermos.
- Medir la temperatura en forma adecuada para la fabricación de medicamentos.

- En la preparación de alimentos como en las técnicas de su conservación, requieren mediciones de temperatura.
- La fabricación de cerámica, la aplicación de esmaltes y pinturas en aparatos electrodomésticos y en vehículos, generación de energía, transporte refrigerado, y otras actividades humanas que necesitan de una medición adecuada de temperatura.

Al momento de realizar una medición de temperatura, se busca un indicador del calor de un cuerpo definido. Recordemos que calor no es igual a temperatura. El calor es "energía que pasa de un cuerpo a otro y es causa de que se equilibren sus temperaturas." [37], mientras que temperatura "es el valor de la lectura en un instrumento de medición" [8], por ejemplo un termómetro.

### **Patrones de temperatura**

La escala internacional de temperatura EIT-90, es un documento de referencia para obtener procedimientos y termómetros que ayuden a los laboratorios nacionales materializar y determinar valores con una alta repetibilidad. "La 21<sup>a</sup> Conferencia General de

Pesas y Medidas, en octubre de 1999, solicitó al comité internacional correspondiente los trabajos que sirvan de base para extender la EIT-90 por debajo de su actual límite inferior de 0,65 K" [8]. A continuación tenemos la tabla 1.2 con los puntos fijos de temperatura definidos en la EIT-90.

Número	Temperatura		Sustancia <sup>6</sup>	Estado <sup>7</sup>	$W_r(T_{90})$
	$T_{90}/K$	$t_{90}/^{\circ}C$			
1	3 a 5	-270,15 a -268,15	He	V	
2	13,803 3	-259,346 7	e-H <sub>2</sub>	T	0,001 190 07
3	≈ 17	≈ -256,15	e-H <sub>2</sub>	V	
			(o He)	(o G)	
4	≈ 20,3	≈ -252,85	e-H <sub>2</sub>	V	
			(o He)	(o G)	
5	24,556 1	-248,593 9	Ne	T	0,008 449 74
6	54,358 4	-218,791 6	O <sub>2</sub>	T	0,091 718 04
7	83,805 8	-189,344 2	Ar	T	0,215 859 75
8	234,315 6	-38,834 4	Hg	T	0,844 142 11
9	273,16	0,01	H <sub>2</sub> O	T	1,000 000 00
10	302,914 6	29,764 6	Ga	F	1,118 138 89
11	429,748 5	156,598 5	In	S	1,609 801 85
12	505,078	231,928	Sn	S	1,892 797 68
13	692,677	419,527	Zn	S	2,568 917 30
14	933,473	660,323	Al	S	3,376 008 60
15	1 234,93	961,78	Ag	S	4,286 420 53
16	1 337,33	1 064,18	Au	S	
17	1 357,77	1 084,62	Cu	S	

Tabla 1.2 Puntos *fijos* de definición de la escala EIT-90 [8]

Podemos encontrar como patrones de temperatura en laboratorios de metrología los siguientes equipos:

**Calibradores de bloque seco:** Son usados principalmente para la calibración de RTDs y termopares, no se recomienda para calibración de termómetros de líquido en vidrio [9].

Características:

- Exactitud moderada.
- Diámetro de huecos fijos.
- Profundidad de inmersión fija.
- Secos y limpios.
- Portátiles.
- Cambios de temperatura rápidos.
- Sensor de referencia interno.
- Intervalo de temperatura normalmente amplio.

**Calibradores tipo baño:** Son para calibración de termómetros de líquido en vidrio o para termómetros cuyas formas geométricas no sean comunes [9].

Características:

- Alta exactitud
- Adaptable a distintos diámetros y profundidad de inmersión de termómetros.



- Normalmente no son portátiles.
- Cambios de temperatura lentos.
- Requiere de termómetros de referencia externo.
- Es crítica la selección del fluido.
- Intervalo de temperatura de uso restringido.

#### **1.4. Organización de la metrología en el mundo**

**En el siglo XIX se generó una necesidad de contar con un sistema métrico decimal universal, especialmente dentro de los trabajos industriales universales. En 1875, una conferencia diplomática en París sobre el metro, donde participaron 17 gobiernos, entre ellos 4 de lengua hispana, España, Argentina, Perú y Venezuela, firmaron el tratado diplomático conocido como “La Convención del Metro”. Donde se decidió crear y financiar un Institución Científica de carácter permanente, el BIPM (Bureau International de Poids et Mesures) [3].**

Los representantes de cada Gobierno miembro se reúnen cada cuatro años en la CGPM (Conferencia General de Pesas y Medidas), donde discuten y examinan el trabajo realizado por los Institutos

Nacionales de Metrología y el BIPM, definiendo nuevas determinaciones metrológicas fundamentales y sobre el BIPM.

Existen diferentes Comités Conjuntos del BIPM y organizaciones internacionales para tareas particulares:

- a.** JCDCMAS: Comité para la coordinación de la asistencia a Países en vías de Desarrollo, sobre Metrología, Acreditación y Normalización.
- b.** JCGM: Comité Conjunto para Guías sobre Metrología.
- c.** JCRB: Comité Conjunto de las Organizaciones Metrológicas Regionales y el BIPM.
- d.** JCTLM: Comité Conjunto para la Trazabilidad de Medicina en Laboratorios.

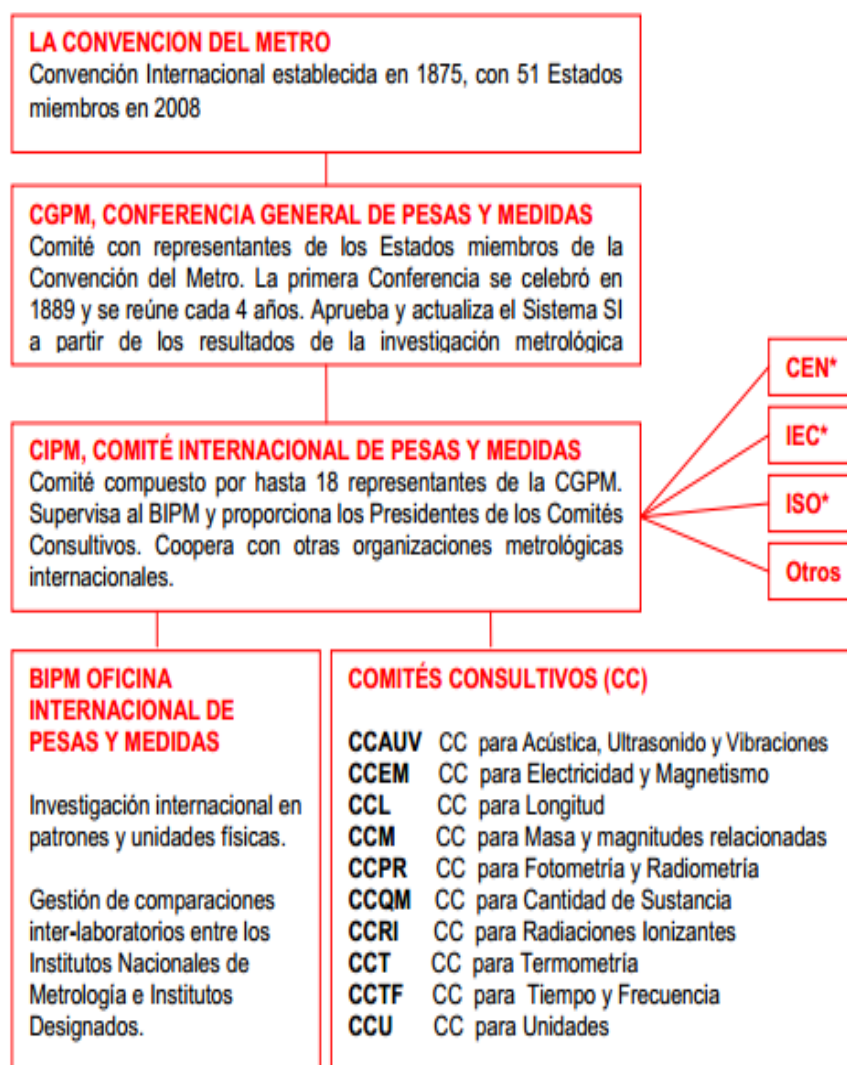


Figura 1.1 Organización de la Convención del Metro [8].

#### 1.4.1. Organización en América

El SIM (Sistema Interamericano de Metrología) está formada por las organizaciones metrológicas nacionales de 34 naciones miembros de la OEA. Creado para promover la cooperación internacional y regional en metrología en particular en el

Continente Americano, el SIM está organizado en cinco sub regiones:

- a. NORAMET para Norteamérica
- b. CARIMET para el Caribe
- c. CAMET para América Central
- d. ANDIMET para los países andinos
- e. SURAMET para los otros países de Sudamérica

#### **1.4.2. La metrología en Ecuador**

Como primer actor en la metrología tenemos al laboratorio nacional de metrología INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización). El laboratorio Nacional de Metrología, fue fundado el 22 de marzo de 1973, realiza sus actividades como parte del proceso de Servicios Tecnológicos. Una de las principales funciones que realiza este Laboratorio es la de calibrar equipos de pesar y medir, actividad que se encuentra facultada por la Ley del Sistema Ecuatoriano de la calidad. Se designa al INEN como la entidad responsable de Metrología en el país y como tal actúa en calidad de Organismo Nacional competente. La entidad puede realizar Certificados de Calibración

para patrones de instrumentos, elementos, maquinas y/o aparatos de pesar y medir en las magnitudes de Masa, Longitud, Volumen, temperatura, Presión y Fuerza que tienen validez oficial y reconocimiento Nacional [10].

El CMEE (Centro de Metrología del Ejército Ecuatoriano) fue creado con el propósito de solucionar la falta de una entidad de calibración de equipos de medición y comprobación en el área eléctrica, electrónica, dentro de las FFAA, y a nivel nacional con el propósito fundamental de apoyar el desarrollo de la industria en nuestro país en su calidad y competitividad. En el CMEE, se busca al desarrollo regional y la conservación de los equipos de medición, implementando con eficiencia acciones de enseñanza, capacitación, investigación y análisis técnico de parámetros de medida.

El CMEE, es miembro de la NCSL (National Conference of Standard Laboratories) de los Estados Unidos desde 1996 y sus equipos y patrones son trazables al NIST (National Institute of Standard and Technologies) [11].

También en nuestro país existe laboratorios privados de metrología como SERLAM (Servicio Latinoamericano de

metrología). El cual da servicio en el área de metrología en las magnitudes de presión, temperatura, señales eléctricas, tiempo, masa y dimensión.

### **1.5. Impacto de la metrología en el desarrollo de la sociedad**

La metrología en cada país es diferente en función de su desarrollo económico y realidad geográfica, centrándose en las necesidades de su sociedad. A continuación tenemos la lista de los campos donde existe un impacto de la metrología en la sociedad tomados del libro "La metrología científica en España y en su entorno europeo" [12], los cuales se encuentran desarrollados en el ANEXO A.

- a. Comercio**
- b. Salud**
- c. Defensa y Seguridad**
- d. Desarrollo industrial**
- e. Diálisis**

## 1.6. Terminología de la metrología y Unidades de Medida

Si buscamos entrar en el mundo de la metrología debemos tener en cuenta cierta terminología y las unidades que se deben utilizar. A continuación hay una recopilación de términos y unidades que debemos repasar, la información es tomada de ciertos textos ya nombrados, y del "Vocabulario Internacional de Metrología" [13].

### ***Cantidad***

Dado a un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. Ejemplo: Tiempo, masa, temperatura.

### ***Valor***

Magnitud de una cantidad particular generalmente expresada en unidad de medida multiplicada por un número. Ejemplo: Longitud de barra: 5.34 m o 534 cm

### ***Valor verdadero***

El valor coherente con la definición dado por una cantidad particular.

***Valor verdadero convencional***

Valor atribuido a una cantidad determinada y aceptada, a veces en convención, y teniendo una incertidumbre apropiada para un procedimiento específico. Ejemplo: Valor recomendado para la constante de Avogadro:  $6,0221367 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ .

***Medición***

Conjunto de operaciones que tienen por objeto determinar el valor de una cantidad.

***Principio de Medición***

Base científica de una medición. Ejemplo: El efecto termoeléctrico aplicado en la medición de temperatura.

***Método de medida***

Secuencia lógica de operaciones, descritas generalmente, utilizadas en el rendimiento de la medición. Ejemplo: Método de sustitución, método diferencial y método nulo.

***Procedimiento de medida***

Conjunto de operaciones, descritas específicamente, utilizadas en mediciones concretas de acuerdo con métodos dados.



***Resultado de medida***

Conjunto de valores de una magnitud atribuidos a una medición, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

***Exactitud de medida***

Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de medición.

***Veracidad de medida***

Proximidad entre la media de un número de valores medidos repetidos y un valor de referencia.

***Precisión de medida***

Proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.

***Error de medida***

Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

***Error sistemático de medida***

Componente del error de medida en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible.

***Sesgo de medida***

Valor estimado de un error sistemático.

***Error aleatorio de medida***

Componente del error de medida que, en mediciones repetidas, varía de manera impredecible.

***Condición de repetibilidad de una medición***

Condición de medición, en un conjunto de condiciones que incluye el procedimiento de medida, los operadores, el sistema de medida, las condiciones de operación y el lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto.

***Repetibilidad de medida***

Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad.

***Incertidumbre de medición***

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos al instrumento que se está calibrando.

<b>Magnitud de base</b>	<b>Unidad de base</b>	
	<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	Kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	amperio	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

Tabla 1.3 Unidades usadas por el Sistema Internacional [14].

## **CAPÍTULO 2**

### **2. Calibradores de Temperatura**

Luego de informarnos sobre el tema de la metrología, el siguiente paso es obtener el equipo que nos va ayudar en la calibración de los instrumentos de temperatura. Los tipos de calibradores que existen, y el enfoque en el equipo que vamos a construir son partes importantes en este capítulo.

De nuestro calibrador de temperatura buscamos tener características que cumplan con una buena exactitud para poder realizar comparaciones con otros instrumentos de temperatura. Para obtener una buena exactitud y satisfacer otras cualidades que en el transcurso de la tesis vamos a especificar, se necesita diferentes elementos con características específicas que les presentamos a continuación.

## **2.1. Partes generales de un calibrador de temperaturas**

Las partes generales de un calibrador de temperatura son las siguientes [9]:

- Termómetro de referencia.
- Indicador para el termómetro de referencia.
- Indicador para el termómetro bajo prueba.
- Fuente de temperatura.

### **a. Termómetro de referencia**

Es el que nos indica el valor “real” de temperatura que tiene la fuente de calor [9]. Existen diversos tipos de termómetros los cuales serán escogidos dependiendo de la temperatura e incertidumbre deseada.

### **Tipos de sensores Termoeléctricos**

#### **RTD**

Es un sensor de precisión. Es utilizado en aplicaciones industriales, así como en los laboratorios. El RTD tienden a ser

más precisos que el termopar, a su vez mantienen su precisión por más tiempo. La temperatura de uso es hasta los 650°C. El RTD puede tener diferentes formas [15].

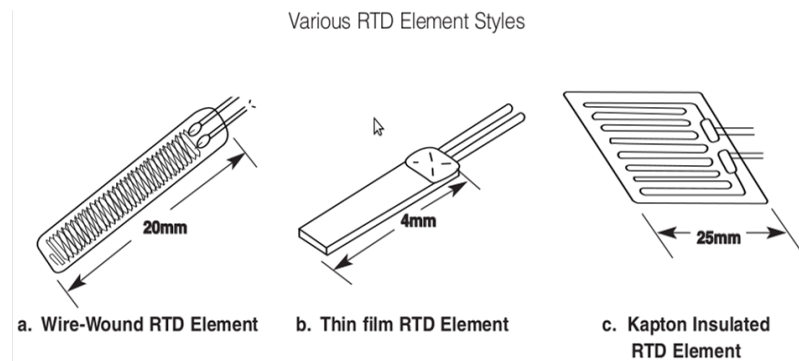


Figura 2.1 Sensores RTDs [15].

El RTD es un sensor cuya resistencia cambia de manera lineal con respecto a su cambio de temperatura. Como el RTD no genera una señal de corriente o voltaje, para poder obtener la temperatura que se está midiendo el controlador debe pasar una pequeña corriente por el RTD. Al pasar la corriente tenemos un voltaje en el RTD ( $V=IR$ ), para obtener la temperatura solo necesitamos ir a la tabla de resistencia vs. Temperatura [15].

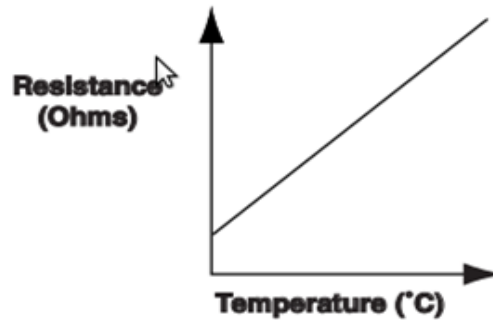


Figura 2.2 Gráfica Resistencia vs. Temperatura [15].

El RTD usa un valor base de resistencia. Por ejemplo, la mayoría de RTDs de platino tiene un valor base de 100 ohms a 0°C.

Element Type	Temperature Range	Base Resistance	TCR( $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ )
Platinum DIN	-200 to 650°C (-330 to 1200°F)	100 $\Omega$ at 0°C	0.00385
Platinum JIS	-200 to 650°C (-330 to 1200°F)	100 $\Omega$ at 0°C	0.003916
Copper	-100 to 260°C (-150 to 500°F)	10 $\Omega$ at 25°C	0.00427
Nickel	-100 to 205°C (-150 to 400°F)	120 $\Omega$ at 0°C	0.00672

Tabla 2.1 Coeficiente de diversas RTDs [15].

Entre los RTDs de platino con 100 $\Omega$  en 0 °C ya que son los más usados en la industria. Hay dos estándares industriales para el RTD de platino: el DIN y el JIS. El DIN usa la curva de resistencia vs. Temperatura (TCR) de 0.003850 ohms/ohm/°C.

JIS usa la curva de resistencia vs. Temperatura (TCR) de 0.003916 ohms/ohm/°C [15].

Las ventajas del RTD sobre el termopar son la estabilidad, repetibilidad y la precisión. Aunque tiene ciertas desventajas como el rango de temperatura y la respuesta a los cambios de temperatura [15].

### **Termopar**

Es el sensor más utilizado en la industria, por su resistencia a trabajos fuertes, y el uso en temperaturas bajo cero y temperatura de hasta 2000°C. El termopar está formada por la unión de dos hilos de diferentes aleaciones metálicas en un punto llamado unión. Esta unión es llamada de medida o de “unión caliente”. El final de los conductores del termopar suelen ser conectados a un indicador o controlador de temperatura. Este punto de conexión es llamado de referencia o unión fría [15].

Cuando la unión de medición está caliente, un pequeño voltaje DC es generado en los hilos del termopar. El controlador mide



esta señal de mili-voltios y los convierte en lectura de temperatura. El voltaje generado en el termopar es tan pequeño que es medido en mili-voltios. El termopar convierte la energía térmica en energía eléctrica [15].

Recordemos que los termopares están hechos de dos hilos diferentes de aleación metálica. Por lo cual hay diferentes tipos de termopares para escoger.

Thermocouple Standard Type	Metal Content in Positive Leg	Metal Content in Negative Leg	Temperature Range
B	70.4% Platinum (Pt), 29.6% Rhodium (Rh)	93.9% Pt, 6.1% Rh	1600 - 3100°F (870 - 1700°C)
E	90% Nickel, (Ni), 10% Chromium (Cr)	55% Copper (Cu), 45% Ni	32 - 1650°F (0 - 900°C)
J	99.5% Iron (Fe)	55% Cu, 45% Ni	32 - 1380°F (0 - 750°C)
K	90% Ni, 10% Cr	95% Ni, 5% Various Elements	32 - 1380°F (0 - 1250°C)
N	84.4% Ni, 14.2% Cr 1.4% Silicon	95.5% Ni, 4.4% Si	32 - 2280°F (0 - 1250°C)
R	87% Pt, 13% Rh	100% Pt	32 - 2640°F (0 - 1450°C)
S	90% Pt, 10% Rh	100% Pt	32 - 2640°F (0 - 1450°C)
T	100% Copper (Cu)	55% Cu, 45% Ni	-330 - 660°F (-200 - 350°C)
C*	95% Tungsten (W), 5% Rhenium (Re)	74% Tungsten (W), 26% Rhenium (Re)	32 - 4200°F (0 - 2315°C)
D*	97% W, 3% Re	75% W, 25% Re	32 - 4200°F (0 - 2315°C)
G*	100% W	74% W, 26% Re	32 - 4200°F (0 - 2315°C)

Tabla 2.2 Tipos de termopares [15].

## Infrarrojo

Es un sensor que no necesita del contacto físico para la medición. La mayoría de infrarrojos o sensores IR pueden medir temperaturas de hasta 540°C. Por encima de estas temperaturas otro sensor de no-contacto se puede utilizar. Todos los objetos calientes irradian y absorben ondas electromagnéticas. Los objetos irradian energía a través de algunas longitudes de onda, lo cual llamamos radiación infrarroja u ondas infrarrojas. El sensor infrarrojo intercepta una porción de la energía infrarroja irradiada por el objeto. Las ondas infrarrojas son enfocadas por un lente hacia un detector infrarrojo. El detector absorbe la radiación que incide sobre ella y la convierte en una señal eléctrica de salida [15].

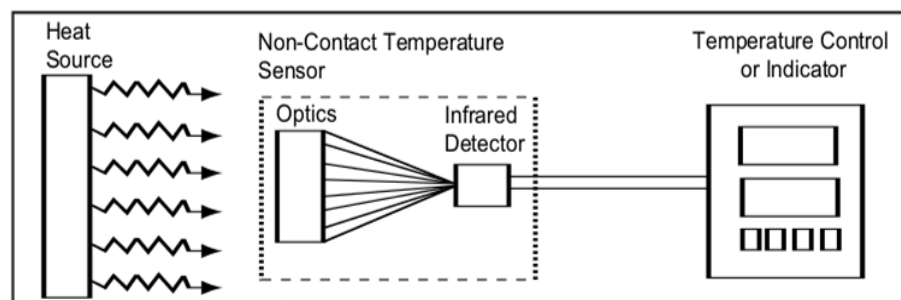


Figura 2.3 Sensor infrarrojo [15].

## Termistor

Es un semiconductor usado como sensor de temperatura. Esta hecho de una mezcla de óxidos de metal prensado en forma de perlas, oblea o de otro tipo de forma. Las perlas se calientan a presión y alta temperaturas, para luego ser encapsuladas en epoxi o vidrio. Las perlas pueden ser muy pequeñas de menos de 1mm en algunos casos [15].



**Figure 28**  
Thermistor Resistance Vs Temperature Relationship (NTC)

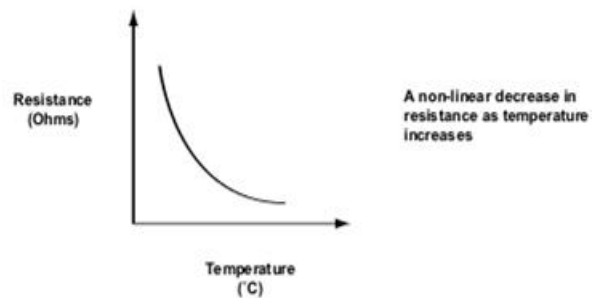


Figura 2.4 Termistores [15].

Los termistores no suelen ser de uso industrial, para ello tenemos los RTDs. La base de resistencia del termistor varía

entre 1000 a un millón de ohms. La curva de resistencia vs. Temperatura varía mucho también [15].

#### **b. Indicador para el termómetro de referencia**

Los indicadores en ocasiones llamados monitores, son aquellos que sirven para medir la resistencia o la tensión eléctrica del termómetro de referencia. Como indicador se debe usar un equipo pensado para propósitos de calibración en temperatura.

Al hablar de un indicador lo que buscamos es un artefacto que nos permita observar la temperatura que se está midiendo. Para obtener aquello se necesita un artefacto que tenga la opción de leer la señal del sensor, sea este de un RTD o termopar, y lo pueda mostrar en una pantalla.

un controlador de temperatura es un instrumento usado para controlar la temperatura. El controlador de temperatura tiene una entrada procedente de un sensor de temperatura y tiene una salida que está conectada a un elemento de control tal como un calentador o ventilador [39], se debe tener en cuenta

las especificaciones técnicas que brinda el equipo para así escoger el adecuado para nuestro proceso.



Figura 2.5 Controlador [18].

Otra opción como indicador es el uso de una tarjeta de adquisición que nos permite presentar los datos a través computadora.



Figura 2.6 Tarjeta de Adquisición [28].

### c. Indicador para el termómetro bajo prueba

En el caso del calibrador que vamos a fabricar esta característica no aplica, ya que vamos a calibrar termómetros

que no necesitan un indicador externo. Y si así fuera el caso, aplica los mismos equipos que se utilizan con el termómetro de referencia.

#### **d. Fuente de temperatura**

Existen principalmente dos tipos de fuentes de temperatura para calibración industrial, los baños líquidos y los calibradores de bloque seco, en cualquier caso lo que se busca de ellos es lo siguiente [40]:

- 1) Estabilidad y Uniformidad acorde con la incertidumbre deseada.
- 2) Intervalo de temperatura apropiada al intervalo deseado de calibración.
- 3) Suficiente profundidad para la inmersión de los termómetros.

#### **Bloques Secos**

Los bloques secos son usados principalmente para la calibración de RTDs y termopares, no se recomienda su uso

para calibración de termómetros de líquido en vidrio. En ocasiones, si la incertidumbre requerida lo permite, se puede evitar el uso del termómetro de referencia externo y emplear únicamente el sensor interno del bloque cuya lectura aparece en la pantalla. Por supuesto que se debe consultar la exactitud del mismo antes de emplearlo. Otra ventaja de los bloques secos es el hecho de que alcanzan temperaturas más altas que los baños líquidos [9].

### **Baños Líquidos**

Los baños líquidos se usan normalmente para calibraciones de alta exactitud, para calibración de termómetros de líquidos en vidrio e incluso para termómetros cuyas formas geométricas sean un poco caprichosas. Por su alta estabilidad y uniformidad son la opción perfecta en calibraciones donde se requiere de un incertidumbre baja. Actualmente existe una gran variedad de baños que permiten incluso que algunos de ellos sean portátiles o aquellos que ocupan poco espacio y son semi-portátiles [9].

## 2.2. Tipos de calibradores de temperatura

### a. Bloque Seco



Figura 2.7 Calibradores bloque seco [16].

#### Características Principales [9]:

- Exactitud moderada.
- Diámetro de huecos fijos.
- Profundidad de inmersión fija.
- Secos y limpios.
- Portátiles.
- Cambios de temperatura rápidos.
- Sensor de referencia interno.
- Intervalo de temperatura normalmente amplio.



## b. Baño líquido



Figura 2.8 Calibrador de Baño Líquido [17].

### Características Principales [9]:

- Alta exactitud.
- Adaptable a distintos diámetros y profundidad de inmersión de termómetros.
- Normalmente no son portátiles.
- Cambios de temperatura lentos.
- Requiere de termómetro de referencia externo.
- Es crítica la selección del fluido.
- Intervalo de temperatura de uso restringido.

### **2.2.1. Calibrador de temperatura tipo baño**

Ya dentro de nuestro proyecto, vamos a describir el calibrador de temperatura tipo baño que vamos a construir. Tomando en cuenta todas las características de los elementos generales que debe tener este tipo de calibrador.

#### **2.2.1.1. Explicación introductoria del calibrador tipo baño desarrollado**

El equipo de calibración manejará el calentamiento de silicona a las temperaturas que se desea. Para el manejo de temperatura vamos a desarrollar un controlador. El sistema tiene como entrada la temperatura de la silicona y una salida de pulsos para el calentamiento de la resistencia, para así lograr una estabilidad en la temperatura deseada. Con una temperatura estable el usuario procederá a realizar la

comparación de los instrumentos a calibrar y el instrumento patrón (instrumento con mejor exactitud).

### **El proceso de calibración:**

- 1) Antes de iniciar el proceso el usuario debe de colocar los termómetros que se desean calibrar en el equipo de calibración.
- 2) El usuario debe ingresar la temperatura en donde se desee calibrar los instrumentos, estos datos serán ingresado en el panel de control del VI, para luego presionar el botón de "Encender".
- 3) Al presionar el botón, se dará paso al calentamiento de la silicona. El tiempo del proceso de calentamiento y estabilización de la silicona es entre 45 a 55 minutos. Con este tiempo obtenemos un estabilización y homogenización aceptable para nuestro equipo de calibración.
- 4) En el transcurso del calentamiento podemos presionar el botón de "Apagar" o el de "Inicio". El botón de "Apagar" da fin al VI, mientras el botón de "Inicio" nos

da la posibilidad de cambiar la temperatura que se desea generar.

- 5) Con la temperatura estable, el usuario procederá a realizar la comparación de temperaturas entre los termómetros (instrumentos a calibrar) y el instrumento patrón (instrumento con mayor exactitud).
- 6) Los datos que se obtienen deben ser anotados para luego realizar los respectivos cálculos de incertidumbre.

#### 2.2.1.2. Diagrama de bloque del calibrador tipo baño

A continuación tenemos un diagrama de bloque (figura 2.9) del calibrador que nos ayudará a entender el funcionamiento del mismo. Y un diagrama de estados (figura 2.10) donde podemos entender el manejo del VI en labview.

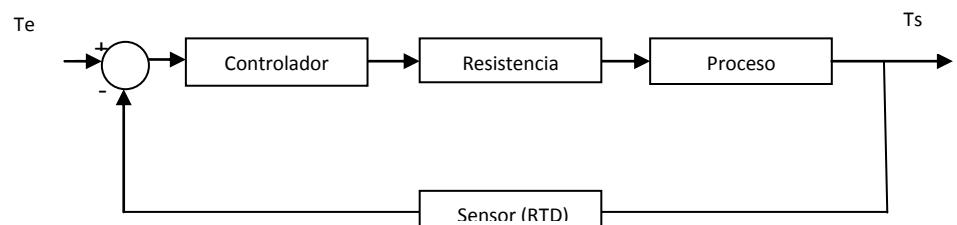


Figura 2.9 Diagrama de bloque del calibrador

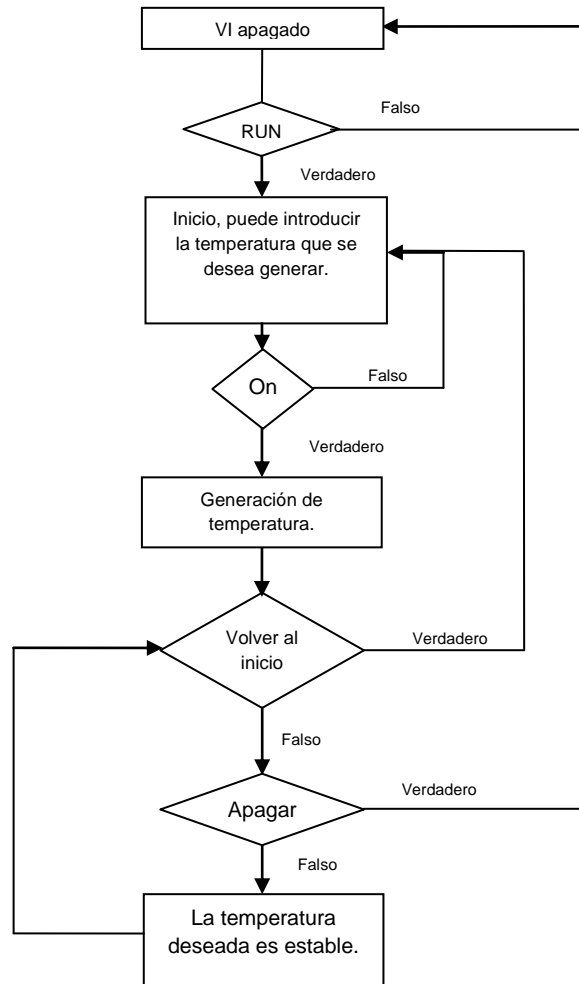


Figura 2.10 Diagrama de Estados.

### 2.2.1.3. Diseño de la estructura del calibrador de temperatura

Para el diseño del calibrador desarrollado se tomó como referencia modelos existentes de calibradores que están en el mercado y se lo fabricó como una caja de aluminio

dividido en 2 compartimientos. El uno es para la zona de calentamiento y el otro es para la zona de circuitería.

El compartimiento de calentamiento (Figura 2.11), es donde se encuentran los elementos que estarán en contacto con la temperatura generada como son: la resistencia de calentamiento, tubo de aluminio, el sensor de referencia y el agitador magnético. Para el diseño de ese compartimiento, se decidió que la tapa superior, tenga una serie de orificios, con el fin de que el aire caliente, atrapado en el interior del compartimiento, pueda escapar al momento de encender los ventiladores.



Figura 2.11 Compartimiento de Calentamiento

En el compartimiento de circuitería (Figura 2.12) es donde están ubicados las protecciones eléctricas, el interruptor de encendido, el transmisor de temperatura y el relé de estado sólido (SSR).



Figura 2.12 Compartimiento de circuitería



Figura 2.13 Vista externa del calibrador de Temperatura

#### **2.2.1.4. Partes del calibrador de temperatura tipo baño**

A continuación se describirán los elementos que forman parte del calibrador tipo baño desarrollado:

##### **a. Tanque cilíndrico**

El cilindro es la parte del calibrador donde se insertarán los sensores de temperatura a calibrar. El material del cilindro es de aluminio, y se decidió fabricarlo con ese material, debido a que es un metal no ferro-magnético. Por ende, no presentaría alguna interferencia al movimiento de la pastilla de teflón.



El cilindro se encuentra encima del agitador magnético que nos permite realizar la homogenización de la silicona. También se encuentra en una zona del calibrador que recibe el golpe directo del aire que sale de dos ventiladores para enfriar el cilindro

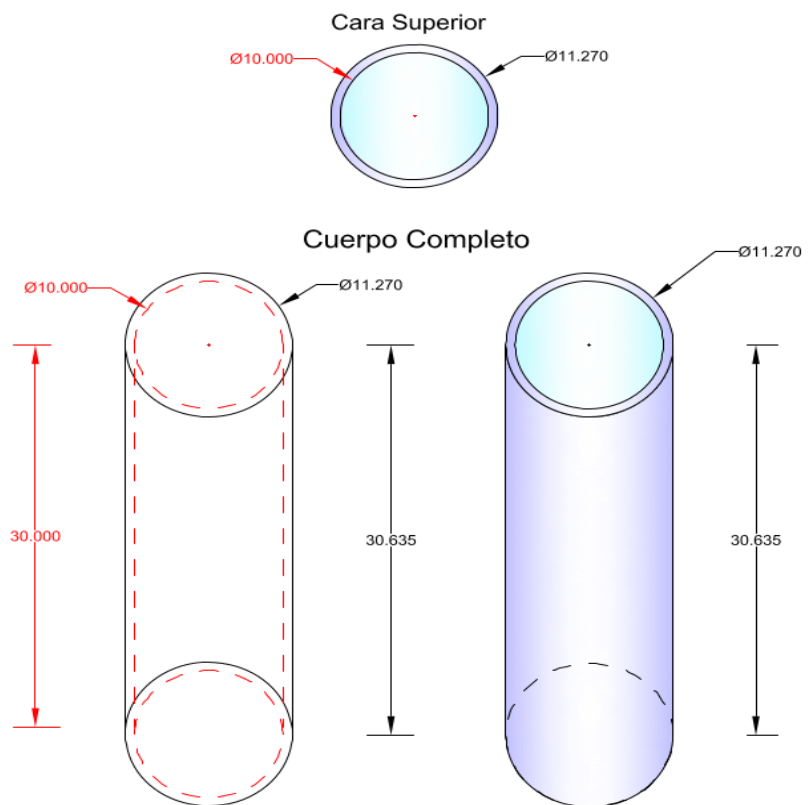


Figura 2.14 Diseño del cilindro del calibrador Tipo Baño (en centímetros).

Dentro del cilindro hay una rejilla que se encuentra a 5 cm sobre la base. Con las dimensiones que se muestran en la Figura 2.9, con estas dimensiones podremos realizar la calibración de un instrumento con un bulbo de hasta 30 centímetros de longitud.

### b. Relé de Estado Sólido

El Relé de estado sólido (SSR) es un elemento que para aplicaciones que requieran un elevado aislamiento entre entrada y salida, son una mejor solución [41].

#### Partes de un SSR [19]:

- Circuito de entrada.
- Aislamiento: Con un acoplamiento óptico con semiconductor (Fotoacoplador, fototriac, etc).

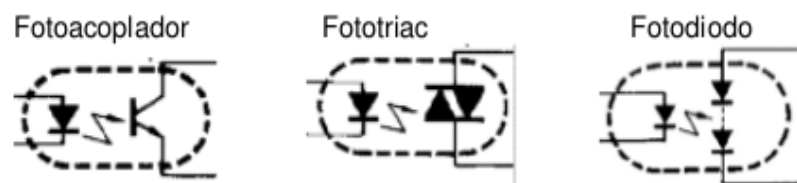


Figura 2.15 Gráfica Interna del Relé [19].

- Detector paso por cero: Un relé de estado sólido con función de paso por cero opera cuando la tensión de la carga (tensión alterna) alcanza el punto cero. Los relés con esta función cuentan con una excelente inmunidad a las corrientes parásitas de entrada. Los relés de estado sólido con la función de detección de paso por cero tienen una buena operación con cargas resistivas, capacitivas y cargas inductivas con un factor de potencia entre 0.7 y 1.
- Circuito de salida: Salida AC con tiristores anti-paralelos o triacas, salida CC con transistor bipolar o MOSFET.
- Protección frente a transitorios: Los más frecuentemente utilizados son redes RC, diodos, etc.

#### **Las ventajas de un SSR son [19]:**

- Conexión con o sin función de paso por cero.
- Desconexión a  $I=0$ .
- Gran resistencia a choques y vibraciones.
- No ocasionan arcos al no existir partes móviles.
- Vida de trabajo óptima.

- Frecuencia de conmutación elevada.
- Facilidad de mantenimiento.
- Funcionamiento silencioso.
- Control a baja tensión, compatible TTL/CMOS.

**Las desventajas de un SSR son [19]:**

- Circuito de entrada muy sensible a perturbaciones.
- Necesidad de elementos de protección externos, como disparadores de calor o una red de protección.
- Muy sensibles a la temperatura y a las sobretensiones.
- Tecnología más compleja.

**Carga Resistiva**

La relación entre el pico de corriente en la conmutación y la corriente nominal es 1. En este caso la corriente y la tensión están en fase de manera que no hay problemas en el funcionamiento del SSR. Una típica carga resistiva es la que vamos a utilizar en el calibrador de temperatura, es decir un calentador.

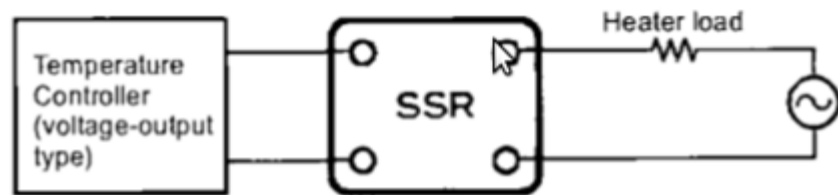


Figura 2.16 Carga Resistiva conectada a SSR [19].

El SSR a utilizar en el calibrador de temperatura es el HFS15.

Las especificaciones del HFS15 son [20]:

- Fotoacoplador con snubber.
- Cruce por cero.
- Triac AC a la salida.
- Control con DC o AC.
- Rango del voltaje DC de control: 4VDC a 32VDC.
- Rango de voltaje AC de control: 85VAC a 132VAC (110V entrada), 175VAC a 264VAC (220V entrada), 19.2VAC a 28.8VAC (24V entrada).
- Máxima corriente de entrada: 25mA (entrada DC), 15mA (entrada AC). Rango del voltaje de carga( 47 a 63Hz): 48VAC a 280VAC.
- Rango de la corriente de carga(A): 0.1 a 15.
- Temperatura Ambiente: Operación entre -30°C a 80°C, Almacenamiento entre -30°C a 100°C.

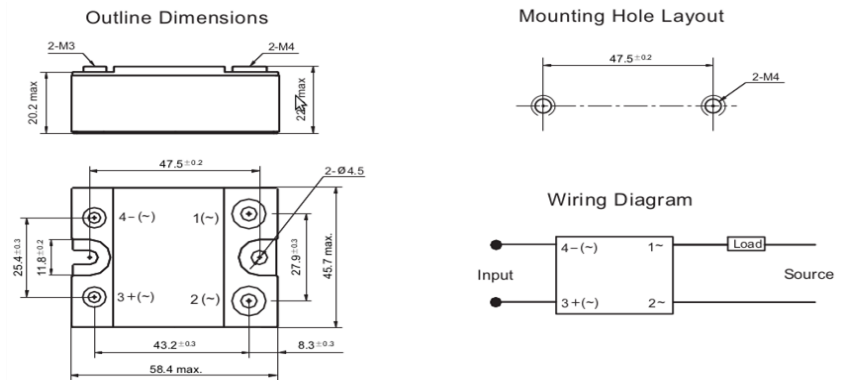


Figura 2.17 Dimensiones del SSR [20].

### c. Agitador magnético



Figura 2.18 Agitador Magnético [21].

El agitador magnético se encargará de agitar la silicona del cilindro sin la necesidad de introducir algún elemento de agitación de tamaño considerable, solamente con una pequeña barra de acero cubierta por teflón, bastará para generar la

agitación deseada. La barra se mueve por el movimiento rotatorio que se le da al imán, en una base donde se coloca el cilindro con el líquido que se desea agitar.

#### **Características del agitador:**

- Rango de temperatura: 5 a 380°C.
- Rango de velocidad: 60 a 1500 rpm.
- Plataforma: 19 x 19 cm.
- Control: Perilla de ajuste rápido.
- Dimensiones: 8 (ancho) x 9 (profundidad) x 4.5 (alto) pulgadas.
- Datos eléctricos: 120V, 60 Hz.

#### **d. Resistencia Eléctrica Calefactora**

Dispositivo eléctrico cuyo objetivo es la producción de calor. Su funcionamiento se basa en el Efecto Joule. Las resistencias eléctricas calefactoras pueden realizar el calentamiento tanto por convección, conducción o radiación.

El Efecto Joule dice, si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor, debido al choque que sufren con las

moléculas del conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica depende directamente al cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que esta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente [36].

$$Q=R.I^2.t$$

Donde Q= Cantidad de calor producida en julios (J);  
R=Resistencia del conductor en ohmios ( $\Omega$ ); I= Intensidad que circula en amperios (A). t= Tiempo transcurrido en segundos (s)

El tipo de resistencia utilizada en el calibrador es una resistencia tipo abrazadera. De esta manera se espera tener un calentamiento uniforme en el tanque cilíndrico.

- Diámetro interior de la resistencia: 10 cm
- Alto de la resistencia: 20 cm
- Voltaje: 120V
- Resistencia: 13 ohms
- Potencia:1000W



### e. Cable

Seguendo el NEC (National Electrical Code) para decidir que cable utilizar en la conexión de la resistencia calefactora. Tomando en cuenta que la potencia de la resistencia es 1000W y el voltaje de alimentación es 110V, entonces la corriente es de 9.1 Amperios. Según la tabla 310.16, el cable a escoger sería 18 AWG 90°C.

Table 310.16 Allowable Ampacities of Insulated Conductors Rated 0 Through 2000 Volts, 60°C Through 90°C (140°F Through 194°F), Not More Than Three Current-Carrying Conductors in Raceway, Cable, or Earth (Directly Buried), Based on Ambient Temperature of 30°C (86°F)

Size AWG or kcmil	Temperature Rating of Conductor [See Table 310.13(A).]						Size AWG or kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Types TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Types TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
	COPPER			ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM			
18	—	—	14	—	—	—	—
16	—	—	18	—	—	—	—
14*	20	20	25	—	—	—	—
12*	25	25	30	20	20	25	12*
10*	30	35	40	25	30	35	10*
8	40	50	55	30	40	45	8
6	55	65	75	40	50	60	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	110	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	150	85	100	115	1
1/0	125	150	170	100	120	135	1/0
2/0	145	175	195	115	135	150	2/0
3/0	165	200	225	130	155	175	3/0
4/0	195	230	260	150	180	205	4/0

Tabla 2.3 Corriente por calibre de cables [22].

Utilizar un conductor de calibre con mayor capacidad de corriente, solo afectaría en el costo.

## f. RTD

A inicio de este capítulo dimos una introducción sobre lo que es un sensor RTD. Ahora vamos a dar las características del RTD que vamos a utilizar en nuestro calibrador de temperatura como termómetro patrón.

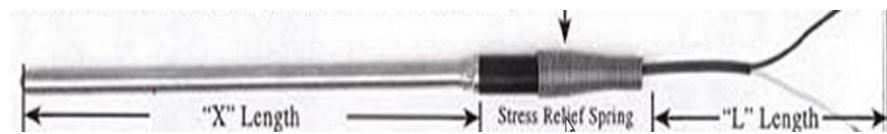


Figura 2.19 RTDs para utilizar en el calibrador [23].

- Diámetro de la vaina: 0.250".
- Material de la vaina: 316SS.
- Rango de Temperatura: 700°F (371°C)MAX.
- Numero de Hilos: 3 hilos.
- Elemento del sensor: 100 Platinum (Alpha:0.00385).
- Longitud (X): 14".
- Rosca de montaje: 1/4 NPT reajutable.
- Extensión de hilos (L): Aislante de Teflón (60").

### **g. Transmisor**

Los transmisores son instrumentos que toman la variable del proceso y la transmiten a un instrumento receptor indicador, registrador, o controlador. Los transmisores electrónicos pueden generar la señal estándar de 4-20 mA c.c. También pueden encontrarse transmisores que envían las señales 0-20mA c.c., 1-5V c.c. [24].

La señal que utilizemos estará condicionada por el proceso, como por ejemplo si tenemos problemas en el suministro electrónico podemos utilizar una señal de 1-5V c.c. Al ser continua y no alterna, elimina la posibilidad de captar perturbaciones, está libre de corriente parásitas y emplea solo dos hilos que no precisan blindaje [24].

El transmisor que vamos a utilizar puede conectarse a cualquier RTD estándar y proporcionar una salida lineal de 4-20mA. El rango puede ser ajustado según las necesidades. Con pulsar un simple botón se puede ajustar el rango del transmisor. No necesita de potenciómetro para el ajuste [23].

**Características Principales:**

- Entrada para Sensor: 3 hilos Pt-100.
- Linealización: BS EN 60751/BS 1904 (DIN 43760) (0.00385).
- Corriente de excitación: 1 mA máximo.
- Rango del sensor: -328°F a +1562°F.
- Mínimo Span: 40°F.
- Resistencia de conducción: Máximo: 10 ohms por trayecto / Efecto: 0.02%.
- Frecuencia de muestreo: 500mS por muestra.
- Precisión:  $\pm 0.2^{\circ}\text{F}$   $\pm 0.1\%$  entre -150°F a +950°F /  $\pm 0.4^{\circ}\text{F}$   $\pm 0.2\%$  entre -320°F a +1550°F.
- Protección: Polaridad invertida.
- Rango de salida: 4-20mA, 2 hilos lazos de poder.
- Máximo 3.8 a 22 mA.
- Fuente de voltaje: 8 a 30 Vdc.
- Precisión:  $\pm 5\mu\text{A}$ .
- Tiempo de Respuesta: 500mS hasta el 70% del valor.
- Rango de temperatura ambiente de operación: 30°F a 160°F.



Figura 2.20 Pastilla transmisora.

#### 2.2.1.5. Equipo para la Adquisición de Datos

Para la adquisición de datos y control del calibrador vamos a utilizar una tarjeta de adquisición. En nuestro caso vamos a utilizar la tarjeta de adquisición MyDAQ de National Instruments.

NI MyDAQ es una tarjeta de adquisición de datos portátil de bajo costo (DAQ), este dispositivo utiliza la plataforma NI LabVIEW permitiendo a los estudiantes medir y analizar las señales del mundo real [25].

NI MyDAQ es ideal para explorar electrónica y tomar medidas de sensores, combinado con NI LabVIEW en el PC. Los estudiantes pueden analizar y procesar las señales

eléctricas adquiridas y mantener control de procesos sencillos en cualquier momento y lugar [25].

NI MyDAQ proporciona entradas analógicas (AI), salidas analógicas (AO), entradas y salidas digitales (DIO), de audio, fuentes de alimentación, y un multímetro digital (DMM), funciones en un compacto dispositivo USB [25].

### **Especificaciones técnicas**

- # de canales: 2 diferencial o 1 entrada audio estéreo.
- Resolución ADC: 16 bits.
- Velocidad Máxima de muestreo: 200 kS/s.
- El tiempo de resolución: 10 ns.
- Entradas analógicas:  $\pm 10$  V,  $\pm 2$  V, DC-acoplado.
- Entrada de Audio:  $\pm 2$  V, AC-acoplado.
- Pasabanda (-3dB).
- Entradas Analógicas: DC a 400 kHz.
- Entradas de Audio: 1.5 Hz a 400 kHz.
- Máximo voltaje de trabajo para entradas analógicas:  $\pm 10.5$  V a AGND.

- Salidas Analógicas # de canales: 2 referencias a tierra o 1 salida de audio.
- Máxima velocidad de actualización: 200 kS/s.
- Salida Analógica:  $\pm 10$  V,  $\pm 2$  V, DC-acoplado.
- Salida de Audio:  $\pm 2$  V, AC-acoplado.
- Máxima corriente de salida: 2 mA.
- Mínima impedancia de carga: 8  $\Omega$ .
- Tiempo de resolución: 10 ns.
- Protección de Saturación:  $\pm 16$  V a AGND.
- Entradas y Salidas Digitales: 8; DIO<0...7>.
- Salida de voltaje: 15 V.
- Máxima corriente de salida: 32mA.
- Máxima capacitancia de carga: 470 $\mu$ F.

#### **2.2.1.6. Software LabVIEW**

LabVIEW es un extenso entorno de desarrollo que brinda a científicos e ingenieros de integración con hardware sin precedentes y amplia compatibilidad. LabVIEW permite resolver problemas, acelera su productividad y da la seguridad para innovar, crear y desplegar sistemas de medidas y control.

### **Sistemas de Desarrollo**

Cada usuario de LabVIEW comienza con un sistema de desarrollo, el cual es el entorno para la programación gráfica. Las características de los siguientes paquetes fueron diseñadas para ayudar a los usuarios a cumplir con sus actuales y futuras necesidades [26].

### **Juegos de Herramientas (Toolkits) y Módulos Adicionales**

Con el paquete modular de LabVIEW, podemos encontrar aplicaciones adicionales de NI y de terceros para cumplir con los requerimientos del proyecto. Hay funciones de LabVIEW en paquetes y herramientas sofisticadas para desarrollar aplicaciones específicas [26].

### **Procesamiento de Señales, Análisis y Conectividad**

Junta funciones de procesamiento de imagen y señales específicas de aplicaciones para sonido y vibración, visión artificial, comunicaciones RF, análisis transitorio de señales o de corta duración y más [26].



### **Control y Simulación**

Podemos diseñar, simular e implementar diversos sistemas de control con software para algoritmos de control avanzados, simulación dinámica y control de movimiento [26].

### **Administración de Datos, Registro y Reportes**

Nos permite registrar, administrar, investigar y exportar datos de manera rápida a herramientas de software de terceros, como Microsoft Office y bases de datos de la industria [26].

### **Herramientas de Desarrollo y Validación**

La calidad del código puede ser revisado por medio de los analizadores de código o los sistemas de prueba. Con esta opción podemos validar nuestro código ante las condiciones necesarias [28].

#### **2.2.1.7. VI's creados para el calibrador tipo baño**

Para el desarrollo de nuestro calibrador se realizó un VI que pueda servir como interfaz entre el calibrador y el usuario que vaya a realizar la calibración. El VI nos permite observar

la temperatura que va generando el calibrador, y da paso a ingresar la temperatura que el usuario desea generar. Existen otras cantidades que son fijas, como las constantes que nuestro controlador necesita para satisfacer las necesidades que tiene nuestro proceso.



Figura 2.21 VI del Panel Frontal del calibrador de temperatura

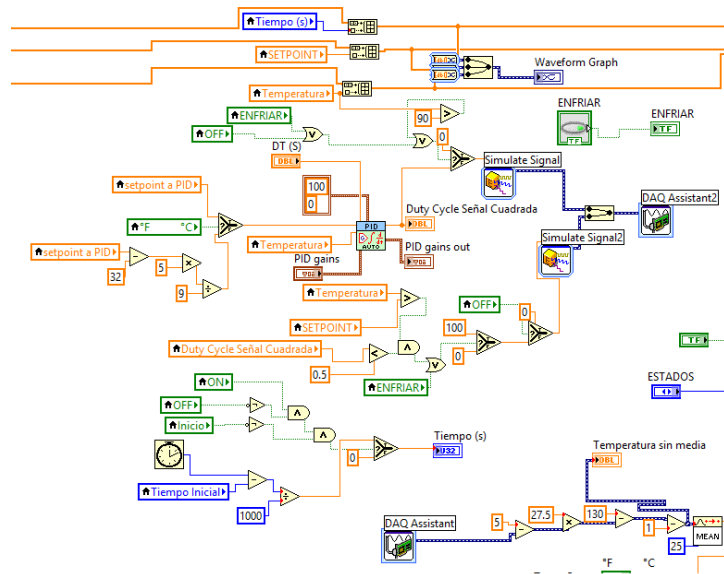


Figura 2.22 VI del Diagrama de Bloques del calibrador de temperatura

Dentro del diagrama de bloques podemos observar la programación gráfica que hemos desarrollado, esta programación interactiva de manera indirecta con el usuario por medio del panel frontal.

## 2.2.2. Ejemplos de calibradores de temperatura tipo baño en el mercado

### a. Orion 796 – Baño Líquido de Profunda Inmersión



Figura 2.23 Calibrador de temperatura Tipo Baño 1 [27].

- Rango de temperatura:  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $300^{\circ}\text{C}$ .
- Estabilidad de  $\pm 0.007^{\circ}\text{C}$ .
- Gran Capacidad de Inmersión con bajos costos de relleno.
- Nivel de líquido apropiado para Termómetro de líquido en vidrio, sin adaptadores.
- Velocidad de Agitación Variable, para funcionamiento óptimo con amplia gama de viscosidades.

- Protección de temperaturas extremas; protege las costosas celdas del triple punto del agua y evita condiciones de sobrecalentamiento.
- Tiempo de calentamiento: 25°C a 125°C < 120 minutos (Aceite C10).
- Tiempo de Enfriamiento: 10°C a -40°C < 180 minutos (Metanol).
- Dimensiones: Ancho: 485mm; Largo: 525mm; Alto: 1150mm.
- Peso: 48Kg.
- Electricidad: 800W / 110V 50/60 Hz o 230V 50/60 Hz.

#### b. Micro baño de calibración con función de calentamiento

##### TPM165S-U



Figura 2.24 Calibrador de temperatura tipo Baño 2 [28].

- Sensor de control: Conmutable interno/externo.
- Rango de temperatura: -35 a 165°C.
- Tolerancia:  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ .
- Estabilidad:  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ .
- Rango de visualización: -50 a 165°C.
- Resolución:  $0.01^{\circ}\text{C}$  en el rango -9.99 a 99.99°C, en el resto  $0.1^{\circ}\text{C}$ .
- Fuente de alimentación: 100...240 VAC, 50/60 Hz.
- Consumo de energía: Aprox. 400 VA.
- Características del equipo: Agitador magnético, canastilla de sensor, tapón de rosca, útil de aspiración, tapa para alojamiento de sensores con 5 tapones de silicona.

## **CAPITULO 3**

### **3. Diseño del controlador**

#### **3.1. Obtención del Modelo Matemático**

##### **3.1.1. Adquisición de Datos**

Mediante el software de desarrollo gráfico Labview se realizará la identificación del sistema, en donde se implementará una señal de estímulo y una señal de respuesta. En el diagrama de bloques (Figura 3.1), desarrollado en el software Labview 2012, se muestra el programa gráfico realizado para la adquisición de los datos

Para proceder con la adquisición, es necesario determinar una serie de datos que indiquen el comportamiento del sistema, es decir el resultado de los valores esperados ante la implementación de una señal de entrada, comúnmente llamado estímulo o excitación.

Para la selección de la señal de excitación, es importante mencionar que existe una variedad de modelos que han sido desarrollados por varios autores e implementados en distintos tipos de procesos. Para la elección de la señal de estímulo o de excitación del presente proyecto, se decidió escoger la señal de onda cuadrada, que consiste en una señal escalón continua, que nos permitirá generar una temperatura entre dos valores.

Al momento de implementar la señal de estímulo o excitación al sistema, se debe de tomar en cuenta el tipo de señal de salida que se va obteniendo. La Figura 3.2 muestra el comportamiento de la temperatura al momento de aplicar la señal escalón como perturbación, Figura 3.3, en donde se podrán determinar los parámetros de temperatura máxima, temperatura mínima y parámetros de la señal de salida, en donde se considerará un tiempo de muestreo de 10 ms.

Con la adquisición de datos tendremos la posibilidad de generar un modelo que no necesariamente será una verdad absoluta, pero ciertamente nos dará una respuesta cercana a la realidad de nuestro sistema, para así poder realizar las pruebas necesarias.



Los datos establecidos para la adquisición son:

- Temperatura máxima: 55°C.
- Temperatura mínima: 50°C.
- Salida (Señal Cuadrada): Ciclo de trabajo de 5% y frecuencia de 1Hz.

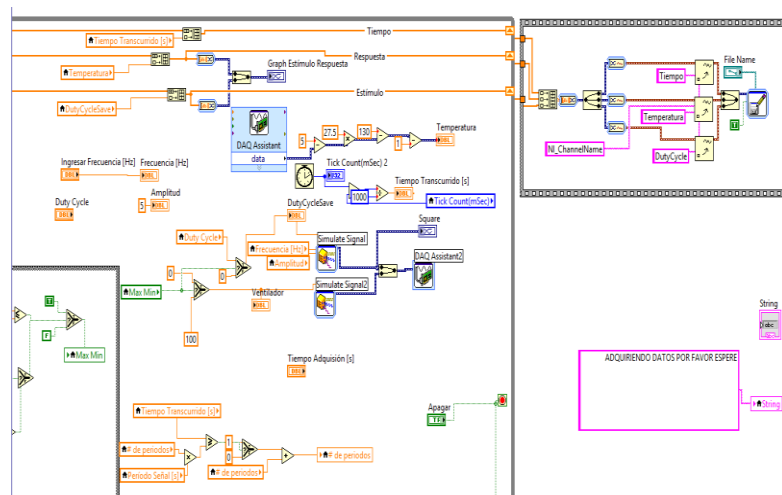


Figura 3.1 Diagrama de bloques de la adquisición de datos del calibrador.

Se realizó la adquisición de datos manteniendo un ciclo de trabajo en 5%, llegando a una temperatura de 55°C, que es el punto de temperatura donde se puede apreciar una estabilización.

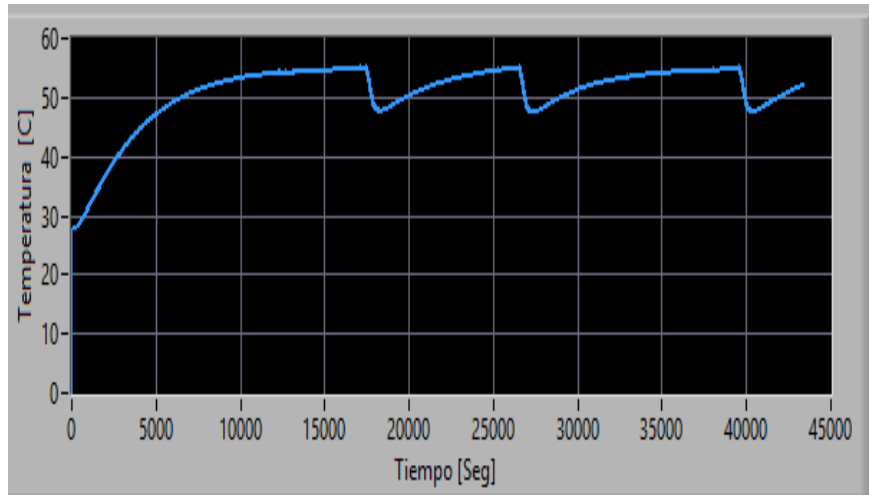


Figura 3.2 Gráfica del comportamiento de temperatura en la adquisición de datos

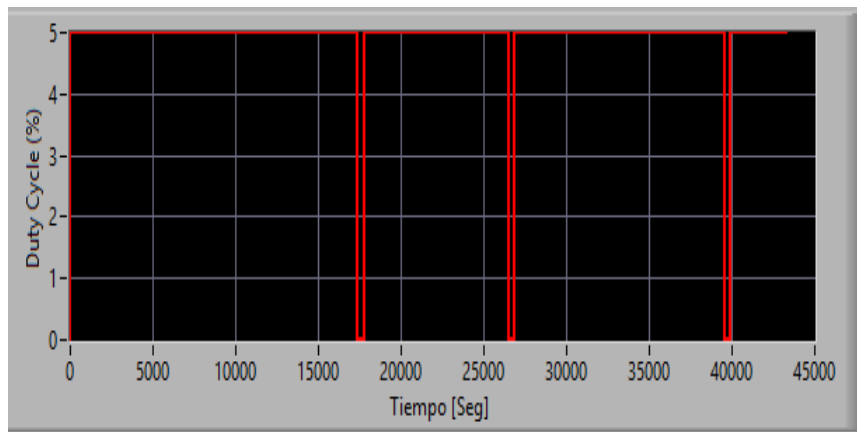


Figura 3.3 Gráfica de la señal cuadrada de estimulación.

Como observamos en la Figura 3.2, la temperatura de inicio es 28°C (temperatura ambiente). El sistema de temperatura tiene un retardo que se puede observar, ya

que al momento de bajar la temperatura esta llega hasta 46°C y no hasta 50°C, la inercia térmica produce este retardo. La inercia térmica es el tiempo que tardará en pasar el calor de un lado a otro de algún cuerpo [27].

### **3.1.2. Análisis e identificación del calibrador**

La identificación para un sistema es un método experimental que tiene la finalidad de obtener un modelo matemático a partir de datos reales suministrados por la planta o el proceso. Para realizar el análisis e identificación del calibrador, se utilizó el asistente de identificación de sistemas, NI SignalExpress, que nos proporciona el software Labview 2012.

NI SignalExpress es un software interactivo de registro de datos para adquirir rápidamente, analizar y presentar datos de cientos de dispositivos e instrumentos de adquisición de datos, sin necesidad de programación [28].

En la figura 3.4 podemos apreciar la importación de los datos que se adquirieron en el paso anterior, los cuales son tiempo, temperatura y ciclo de trabajo (duty cycle).

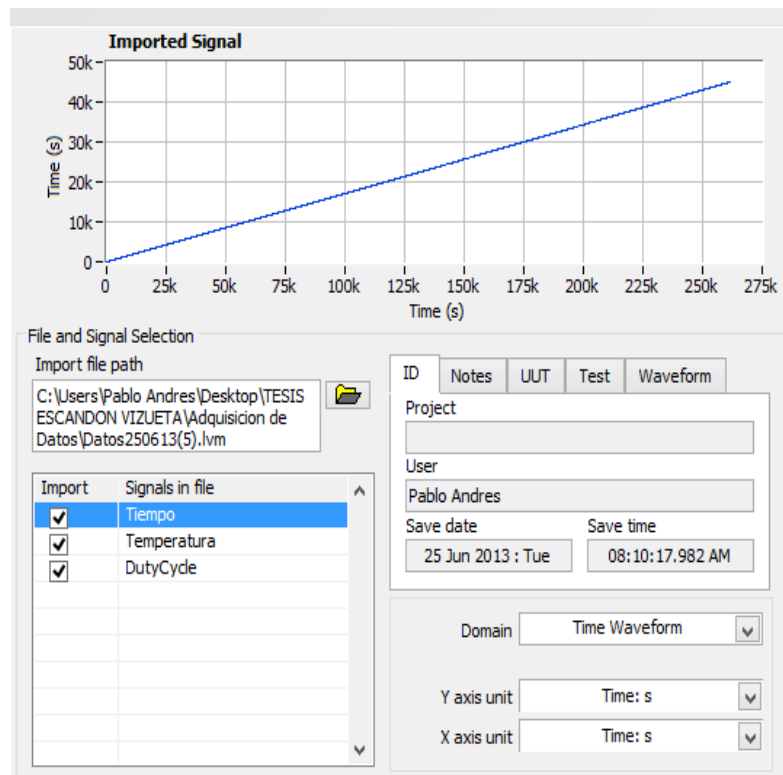


Figura 3.4 Variables a utilizar para la identificación del sistema.

Ya con los datos descargados, tenemos que escoger el porcentaje que vamos a utilizar de los datos adquiridos para realizar la identificación del sistema. En la Figura 3.5 se puede apreciar que hemos tomado la última tercera parte de los datos adquiridos. El resto se utilizará para la validación del sistema encontrado.

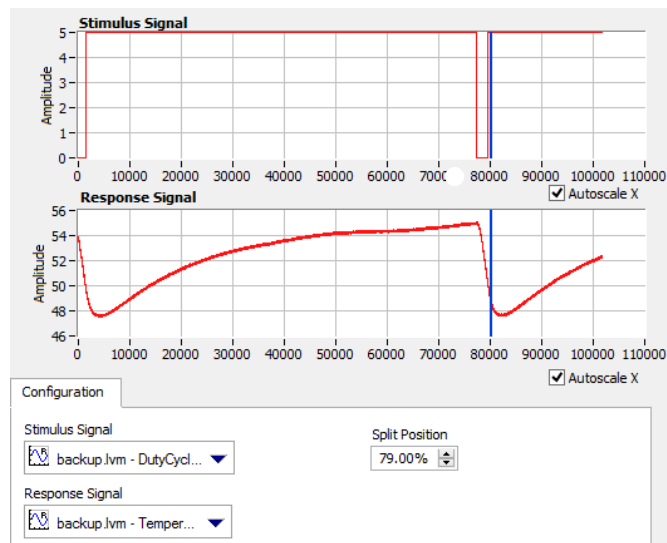


Figura 3.5 Toma de muestra para analizar.

Primero tenemos que ingresar la señal de estímulo y la señal de respuesta. Luego, tenemos que escoger el tipo de modelo que vamos a utilizar. El modelo *auto regressive with exogenous input* (ARX), suele ser seleccionado como la primera opción al momento de la identificación. La Figura 3.6 representa el modelo ARX simulado y la identificación del sistema.

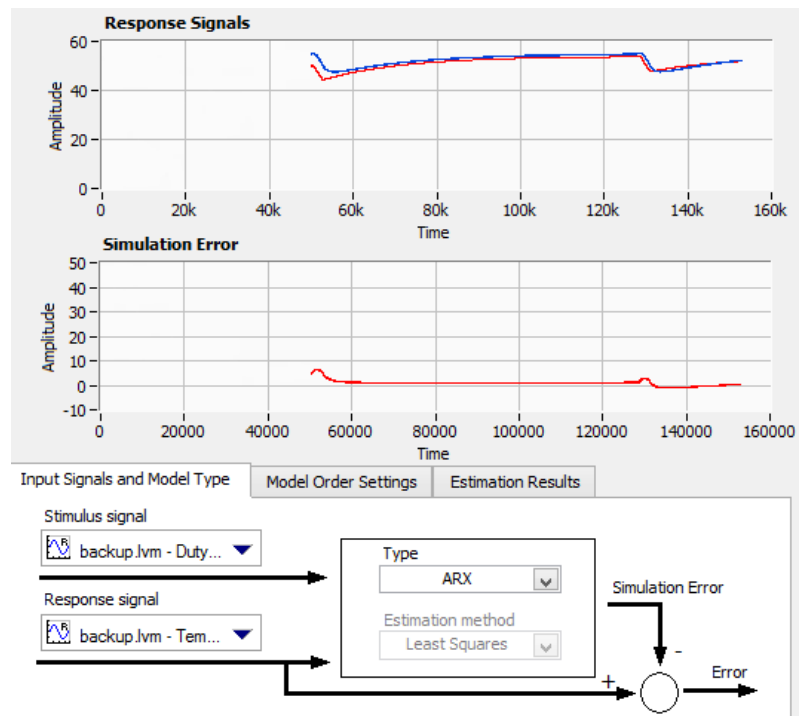


Figura 3.6 Identificación de Sistema

El modelo ARX, tiene como ecuación [29]:

- $A(q) y(t) = B(q)u(t) + e(t)$ .
- $u(t)$  : Entrada del sistema.
- $e(t)$ : Perturbación del sistema.
- $y(t)$ : Salida del sistema.
- $A(q)$ ,  $B(q)$ : representan los polinomios que describen la dinámica del proceso sistema, teniendo en cuenta lo indicado en las ecuaciones:  $A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$ ;  
 $B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb}+1$ .

El modelo *auto regressive with moving average and exogenous input* (ARMAX), Figura 3.7, describe el error en la ecuación como un promedio móvil. El modelo ARMAX se denota y define como se indica en las ecuaciones [29]:

- $A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t)$
- Donde es  $C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc}$

El modelo Output-Error (OE), Figura 3.8, es un tipo de modelo ARMAX, el cual posee una relación de entrada/salida sin perturbación, y que adicionalmente posee ruido blanco en la salida. El Modelo OE, se denota y define como se indica en la ecuación [29]:

- $y(t) = [B(q)/F(q)]*u(t-nk) + e(t)$

El Modelo Box-Jenkins, Figura 3.9, es una generalización del modelo OE, el cual se define como un modelo ARMAX con una relación de entrada/salida sin perturbación, más ruido blanco en la salida. El modelo Box-Jenkins se denota y define como se indica en las siguientes ecuaciones [29]:

- $y(t) = [B(q)/F(q)]*u(t) + [C(q)/D(q)]*e(t)$
- Donde  $D(q) = 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_{nd}q^{-nd}$  y  $F(q) = 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf}$

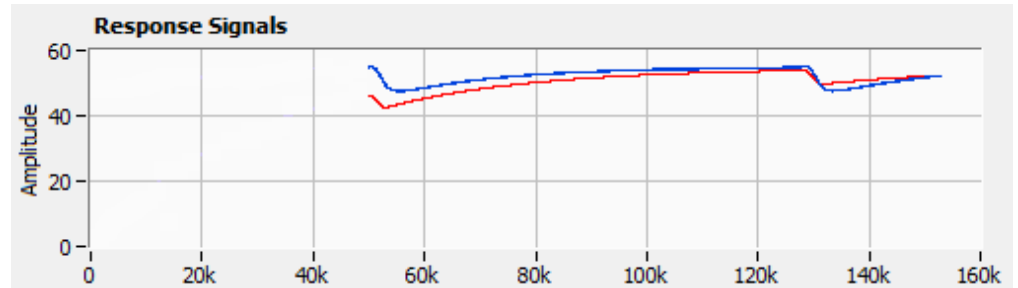


Figura 3.7 Señal de Respuesta Real y Simulada con modelo ARMAX.

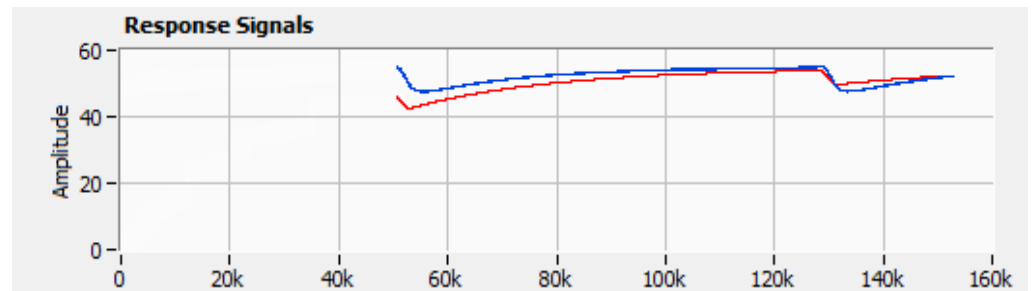


Figura 3.8 Señal de Respuesta Real y Simulada con modelo Output-Error.

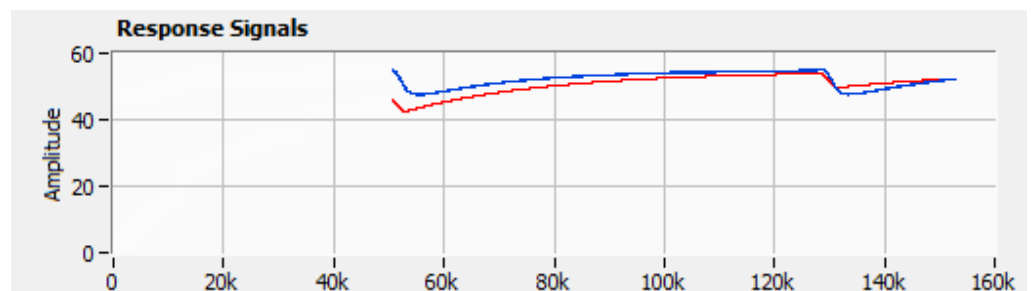


Figura 3.9 Señal de Respuesta Real y Simulada con modelo Box Jenkins.



Dentro de los modelos que nos permite utilizar el LabVIEW SignalExpress, el modelo que más se acerca a la señal de respuesta real es el modelo ARX. En la figura 3.10 tenemos la respuesta real de color azul y la respuesta simulada de color rojo.

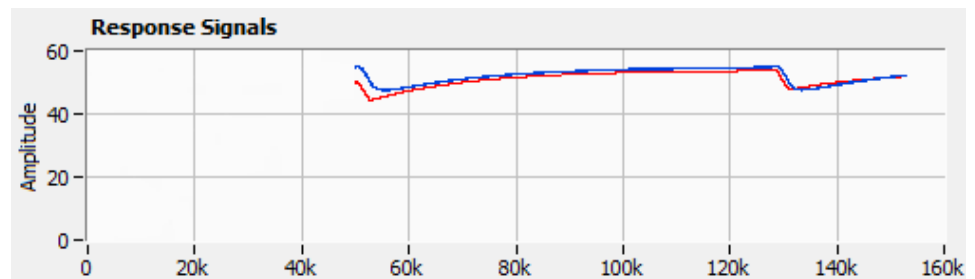


Figura 3.10 Señal de Respuesta Real y Simulada con modelo ARX.

Con el modelo ARX se pudo obtener la siguiente función de transferencia para el sistema de nuestro calibrador de temperatura de tipo baño.

$$z^{-400} \frac{0.00061467z}{z - 0.999943}$$

Figura 3.11 Función de transferencia discreta.

La función de transferencia obtenida es de primer orden con un retardo. Cuando hablamos de retardo nos referimos a un desfase o retardo respecto a la señal de estímulo.

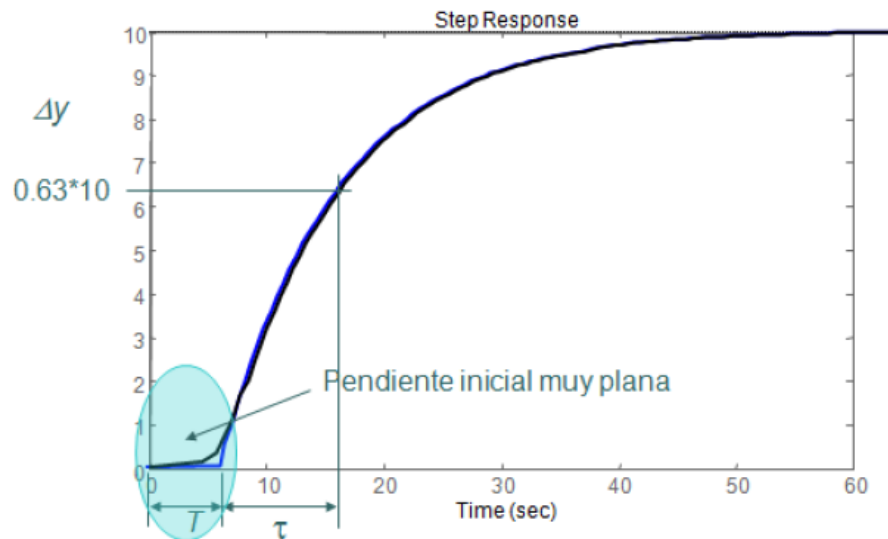


Figura 3.12 Gráfica de señal de primer orden con retardo [30].

La función de transferencia continua es:

$$G(s) = e^{-T*s} K / (1 + \tau*s)$$

Donde:

- K: Ganancia del sistema  $K = \Delta y / \Delta u$ .
- $\tau$ : Constante de tiempo.
- T: Retardo.

Sobre el retardo, se escogió 1000 segundos, ya que con este retardo la función de transferencia se aproximó más a la señal real. Una vez obtenida la función de transferencia pasamos a la búsqueda del controlador.

## **3.2. Sintonización**

### **3.2.1. Elección de modelo de sintonización**

El método escogido es el de Cohen y Coon, o mejor conocido como el método de la curva de respuesta. Para tener valores iniciales de nuestro controlador PID se necesita del método semi-empírico que hemos escogido. Si la planta no incluye integrador(es) o polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta al escalón puede tener el aspecto de una curva en forma S. Esta curva se caracteriza por dos parámetros, el tiempo de retardo y la constante de tiempo. Los cuales podemos obtener de la figura 3.10. Con los cuales podremos llenar la tabla con los datos siguientes:

Tipo de controlador	Kc	Ti	Td
P	$\tau/T$	infinito	0
PI	$0.9\tau/T$	$T/0.3$	0
PID	$1,2\tau/T$	$2T$	$0.5T$

Tabla 3.1 Formulas para obtener datos del controlador.

Recordando el significado de cada variable, vamos a la figura 3.10 de donde se tomaran los datos necesarios para llenar la tabla de datos iniciales para nuestro controlador.

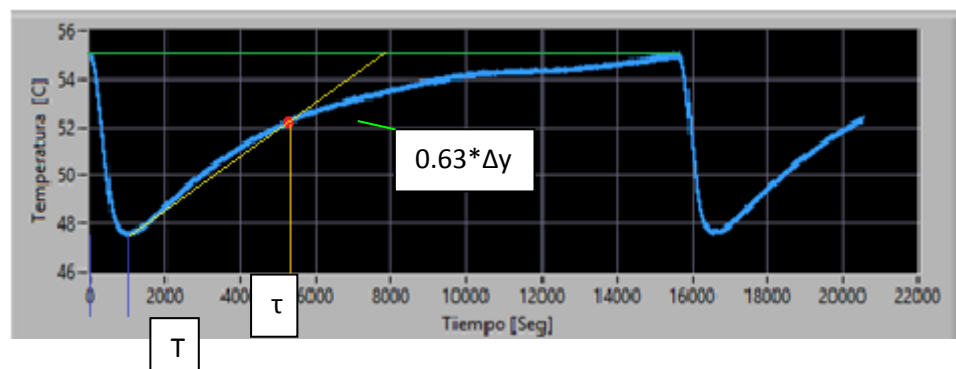


Figura 3.13 Señales de estímulo y respuesta

Hemos obtenido los siguientes datos:

$\tau$ : 4410 s.

T: 470 s.

$$\Delta y = 55.03 - 47.56 = 7.47 \text{ (señal de salida)}$$

$$\Delta u = 5 \text{ (señal de entrada)}$$

$$K = 7.47 / 5 = 1.494$$

$$K = 1.494$$

Al tener los datos del gráfico, llenamos la tabla con los valores obtenidos y el desarrollo de las operaciones propuestas. Hay datos para controlador P, controlador PI o un controlador PID.

Tipo de controlador	Kc	Ti	Td
P	9.38	infinito	0
PI	8.44	1566.66	0
PID	11.25	940	235

Tabla 3.2 Datos de controlares.

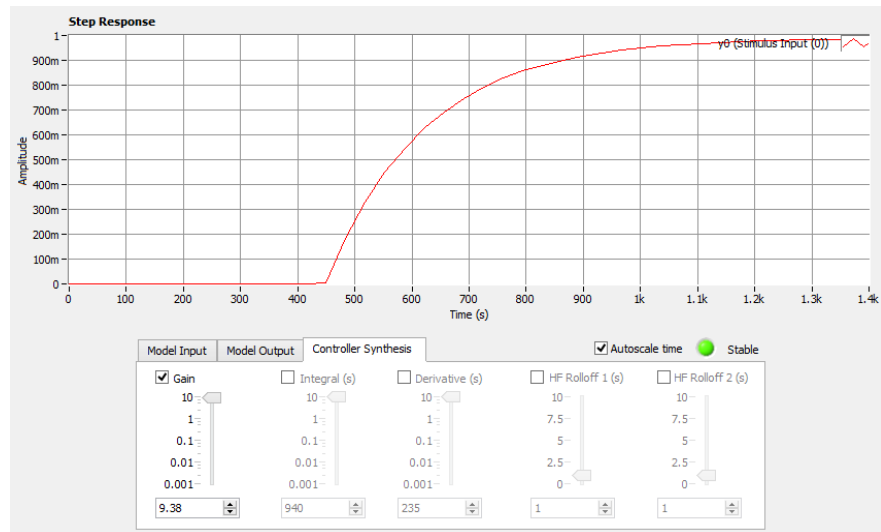


Figura 3.14 Simulación de controlador P.

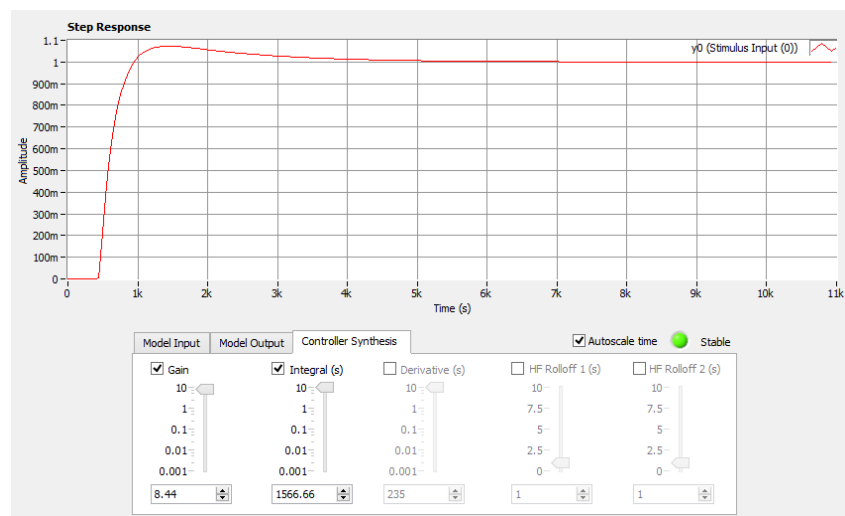


Figura 3.15 Simulación de controlador PI.

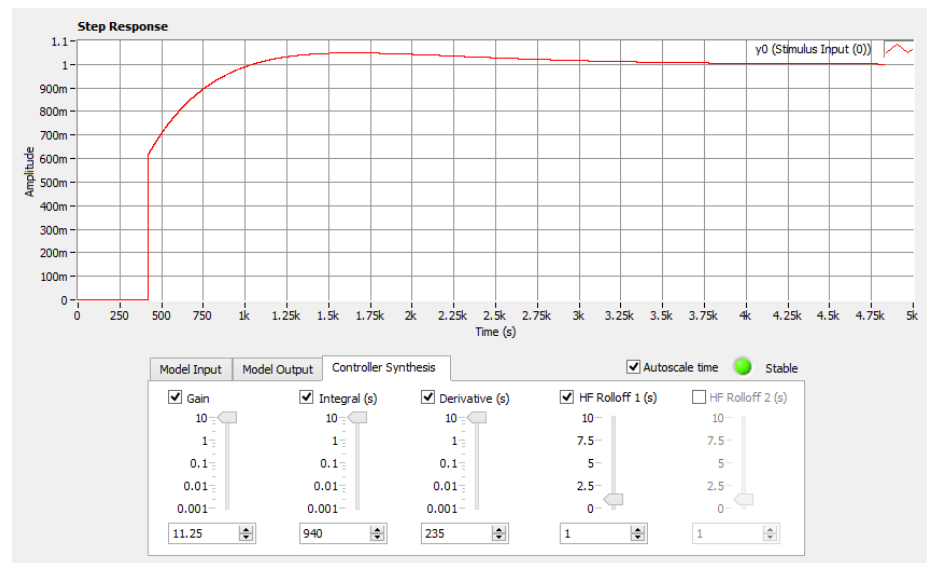


Figura 3.16 Simulación de controlador PID.

Observamos que el solo uso de un controlador proporcional no genera valor alguno, su valor de estabilización queda en 0. En cambio en el controlador PI, y el controlador PID, la estabilización existe en el valor deseado. Se necesita de una prueba en el calibrador para confirmar cual de los dos es el apropiado. A simple vista, el controlador de preferencia sería el PID porque tiene un tiempo de estabilización mejor que el controlador PI. Pero para confirmar que el método de lazo abierto utilizado nos ha ayudado, se necesitan de pruebas en el calibrador.

### 3.2.2. Pruebas del método elegido

Las pruebas en el calibrador se realizaron con los controladores PI y PID ya obtenidos con anterioridad.

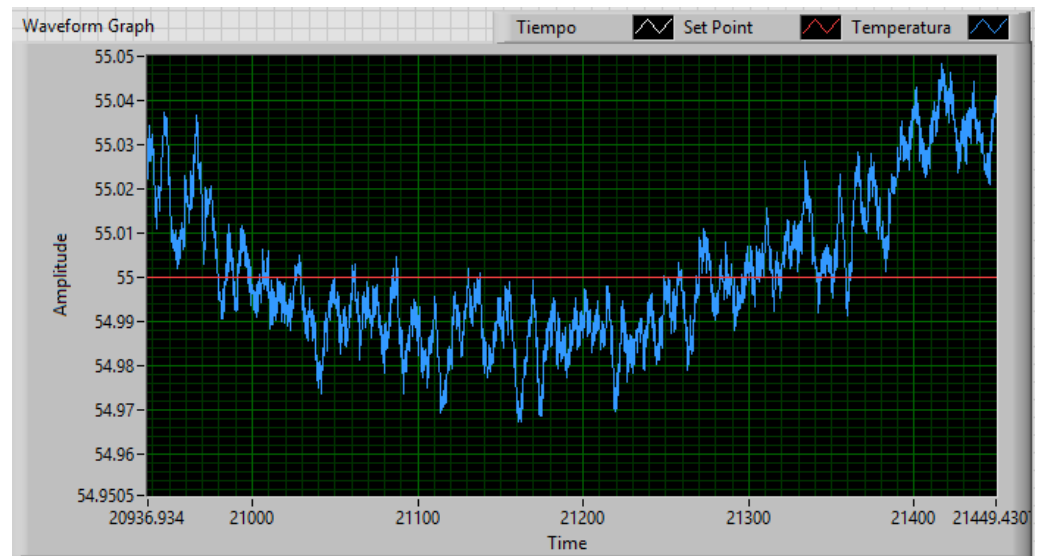


Figura 3.17 Señal con controlador PI.

La señal con el controlador PI muestra una oscilación con picos dentro de un rango de temperatura moderado. Podemos observar que la señal se encuentra entre 54.95°C a 55.05°C, lo cual es aceptable para nuestro calibrador.



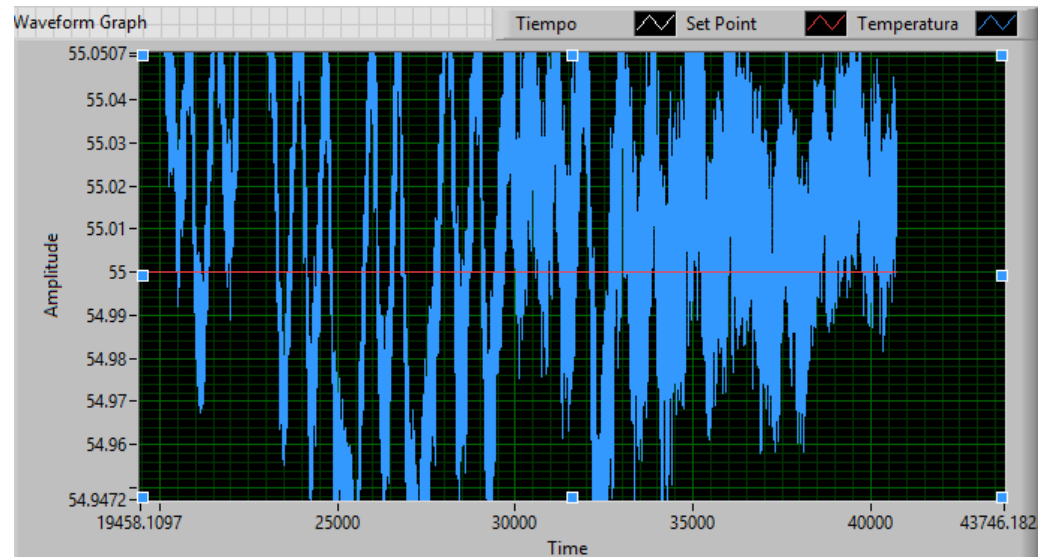


Figura 3.18 Señal con controlador PID.

La señal con el controlador PID muestra una oscilación con picos fuera de un rango de temperatura moderado. Podemos observar que la señal sale de los valores entre 54.95°C a 55.05°C.

### 3.2.3. Análisis de los resultados

Con los datos obtenidos entre los controladores PI y PID, podemos decidir que el controlador PI es el controlador que tiene un mejor desempeño al momento de obtener un temperatura estable. Sin embargo los dos controladores tienen un tiempo de estabilización mayor a 2 horas, esto nos llevó a realizar una variación en el controlador PI para poder obtener una estabilización dentro de 45 a 55 minutos.

Con el cambio realizado tenemos que el valor proporcional es 8.44, pero el valor del integral es 0.05. De esta manera obtenemos que el tiempo de estabilización entre al rango de 44 a 55 minutos. En la figura 3.16 podemos observar la gráfica de la temperatura que alcanza una estabilización en el tiempo deseado.

Para obtener los valores finales del controlador PI, se tomó en cuenta que "El inverso de  $T_i$  se denomina velocidad de reajuste, ésta indica la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control" [42]. Por lo tanto, se decidió disminuir el valor integral para reducir el valor de estabilización. Obteniendo un valor de 0.05.

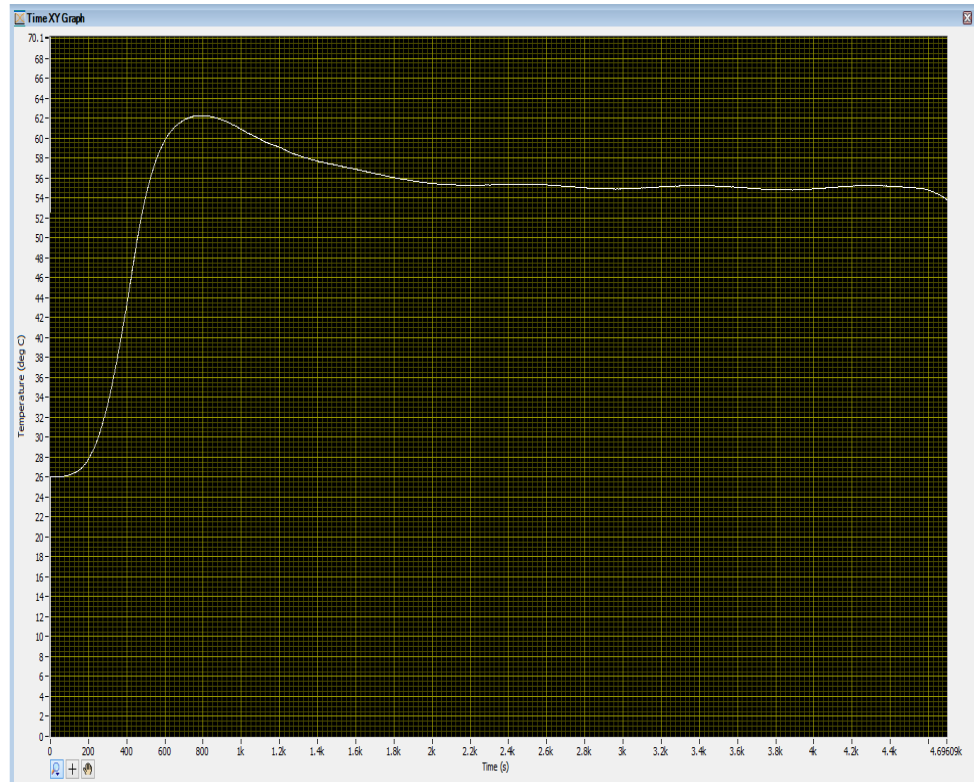


Figura 3.19 Señal de temperatura con el PI final.

La oscilación de la temperatura esta dentro de  $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ . Lo cual respeta el 3% F.E. que colocamos como objetivo en el desarrollo de nuestro calibrador. En la Figura 3.16 vemos que la temperatura de  $55^{\circ}\text{C}$  se alcanza a los 2800 s, o 46.6 min, y tenemos la generación de la temperatura dentro de los 55 min que habíamos especificado con anterioridad.

## **CAPÍTULO 4**

### **4. Homogeneidad de temperatura en el calibrador tipo baño**

#### **4.1. Significado**

Tomando en cuenta las definiciones del diccionario de la real academia española, homogeneizar es "transformar en homogéneo por medios físicos o químicos una mezcla o compuesto de elementos diversos" [43]. En química un sistema homogéneo "es aquel en el que sus propiedades intensivas no varían al pasar de unos puntos a otros del sistema" [44].

Con referencia a las definiciones anteriores, podemos dar paso a la homogeneidad térmica, la cual sería una característica donde la temperatura de un líquido es uniforme en todos sus puntos. Por lo tanto, si en un recipiente de agua, se mide la temperatura a 10 cm de

profundidad, y se considera que dicho líquido tiene una homogeneidad térmica ideal, la temperatura a 15 cm de profundidad tiene que ser la misma a la temperatura tomada a 10 cm. Y así para todos los puntos del recipiente de agua.

#### **4.2. Importancia de la homogeneidad de temperatura en el calibrador de temperatura**

En capítulos anteriores hicimos referencia a lo que es un equipo de calibración. Ya conociendo la importancia de un calibrador que satisfaga las necesidades del usuario al momento de calibrar. Lo que buscamos con la homogeneidad es tener un líquido con una temperatura controlada que nos sirva para calibrar sensores de temperatura.

El gran problema de no tener un líquido homogéneo, es tener un error considerable en distintas regiones de inserción. Hay que tener en cuenta que nuestro sensor RTD, el cual va a ser la referencia de temperatura para nuestro controlador, se encontrará en un punto fijo dentro del líquido, y el termómetro a calibrar se colocara en otro punto fijo dentro del mismo líquido. Si queremos una calibración aceptable, el líquido debe tener una temperatura homogénea, caso contrario

tendremos una calibración no válida porque al no existir una temperatura homogénea el Sensor Patrón (RTD) va a leer una temperatura diferente al termómetro a calibrar.

#### **4.3. Estudio de homogeneidad del líquido a utilizar en el proceso**

Para proceder a escoger los equipos necesarios es importante conocer los fenómenos que existen al momento de homogeneizar un líquido durante el proceso.

Según el libro de Operaciones unitarias en Ingeniería Química [32]; El éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos. Aunque con frecuencia tienden a confundirse, agitación y mezcla no son sinónimos. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor. La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas. Un único material homogéneo, tal como un tanque con agua fría, puede ser agitado pero, no puede mezclarse mientras no se le adicione otro material, tal como una cierta cantidad de agua caliente o algún sólido pulverulento.

Los líquidos se agitan con más frecuencia en tanques o recipientes, generalmente de forma cilíndrica y provistos de un eje vertical. Para la agitación de los líquidos es indispensable la presencia de un rodete, que usualmente va instalado sobre un eje suspendido, es decir un eje soportado en la parte superior. En nuestro caso, decidimos usar una pastilla magnética para que haga la función del rodete, debido a que en nuestro proyecto consiste en insertar sensores de temperatura desde la parte superior del recipiente cilíndrico, por ende era necesario buscar la manera de ahorrar espacio en la zona de inserción y un rodete conectado a la parte superior hubiera ocasionado muchos problemas en el diseño del calibrador.

El rodete crea un modelo de flujo en el sistema, dando lugar a que el líquido circule a través del tanque y eventualmente retorne al rodete. El tipo de flujo que se produce en un tanque agitado, depende del tipo de agitador, de las características del fluido y del tamaño y proporciones del tanque.

La velocidad del fluido en un punto del tanque tiene 3 componentes, y el tipo de flujo global en el mismo depende de las variaciones de estas tres componentes de la velocidad de un punto a otro. La primera componente de velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular

al eje del rodete. La segunda es longitudinal y actúa en dirección paralela al eje. La tercera es tangencial o rotacional, y actúa en dirección tangencial a la trayectoria circular descrita por el rodete. Para el caso corriente de un eje vertical, las componentes radial y tangencial están en un plano horizontal y la componente longitudinal es vertical. Las componentes radial y longitudinal son útiles por cuanto dan lugar al flujo necesario para que se produzca la mezcla o agitación. Cuando el eje es vertical y está dispuesto en el centro del tanque, la componente tangencial de velocidad es generalmente perjudicial para la mezcla.

El flujo tangencial sigue una trayectoria circular alrededor del eje y, según se representa en la Figura 4.1, crea un vórtice en la superficie del líquido que, debido a la circulación en flujo laminar, da lugar a una estratificación permanente en diferentes niveles de sustancias sin mezclar, sin que exista flujo longitudinal de un nivel a otro. Si están presentes partículas sólidas, las corrientes circulatorias tienden a lanzar las partículas contra la pared del tanque, debido a la fuerza centrífuga, desde donde caen acumulándose en la parte central del fondo del tanque. Por consiguiente, en vez de mezcla se produce la acción contraria, o su concentración (Harriott, 1991).



En nuestro caso, este vórtice originado por el flujo tangencial puede afectar la temperatura de la sustancia que deseamos agitar.

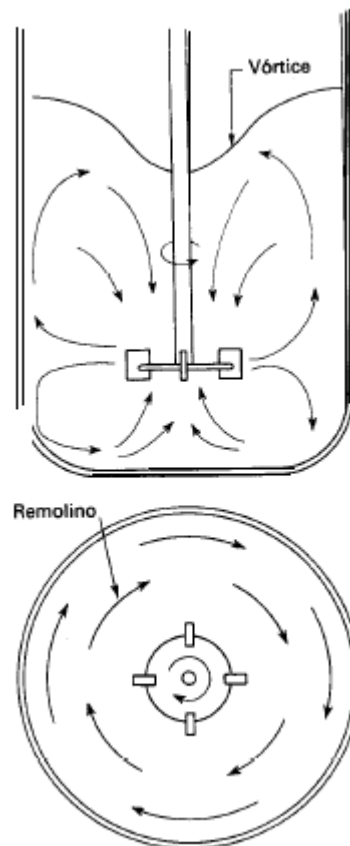


Figura 4.1 Movimiento del líquido al ser agitado (32).

En un tanque sin diseño de evasión de remolinos, el flujo circulatorio es inducido por todos los tipos de rodete, tanto si el flujo es axial como radial (32). En efecto, si los remolinos son intensos, el tipo de flujo dentro del tanque es esencialmente el mismo, independientemente del diseño del rodete.

Para velocidades de giro del rodete elevadas, la profundidad del vórtice puede ser tan grande que llegue al rodete mismo, dando lugar a que en el líquido se introduzca el gas o aire que está encima de él, lo cual normalmente debe evitarse. En nuestro caso, este fenómeno o "colchón de aire" (Término utilizado por metrólogos) afectaría considerablemente la temperatura del líquido a homogeneizar.



Figura 4.2 Se muestra el calibrador de baño sin tapa, donde se puede apreciar el flujo circulatorio generado por el agitador.

El flujo circulatorio y los remolinos pueden evitarse por varias formas. Para la prevención del flujo circulatorio en tanques de gran tamaño con agitadores verticales, el método más conveniente de reducir los remolinos es instalar placas deflectoras (32).

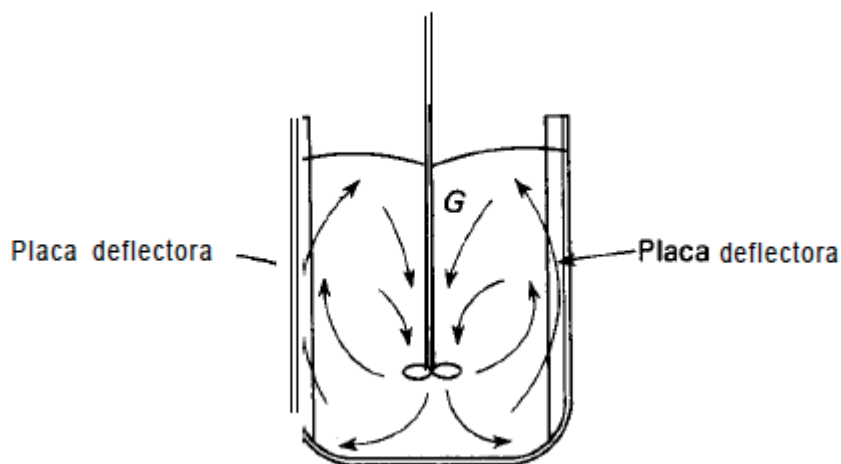


Figura 4.3 Método sencillo y eficaz para destruir los remolinos, instalar placas verticales perpendiculares a la pared del tanque (32).

En nuestro proyecto, decidimos que la mejor opción es fabricar una rejilla de tal forma que pueda romper el vórtice generado por el agitador, y su vez, que sirva para encapsular la pastilla giratoria y evitar el peligro de impacto entre la pastilla y los sensores de temperatura a calibrar.

El diseño de la rejilla, fue elaborado para que este pueda acoplarse con el borde del tubo de aluminio, y en la parte inferior de la rejilla un disco con orificios para el rompimiento del flujo tangencial. (Ver figuras 4.4 y 4.5).



Figura 4.4 Estructura con rejilla en la parte inferior.



Figura 4.5 Rejilla para calibrador de temperatura.

Como se muestra en la figura 4.6, la rejilla es sobrepuesta en el interior del tanque cilíndrico, encapsulando el agitador en la parte inferior del tanque. El agitador comenzará a moverse y la rejilla deflectora se encargará de que el flujo tangencial disminuya y de que el agitador no golpee ningún instrumento introducido en el mismo.

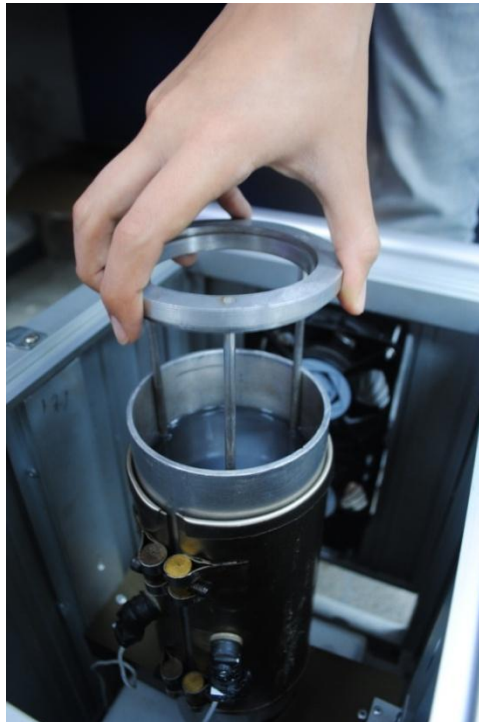


Figura 4.6 Estructura con rejilla dentro del líquido del calibrador.

Para el desarrollo del diseño de la rejilla se tomó como referencia el Calibrador de Temperatura TP-MULTI de SIKA. En ello, se puede apreciar un rejilla con las mismas características que la nuestra.

#### **4.3.1. Equipos a utilizar en el estudio de homogeneidad**

Después de haber explicado el fenómeno y las consecuencias del vórtice y cómo evitarlo, el siguiente paso para el proceso de homogeneización es la implementación de equipos patrón para una toma de datos más exactos.

Los equipos a utilizar serían los siguientes:

- Calibrador DTI-1000.
- Sensor STS-100.

El Calibrador DTI-1000 con el sensor STS-100 es un termómetro de trazabilidad completo, recomendado como instrumento de referencia para verificar la temperatura correcta en cualquier tipo de calibrador de temperatura, ya sea de bloque seco o de baño.

En la figura 4.7 se muestra una imagen del Calibrador DTI-1000 con especificaciones de cada uno de sus botones y partes.

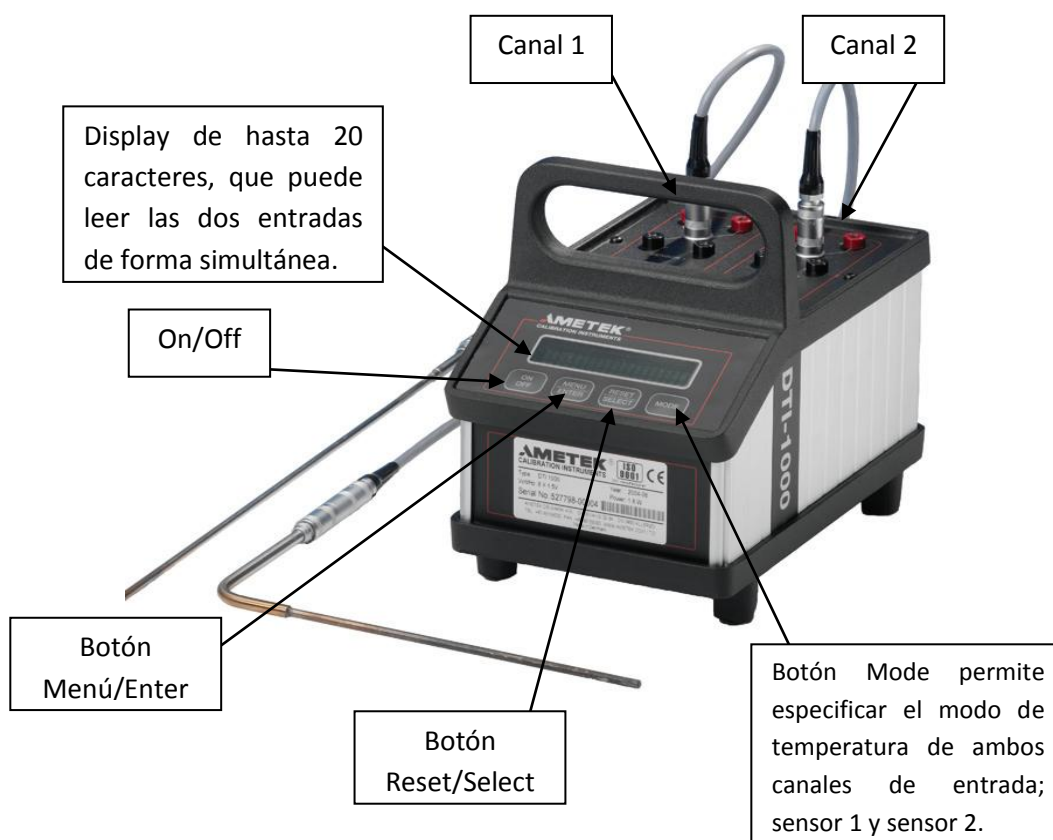


Figura 4.7 Patrón de temperatura DTI -1000 [16].

El sensor STS que disponemos, tiene un rango de temperatura de medición de  $-50$  hasta  $650$   $^{\circ}\text{C}$ , pero como solo trabajaremos a una temperatura alrededor de los  $55^{\circ}\text{C}$ , consideraremos la exactitud del sensor para temperaturas de  $-50$  a  $250^{\circ}\text{C}$  ( $-58$  a  $482^{\circ}\text{F}$ ), que es de  $\pm 0.030^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.054^{\circ}\text{F}$ ).

El sensor STS que está a nuestra disposición es el STS-100/B, de tipo PT100, cuya longitud de inserción es de  $207\text{mm}$  y la

forma de su bulbo es de tipo acodada, como se muestra en la Figura 4.8.

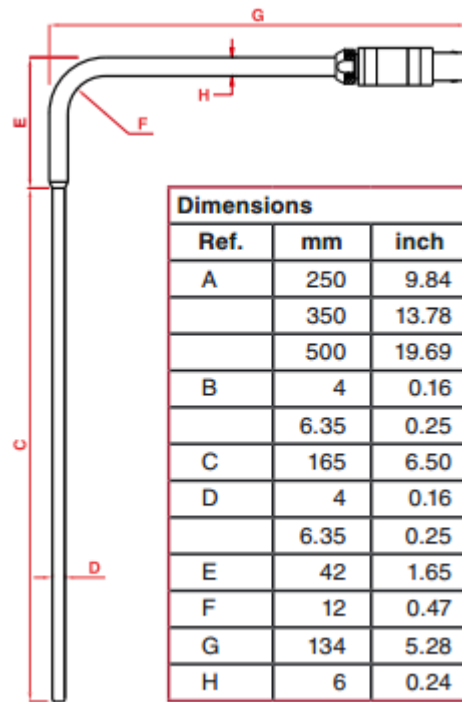


Figura 4.8 Sonda de temperatura del patrón de temperatura [16].

Los bulbos con forma acodada, sirven para facilitar la manipulación del sensor al momento de retirarlos de los insertos o en nuestro caso, el cilindro del calibrador de tipo baño.

El DTI-1000, que tiene el laboratorio metrológico SERLAM, posee entradas para 2 sensores STS-100, que nos facilitará la medición



de las pruebas de homogeneidad. Como se muestra en la Figura 4.8, detallando cada parte del mismo.

#### **4.3.2. Pruebas de homogeneidad**

Para las pruebas de homogeneidad del calibrador de Baño, se ha optado en tomar como referencia procesos de detección de homogeneidad ya existentes.

Según el Anexo B del documento "Procedure of the determination of the influence of Axial Temperature Distribution" [33], menciona que los calibradores de Bloques Patrón, para la calibración de temperatura, por lo general se utilizan en diferentes configuraciones, sensores con diferentes longitudes que estarían ubicados en diferentes áreas de la zona de medición. Como resultado, la distribución de la temperatura axial que existe a lo largo de la zona de medición contribuye a la incertidumbre de la calibración.

Para ello en el punto B.1.1 [33], existen pruebas que donde un termómetro deberá medir diferentes alturas del inserto utilizado para la calibración, es decir, para nuestro caso se introducirá el

sensor STS100, en 3 niveles distintos como se explica en la figura 4.9.

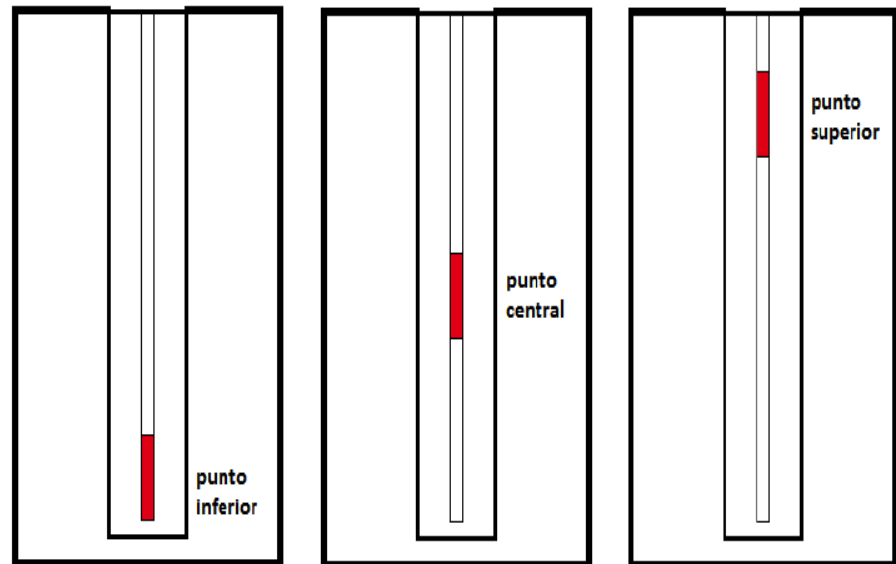


Figura 4.9 Punto inferior, Punto central y Punto superior.

Pero para ello, no solo bastará con tomar datos aleatoriamente en esas regiones del inserto, sino que tomando como referencia al manual de calibración de Bloques Secos de SERLAM [34] es necesario realizar una secuencia de medición ya asignada para este tipo de pruebas.

La secuencia de medición es la siguiente:

Lectura punto 1: Temperatura del líquido, punto inferior

Lectura punto 2: Temperatura del líquido, punto central

Lectura punto 3: Temperatura del líquido, punto superior

Lectura punto 4: Temperatura del líquido, punto inferior

Lectura punto 5: Temperatura del líquido, punto inferior

Lectura punto 6: Temperatura del líquido, punto central

Lectura punto 7: Temperatura del líquido, punto superior

Lectura punto 8: Temperatura del líquido, punto inferior

De acuerdo a las dimensiones del cilindro se decidió escoger los siguientes valores para los puntos: Punto inferior: 20cm, Punto central: 15cm, Punto superior: 10cm

Considerando la secuencia de medición mencionada, se procede a realizar las muestras en nuestro Calibrador de Tipo Baño. Nuestro calibrador tiene 4 orificios en la tapa superior; el uno es para el sensor patrón y los otros 3 es para introducir los sensores que se deseen calibrar.

Debido a la cantidad de orificios que existen en la tapa, aprovecharemos a tomar 3 muestras como mínimo, para cada zona de medición. Esto nos servirá, no solo para medir distintas alturas del inserto, sino también para medir distintos puntos axiales para así lograr que nuestra Desviación Axial sea a base de mayores muestras recogidas.

La Tabla 4.1 se muestra la secuencia de medición con la cantidad de toma de datos por cada punto. El tiempo de estabilización del calibrador fue de 57 minutos y el tiempo de toma de cada muestra fue de 2 minutos.

Temperatura de trabajo (°C)	Lectura punto 1	Lectura punto 2	Lectura punto 3	Lectura punto 4	Lectura punto 5	Lectura punto 6	Lectura punto 7	Lectura punto 8
55	54.918	54.722	54.684	54.727	54.784	54.967	54.761	54.777
55	54.721	54.705	54.611	54.686	54.621	54.846	54.673	54.81
55	54.649	54.747	54.709	54.907	54.812	54.702	54.95	54.731
55	54.65	54.723	54.633	54.73	54.721	54.733	54.684	54.733
55	54.632	54.733	54.677	54.691	54.654	54.833	54.722	54.75
55	54.663	54720	54.645	54.723	54.733	54.79	54.912	54.78

Tabla 4.1 Datos para estudio de homogenización.

Se decidió medir cada punto con el sensor del canal 1, debido a que el sensor del canal 2 presentaba un margen de error mayor que el del canal 1. A pesar de ello, se midió 6 muestras de temperaturas (Tabla 4.1) para cada punto de lectura, para así tener mayor cantidad de datos y poder realizar un análisis con mayores muestras.

#### 4.3.3. Análisis de Resultados

Para conocer la distribución axial de temperatura de los datos obtenidos en cada punto, se debe recoger los máximos y mínimos de la Tabla 4.1, para cada uno de los puntos de lectura como se indica en la tabla 4.2.

Muestras	Máximos	Mínimos
Punto inferior	54.918	54.621
Punto Central	54.967	54.702
Punto Superior	54.912	54.611

Tabla 4.2 Temperaturas máximas y mínimas.

Finalmente, se procede a realizar una resta entre máximos y mínimos ( $d = max - min$ ), para así detectar la desviación axial

en cada zona de medición. La desviación es representada en porcentajes,  $\%d = \frac{(max-min)}{100}$ , como se indica en la Tabla 4.3.

Muestras	Máximos	Mínimos	Desviación (%)
Punto inferior	54.918	54.621	0.00297
Punto Central	54.967	54.702	0.00265
Punto Superior	54.912	54.611	0.00301

Tabla 4.3 Desviación en el calibrador de temperatura.

En la tabla 4.3 se puede apreciar que existe una pequeña diferencia entre las desviaciones de cada una de las zonas de medición. Podemos concluir que el calibrador de tipo baño tiene una muy buena homogeneización a la temperatura de 55°C, lo cual es buen índice de que la temperatura será homogénea al momento de la calibración.

## **CAPÍTULO 5**

### **5. Pruebas y análisis de resultados**

#### **5.1. Pruebas y análisis**

##### **5.1.1. Planteamiento de pruebas**

Una vez obtenido la homogeneización del sistema y desarrollado nuestro controlador del calibrador de temperatura tipo baño, procederemos a realizar la calibración de un termómetro en 2 puntos de temperatura. Las temperaturas escogidas son 55°C y 75°C, en donde nuestro objetivo será buscar una generación de calor estable y con una homogenización aceptable para calibrar un termómetro bimetálico que suele utilizarse en los procesos industriales.

El termómetro que procederemos a calibrar tiene un rango de 0 a 300°C. Su error es del 1% del total de escala. A continuación se

explicará las pruebas realizadas y los cálculos necesarios para obtener la incertidumbre del equipo.

### **5.1.2. Pruebas y Resultados**

Para la calibración del sensor de temperatura, es necesario realizar previamente la calibración del equipo a utilizar, es decir el calibrador de temperatura tipo baño. Para ello, será necesario el uso de un equipo de referencia como lo es un "patrón", en nuestro caso se utilizará el DTI-1000 del laboratorio Serlam.

En el cálculo de la incertidumbre del CTB (Calibrador de tipo baño) procederemos a determinar ciertos parámetros que nos ayudarán a encontrar el resultado final. Con ayuda de los procedimientos para la calibración de bloques patrón [33] y para calibración de termómetros analógicos o digitales [44] que el Laboratorio de metrología SERLAM cuenta, realizaremos nuestro estudio de incertidumbre con los datos tomados en la calibración. Hay que recalcar que los procedimientos para el cálculo son la recopilación de otros procedimientos internacionales, realizados y mejorados con la experiencia y el sustento técnico necesario.



### a. Cálculos de incertidumbres

Para determinar la incertidumbre del ítem calibrado se han considerado los siguientes componentes:

- Sensor de temperatura (Patrón).
- Deriva del sensor de temperatura (Patrón).
- La resolución (CTB).
- La histéresis (CTB).
- La variación de temperatura (CTB).
- La variación de la temperatura axial (CTB).
- La Repetibilidad (CTB).

A continuación se indica la forma de cálculo de cada una de ellas.

#### **Sensor de temperatura Patrón (certificado de calibración).**

La incertidumbre de calibración del Patrón vendrá reflejada en su certificado de calibración. En los certificados se indican las incertidumbres expandidas, por lo que será

necesario dividir el valor indicado por el  $k$  del certificado correspondiente. si en el certificado llega a existir un cálculo de incertidumbre por cada punto, se debe de considerar la incertidumbre más alta.

La ecuación que define la incertidumbre debida al patrón es:

$$u(\text{pat}) = U_{\text{cert}}/k_{\text{cert.}}$$

<b>METODO UTILIZADO:</b> Por comparación según procedimiento de calibración LPC-PC-32.				
<b>INCERTIDUMBRE DE MEDIDA:</b> La incertidumbre expandida de medida informada se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de medida por el factor de cobertura $K=2$ que, para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%; y, se la estimó de acuerdo al documento "Guide to the Expression of Uncertainty in				
<b><u>PATRONES UTILIZADOS</u></b>				
Patrón	Modelo	Marca	Serie	Trazable a
Termómetro Patrón Pt 25	5628	Hart Scientific	1253	INEN/LPCI-T-2012-007
Supertermómetro	1590	Hart Scientific	A63325	CENAM/CNM-CC-410-110/2011
<b><u>RESULTADOS</u></b>				
Temperatura Patrón (°C)	Temperatura Calibrando (°C)	Error (°C)	Incertidumbre (°C)	
-39,997	-39,946	0,051	± 0,04	

Figura 5.1 Fragmento del certificado de calibración del patrón a utilizar.

En el certificado No. LPC-T-2012-045, emitido por el Instituto Ecuatoriano de Normalización, la incertidumbre que tiene el equipo es de  $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$  para el DTI-1000, equipo patrón del laboratorio de metrología SERLAM. Dentro de nuestra fórmula de la incertidumbre del patrón, el  $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$  es  $U_{\text{cert}}$ . En el mismo certificado tenemos el valor  $k_{\text{cert}}$  que es 2. Entonces estos datos obtenemos lo siguiente:

$$u(\text{pat}) = \pm 0.04/2$$

$$u(\text{pat}) = \pm 0.02^{\circ}\text{C}$$

### **La deriva del sensor Patrón.**

Este dato lo obtenemos tomando como base el histórico de calibraciones del sensor patrón de temperatura. Para ello, se considera la tabla del histórico de patrones de temperatura. A dicho valor, le consideramos una distribución rectangular, y la ecuación que la define es:

$$u(\text{der pat}) = \text{der}/\sqrt{12}$$

La información que nos da el laboratorio es la incertidumbre de fábrica, que es  $0.012^{\circ}\text{C}$ , y con la incertidumbre actual que tenemos, podemos sacar la variable *der*.

$$der = u(pat)_{final} - u(pat)_{inicial}$$

$$der = 0.02 - 0.012$$

$$der = 0.008^{\circ}\text{C}$$

Ya con el dato obtenido podemos realizar el cálculo de la incertidumbre de la deriva del patrón.

$$u(der\ pat) = 0.008/\sqrt{12}$$

$$u(der\ pat) = 0.00565^{\circ}\text{C}$$

### **Resolución del CTB.**

Siendo “*res*” la resolución del CTB, puede describirse también por una distribución rectangular y la ecuación que la define es:

$$u(res) = res / \sqrt{12}$$

La resolución de nuestro CTB es de 0.1°C. Por lo tanto tenemos que  $u(res)$  es:

$$u(res) = 0.1 / \sqrt{12}$$

$$u(res) = 0.02887^{\circ}\text{C}$$

### **Histéresis del CTB.**

Este factor de incertidumbre se debe a que las indicaciones del CTB pueden variar una cierta cantidad dependiendo que se obtengan mediante temperaturas crecientes o decrecientes. Si llamamos *his* al intervalo de

posibles lecturas debido a este motivo, la ecuación que definiría esta incertidumbre sería:

$$u(his) = his / 2\sqrt{3}$$

<b>Temperatura del CTB</b>	<b>Subida 1</b>	<b>Bajada 1</b>	<b>Subida 2</b>	<b>Bajada 2</b>
55	54.676	54.712	54.712	54.702
75	74.726	74.726	74.757	74.757

Tabla 5.1 Datos de temperatura al calibrar el CTB

$$his(1) = 54.712 - 54.676$$

$$his(1) = 0.036^{\circ}C$$

$$his(2) = 54.702 - 54.712$$

$$his(2) = -0.010^{\circ}C$$

La diferencia mayor es el his(1), por lo cual ésta será nuestro valor his ya que debemos tomar el peor de los escenarios.

$$u(his) = 0.036 / 2\sqrt{3}$$

$$u(his) = 0.01039^{\circ}\text{C}$$

### Variación de la temperatura axial del CTB

Este factor de incertidumbre se debe a que las indicaciones del CTB pueden variar una cierta cantidad dependiendo lo que se obtengan en el punto inferior, central o superior. Si llamamos  $axc$  al intervalo de diferencia entre las posibles lecturas debido a este motivo, la ecuación que definiría esta incertidumbre sería:

$$u(axc) = axc / 2\sqrt{3}$$

El punto inferior es entre 20 a 15 cm, el punto central entre 15 a 10 cm y el punto superior entre 10 a 5 cm. Cuando el calibrador esta en  $55^{\circ}\text{C}$  obtenemos los siguientes datos:

	<b>Temperatura</b>
Punto inferior	54.616
Punto central	54.675
Punto superior	54.622

Tabla 5.2 Temperatura en diversas partes del calibrador.

Con estos datos vamos a empezar a buscar la diferencia mayor entre los 3 datos para escogerla como dato  $axc$ .

$$axc(1) = \text{punto inferior} - \text{punto central}$$

$$axc(1) = 54.616 - 54.675$$

$$axc(1) = -0.059^{\circ}\text{C}$$

$$axc(2) = \text{punto central} - \text{punto superior}$$

$$axc(2) = 54.675 - 54.622$$

$$axc(2) = 0.053^{\circ}\text{C}$$

$$axc(3) = \text{punto superior} - \text{punto inferior}$$

$$axc(3) = 54.622 - 54.616$$

$$axc(3) = 0.006$$

El valor mayor es  $axc(1)$ , por lo tanto este será el valor escogido para el respectivo cálculo.

$$u(axc) = 0.059/2\sqrt{3}$$

$$u(axc) = 0.017032^{\circ}\text{C}$$



### Variación de temperatura del CTB

Este factor de incertidumbre se debe a que las indicaciones del CTB pueden variar en relación al tiempo. Si llamamos *var* al intervalo de posibles lecturas debido a este motivo, la ecuación que definiría esta incertidumbre sería:

$$u(var) = var / 2\sqrt{3}$$

La toma de datos se realiza a los 55°C, la hora inicio es a las 17:14 y hora final de la toma de datos fue a las 17:48.

# de muestras	Temperatura
1	55.0°C
2	55.0°C
3	55.1°C
4	55.0°C
5	55.0°C

Tabla 5.3 Variación de temperatura a 55°C.

Como podemos observar en la Tabla 5.3, la variación en 55°C fue de 0.1°C. La estabilidad de la temperatura es aceptable.

Para confirmar el comportamiento del calibrador en otras temperaturas, hicimos la prueba en 75°C. Con esta prueba nos percatamos que la estabilidad del CTB varía según la temperatura. La prueba inició con toma de datos a las 10:31.

# de muestras	Temperatura
1	75.9°C
2	74.9°C
3	74.7°C
4	75.5°C
5	75.6°C

Tabla 5.4 Variación de temperatura a 75°C.

El final de la prueba fue a las 10:44. La diferencia mayor que encontramos fue de 0.9°C. Por lo tanto la variable var será de 0.9°C.

$$u(var) = 0.9 / 2\sqrt{3}$$

$$u(var) = 0.25981^\circ\text{C}$$

### Repetibilidad de las medidas

La incertidumbre debida a la Repetibilidad del CTB viene dada por la siguiente expresión:

$$u(rep) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[ X_i - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2}{n-1}}$$

Donde:

$u(rep)$ : Es la incertidumbre aleatoria asociada al CTB.

$n$ : Es el número de medidas tomadas para la temperatura generada (10 para este caso).

$X_i$  : Es cada una de las mediciones realizadas en un punto en los diferentes ciclos.

Como se calcula incertidumbre de repetibilidad para cada uno de los puntos de calibración, la que se utilizará para el cálculo de la incertidumbre típica combinada será la de mayor valor.

# de muestras	Temperatura
1	54.605°C
2	54.622°C
3	54.653°C
4	54.654°C
5	54.633°C
6	54.599°C
7	54.626°C
8	54.655°C
9	54.612°C
10	54.617°C

Tabla 5.5 Datos de temperatura para el cálculo de la repetibilidad.

$$\sum_{i=1}^n X_i = 54.605 + 54.622 + 54.653 + 54.654 + 54.633 + 54.599 + 54.626 + 54.655 + 54.612 + 54.617 = 546.276$$

$$\left[ X_1 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2 = \left[ 54.605 - \frac{546.276}{10} \right]^2 = 0.00051076$$

$$\left[ X_2 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2 = \left[ 54.622 - \frac{546.276}{10} \right]^2 = 0.00003136$$

$$\left[ X_3 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2 = \left[ 54.653 - \frac{546.276}{10} \right]^2 = 0.00064516$$

$$\left[ X_4 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2 = \left[ 54.654 - \frac{546.276}{10} \right]^2 = 0.00069696$$

$$\left[ X_5 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2 = \left[ 54.633 - \frac{546.276}{10} \right]^2 = 0.00002916$$

$$\left[ X_6 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2 = \left[ 54.599 - \frac{546.276}{10} \right]^2 = 0.00081796$$

$$\left[ X_7 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2 = \left[ 54.626 - \frac{546.276}{10} \right]^2 = 0.00000256$$

$$\left[ X_8 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2 = \left[ 54.655 - \frac{546.276}{10} \right]^2 = 0.00075076$$

$$\left[ X_9 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2 = \left[ 54.612 - \frac{546.276}{10} \right]^2 = 0.00024336$$

$$\left[ X_{10} - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]^2 = \left[ 54.617 - \frac{546.276}{10} \right]^2 = 0.00011236$$

$u(rep) =$

$$\frac{1}{\sqrt{10}} \sqrt{\frac{(0.00051076 + 0.00003136 + 0.00064516 + 0.00069696 + 0.00002916 + 0.00081796 + 0.00000256 + 0.00075076 + 0.00024336 + 0.00011236)}{10 - 1}}$$

$$u(rep) = 0.0065323^{\circ}\text{C}$$

### 5.1.3. Análisis de resultados

Los datos obtenidos luego de las diferentes pruebas y cálculos son los siguientes:

<b>Tipo de Incertidumbres</b>	<b>Valores</b>
u(pat)	0.02°C
u(der pat)	0.00565°C
u(res)	0.02887°C
u(his)	0.01039°C
u(rep)	0.0065323°C
u(axc)	0.017032°C
u(var)	0.25981°C

Tabla 5.6 Tabla de valores de incertidumbres obtenidos.

A continuación con los datos de la Tabla 5.6 y aplicando la ley de propagación de incertidumbres se obtienen la incertidumbre típica combinada en la calibración de temperatura.

$$U(comb) = \sqrt{\{[u(pat)]^2 + [u(der pat)]^2 + [u(res)]^2 + [u(his)]^2 + [u(rep)]^2 + [u(axc)]^2 + [u(var)]^2\}}$$

$$U(comb) = \sqrt{\{[0.02]^2 + [0.00565]^2 + [0.02887]^2 + [0.01039]^2 + [0.0065323]^2 + [0.017032]^2 + [0.25981]^2\}}$$

$$U(comb) = 0.2631^\circ\text{C}$$

La incertidumbre expandida se obtiene multiplicando la incertidumbre típica de combinada por el factor de cobertura  $k=2$  que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

$$U(exp) = k \cdot U(comb)$$

$$U(exp) = 2 * 0.2631 = 0.5262^\circ\text{C}$$

Como nuestro CTB tiene una resolución de  $0.1^\circ\text{C}$ . La incertidumbre de nuestro equipo será  $0.6^\circ\text{C}$ .

Otros datos que deben tomarse en cuenta, es la temperatura ambiente y humedad relativa del lugar donde se realiza la

calibración. En las diferentes pruebas realizadas el inicio de temperatura es la temperatura ambiente del lugar, lo cual afecta en el comportamiento del calibrador. Las pruebas fueron realizadas en un ambiente controlado, donde la temperatura ambiente no superó los 27°C.

## **5.2. Calibración de termómetro**

### **5.2.1. Pruebas y análisis de la calibración**

Se calcularán por un lado las incertidumbres del sistema de calibración y por otro lado las correspondientes al ítem calibrado.

Las fuentes de incertidumbre de CTB que se tomarán en cuenta son:

- Incertidumbre por el certificado de calibración.
- Incertidumbre por resolución.
- Incertidumbre de estabilidad.
- Incertidumbre de uniformidad.

Las fuentes de incertidumbre del ítem calibrado serán:



- Incertidumbre por resolución.
- Incertidumbre de Repetibilidad.
- Incertidumbre del sistema de calibración.
- Incertidumbre típica combinada.
- Incertidumbre expandida

Se muestra a continuación la forma de cálculo de cada una de ellas.

### **Incertidumbre por el certificado de calibración CTB**

Se obtiene a partir de los datos del certificado de calibración. Si a dicha incertidumbre se le ha aplicado un factor de cobertura K, debe dividirse para dicho valor. La ecuación que la define es:

$$U(CTB) = \frac{U(cert)}{K(cert)}$$

$$U(CTB) = \frac{0.6}{2}$$

$$U(CTB) = 0.3^{\circ}\text{C}$$

### **Incertidumbre por resolución CTB**

Siendo “res” la resolución del CTB, puede describirse mediante una distribución rectangular y la ecuación que la define es:

$$u (res CTB) = res / \sqrt{12}$$

$$u (res CTB) = 0.1 / \sqrt{12}$$

$$u (res CTB) = 0.02886^{\circ}C$$

### **Incertidumbre de estabilidad CTB**

Este valor viene dado por el fabricante, por ello se lo obtendrá de los datos técnicos del CTB; cuando el CTB tenga más de 12 meses de utilización, el valor de estabilidad se obtendrá de la especificación “Valores de Estabilidad y Uniformidad de patrones de temperatura”. La ecuación que define esta incertidumbre es:

$$u (est CTB) = est / \sqrt{12}$$

Como nuestro CTB no tiene 12 de meses de fabricado, el valor "est" es 0. Esta característica varía por el uso que se le da al equipo.

$$u (est CTB) = 0/\sqrt{12}$$

$$u (est CTB) = 0^{\circ}C$$

### **Incertidumbre de uniformidad CTB**

Este valor viene dado por el fabricante, por ello se lo obtendrá de los datos técnicos del CTB; cuando el CTB tenga más de 12 meses de utilización, el valor de estabilidad se obtendrá de la especificación "Valores de Estabilidad y Uniformidad de patrones de temperatura". La ecuación que define esta incertidumbre es:

$$u (unif CTB) = est /\sqrt{12}$$

La uniformidad es la cualidad del calibrador en tener una temperatura similar en diferentes puntos de este. La cual varía con el tiempo de trabajo que tenga el equipo. Como es un equipo que tiene poco tiempo de uso el valor "est" es igual a 0.

$$u(\text{unif CTB}) = 0/\sqrt{12}$$

$$u(\text{unif CTB}) = 0^\circ\text{C}$$

### **Incertidumbre combinada del CTB**

En este punto, tenemos 4 incertidumbres obtenidas del CTB, por lo cual, se aplica la ley de propagación de incertidumbres para obtener un solo valor por el generador de temperatura. La ecuación que define esta incertidumbre es:

$$u(\text{comb CTB}) = \sqrt{\{[u(\text{CTB})]^2 + [u_{\text{res}}(\text{CTB})]^2 + [u_{\text{est}}(\text{CTB})]^2 + [u_{\text{unif}}(\text{CTB})]^2\}}$$

El valor obtenido por la ecuación  $u(\text{comb CTB})$  será combinado con las contribuciones de la incertidumbre por el ítem calibrado.

$$u(\text{comb CTB}) = \sqrt{0.3^2 + 0.02886^2 + 0^2 + 0^2}$$

$$u(\text{comb CTB}) = 0.3014^\circ\text{C}$$

### **Incertidumbre por resolución (Ítem)**

Siendo “res” la resolución del ítem calibrado, podrá describirse mediante una distribución rectangular y la ecuación que la define es:

$$u(res) = res / \sqrt{12}$$

La resolución del termómetro es de 1°C. Por lo tanto la incertidumbre por resolución es:

$$u(res) = 1 / \sqrt{12}$$

$$u(res) = 0.28867^\circ\text{C}$$

### **Incertidumbre de Repetibilidad (Ítem)**

Como en cada punto de calibración se han tomado 4 medidas en condiciones de Repetibilidad, se hallará la desviación típica de las mediciones para cada punto de calibración. La ecuación que la define es:

$$u(rep) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n-1}}$$

Donde  $\bar{M} = \sum_{i=1}^n M_i / n$ , es el valor medio de las medidas.

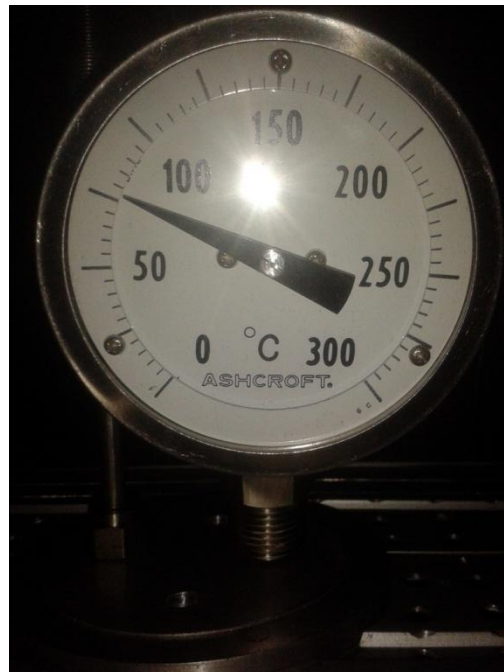


Figura 5.2 Termómetro calibrando en el punto 75°C.



Figura 5.3 Termómetro calibrando en el punto 55°C.

Para el cálculo final de la incertidumbre del ítem, se tomara la mayor de las incertidumbres de Repetibilidad calculadas.

Temperatura de referencia	Dato 1	Dato 2	Dato 3	Dato 4
55°C	54°C	54°C	54°C	54°C
75°C	77°C	77°C	77°C	77°C

Tabla 5.7 Datos obtenidos en el proceso de calibración del termómetro bimetálico.

$$\bar{M}(55) = \frac{54 + 54 + 54 + 54}{4} = 54$$

$$\bar{M}(75) = \frac{77 + 77 + 77 + 77}{4} = 77$$

$$n = 2$$

$$u(rep) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n-1}}$$

$$u(rep) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{(55 - 54)^2 + (75 - 77)^2}{2-1}}$$

$$u(rep) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{5}{1}}$$

$$u(rep) = 1.5811^\circ\text{C}$$

### **Incertidumbre del sistema de calibración (Ítem)**

Es la incertidumbre combinada del CTB, calculada anteriormente.



### **Incertidumbre típica combinada (Ítem)**

Tenemos 3 incertidumbres calculadas, a las cuales les aplicaremos ley de propagación de incertidumbres.

$$U (comb) = \sqrt{[u(com CTB)]^2 + [u res]^2 + [u rep]^2}$$

$$U (comb) = \sqrt{[0.3014]^2 + [0.28867]^2 + [1.5811]^2}$$

$$U (comb) = 1.63525^{\circ}C.$$

### **Incertidumbre expandida**

A la incertidumbre típica combinada, le aplicamos un factor de cobertura  $K=2$ , que corresponde a una probabilidad de aproximadamente el 95%.

$$U (exp) = K \times U(comb)$$

$$U (exp) = 2 \times 1.63525$$

$$U (exp) = 3.2705^{\circ}C$$

En el VI de nuestro calibrador podemos encontrar la opción "Cálculo de Incertidumbre" (figura 5.4), con lo cual podemos llegar a obtener la incertidumbre expandida del termómetro ingresando los datos necesarios

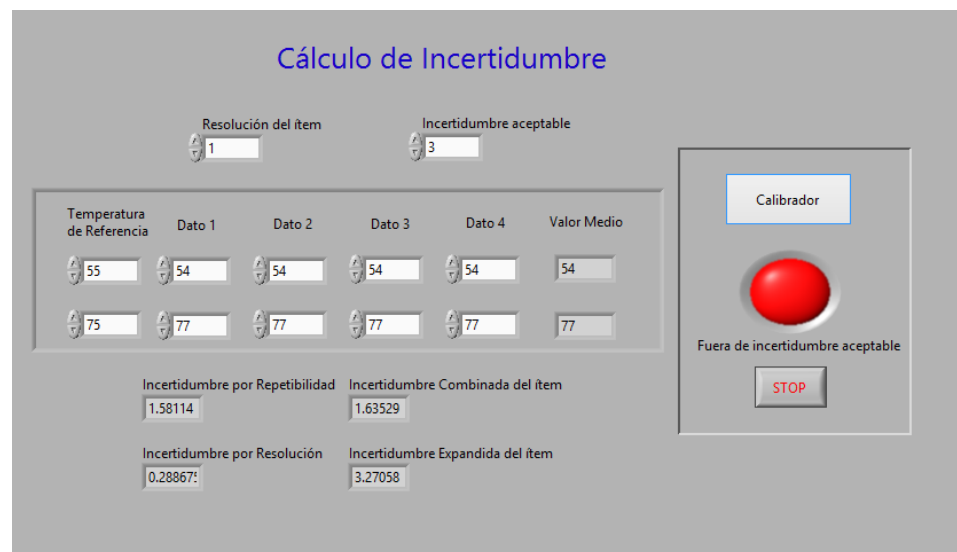


Figura 5.4 Calculadora de Incertidumbre en Labview

Ingresando las temperaturas del calibrador y del termómetro que se desea calibrar podemos obtener la incertidumbre del termómetro. En el VI también podemos observar un indicador que se encuentra en color rojo, esto se debe a que la incertidumbre expandida está fuera de la incertidumbre aceptable para el termómetro que se ha calibrado.

## CONCLUSIONES

- 1) Cada vez el manejo de los procesos industriales requiere mayor inclusión de sensores de mejor exactitud y de transmisores de avanzada tecnología. Cada uno de estos equipos, tiene como objetivo indicar el valor más aproximado que existe en el proceso. Es por ello, que la calibración toma un papel trascendental, debido a que el usuario o fabricante necesita de una medición con una desviación conocida en cada uno de sus procesos para así poder mejorar en la seguridad, calidad del producto y mejora continua de la planta.
- 2) Cuando se realizó la elección de los instrumentos a utilizar, se buscó equipos que satisfagan la exactitud requerida para nuestro calibrador de temperatura. Un calibrador necesita de los elementos con una buena exactitud ya que se requiere que en el cálculo de su incertidumbre se logre obtener la mejor posible.
- 3) A través de la fabricación del calibrador de temperatura se pudo obtener un modelo matemático en donde se refleja el comportamiento del calibrador ante las distintas perturbaciones existentes al momento de estabilizarse en el punto de temperatura deseado. Esto ha sido un medio de aprendizaje y de profundización acerca del control de un

proceso.

- 4) El manejo de un software para la obtención del modelo matemático es necesario, ya que de esa manera podemos realizar nuestro controlador PID de una manera más rápida
- 5) La homogenización del calibrador de temperatura se obtuvo gracias a la rejilla y al agitador utilizados. Es necesario eliminar cualquier ingreso del aire al líquido que genera una variación de temperatura no deseada.
- 6) Uno de los inconvenientes de nuestro proyecto fue la necesidad de un tiempo de calentamiento del sistema previo a la estabilización de la temperatura. Lo cual ocasiona un tiempo total alrededor de los 50 minutos para obtención de la temperatura deseada.
- 7) El cálculo de la incertidumbre del calibrador y del termómetro bimetálico, nos permite observar los diversos factores que afectan en la medición de cada equipo. Por lo cual si queremos obtener una mejor incertidumbre se podrían realizar variables de estos factores para lograrla. La incertidumbre del termómetro bimetálico fue de  $3.2705^{\circ}\text{C}$ , la cual se encuentra fuera de los  $3^{\circ}\text{C}$  que debería tener, por

lo tanto el termómetro requiere de un ajuste para obtener una incertidumbre aceptable.

## RECOMENDACIONES

- 1) En este proyecto se habló acerca del estudio de la metrología en el marco de la temperatura, pero la metrología engloba más magnitudes de la instrumentación como son: la presión, flujo, dimensión, nivel, señales eléctricas, tiempo, etc. Se recomienda ahondar en estos otros campos ya que cada magnitud tiene factores diversos que pueden afectar en el cálculo de incertidumbres.
- 2) El comportamiento de nuestro sistema puede variar dependiendo de la temperatura que se desea generar. Esto ocurre por la transferencia de calor del líquido con la resistencia, y del líquido con el ambiente. Es por esto que nuestro controlador no puede realizar una estabilización adecuada en temperaturas iguales o mayores a 80°C.
- 3) Para tener una homogenización adecuada se deben realizar variables físicas en el equipo. Ya que la agitación del líquido puede generar remolinos que permitan el ingreso del aire y generar una variación de la temperatura no deseada. Para impedir ese efecto, el calibrador cuenta con una canasta que impide la formación del remolino. Pueden existir otras maneras que se podrían considerar.

- 4) Debido a que el tiempo de estabilización fue demasiado alto, y de que una de las posibles causas haya sido el diseño del calibrador, se recomienda diseñar nuevamente el equipo para que el sistema de enfriamiento sea más eficaz al momento de bajar la temperatura, y así obtener un mejor control.
  
- 5) El líquido que utilizamos es silicona de 50 cSt, es un tipo de aceite con una viscosidad mayor a la del agua. La cual nos permite llegar a los 100°C, y no perder líquido por evaporación. Si se desea realizar un calibrador a mayores temperaturas, hay que tener muy en cuenta el tipo de silicona se va a utilizar. Ya que entre mayor es la viscosidad, mayor es la resistencia a la temperatura.

## ANEXOS

### ANEXO A

#### a. Comercio [12]

La metrología afecta al comercio en todas sus vertientes, desde el minorista hasta el mayorista, desde el comercio nacional hasta el comercio internacional. Los intereses varios entre comprador y vendedor justifican la regulación, la unificación de las unidades de medida y la exactitud de las mismas.

La metrología debe proteger los intereses de todos aquellos que participen en una transacción comercial basada en medidas. En la mayoría de los países se comercializan productos, cuyo valor puede oscilar entre 60% y el 80% del PIB, sobre los que, en el camino que va desde el productor al consumidor, se realizan repetidas medidas con instrumentos y aquí la metrología juega un papel relevante ayudando a evitar conflictos de intereses entre las partes de una transacción, reduciendo los costes de litigios que ello conlleva. Una buena aplicación de la metrología favorece el principio de competitividad y fomenta la ética entre las transacciones. En



este aspecto es de especial relevancia la cobertura que aportan los acuerdos de reconocimiento mutuo, tanto a nivel de los Institutos Nacionales de Metrología (INM) como de los laboratorios de ensayo y calibración que contribuyan a eliminar posibles barreras técnicas.

**b. Salud [12]**

Las medidas en el campo de la salud son un instrumento básico para la calidad de vida, incluso para la vida o muerte de los ciudadanos. ¿Cuántos miles de pacientes con cáncer han sido tratados con éxito cada año por medio de una radioterapia “metrológicamente exacta? ¿Cuántas vidas se han perdido innecesariamente debido a que instrumentos no calibrados utilizados en radioterapia emitieron demasiada o insuficiente radiación?

En un estudio realizado por la Clínica Mayo (EEUU), se indica que sobre una población de 20000 pacientes unos resultados de medida de colesterol con error del 3% produciría un porcentaje del 5% de falsos casos positivos que supondrían la repetición de ensayos o intervención médica innecesarias con el coste económico que ello conlleva. También se indica que

este porcentaje podría llevar a casos más críticos para la salud de pacientes que necesitando tratamiento, debido a resultados de falsos positivos, no se le diagnostique adecuadamente.

En este campo los profesionales de la salud utilizan los instrumentos de medida como una herramienta, pero no son expertos en los mismos, por lo que la metrología debe garantizarles que las medidas que se obtengan con ellos sean fiables y exactas, dado que no disponen ni de medios ni de conocimientos para contrastarlas. La incidencia que se puede derivar de una medida inexacta como por ejemplo en una radiación terapéutica puede llegar a ser fatal para un paciente.

**c. Defensa y Seguridad [12]**

La metrología ha sido un elemento clave en la defensa desde tiempos remotos y más recientemente en el campo de la seguridad como lo se refleja en las acciones de la Comisión Europea orientadas a impulsar dicho sector.

Las tecnologías de aplicación a la defensa son amplísimas y en su inmensa mayoría punteras. Siempre se han transferido a una enorme diversidad de campos de aplicación civil y en los

últimos años de una forma muy intensa al campo de la seguridad. El desarrollo técnico incrementa continuamente las posibilidades de defender los intereses nacionales y a la vez controlar la seguridad humana mediante medidas exactas, contribuyendo a la protección de la salud y la vida de las personas, así como a evitar, en todo lo posible, gastos innecesarios.

La metrología actúa en el aspecto de la seguridad en varios sectores para proteger a la sociedad. Uno de ellos y de especial relevancia en los países industrializados es en la circulación de los vehículos automóviles. Las medidas efectuadas con instrumentos de medida de seguridad vial como manómetros para el inflado de los neumáticos, alineadores al paso, etc. Son de suma importancia para nuestra seguridad en las carreteras.

A su vez aquellos instrumentos utilizados por las autoridades públicas para controlar velocidad (cinemómetros), alcohol (etilómetros), etc. Necesitan que proporcionen medidas fiables y exactas, con objeto de que se respeten los derechos de los

ciudadanos y se puedan cuantificar las posibles sanciones de una forma justa.

**d. Desarrollo industrial [12]**

La metrología protege a la industria de medidas incorrectas y promueve la calidad, el desarrollo de los productos y la industria, ayuda a la competitividad en los mercados.

Las propiedades de los componentes y de los productos terminados se consiguen con equipos de medición que se emplean cada vez más para controlar, regular, automatizar y supervisar procesos. Las tolerancias de fabricación y la operatividad funcional de los productos se verifican con la medición. En la actualidad, las mediciones son un componente importante del aseguramiento de la calidad. Con la metrología se brinda una calibración de instrumentos de medida, patrones y materiales de referencia, formación y asesoramiento, que permiten realizar medidas fiables, desarrollar nuevos productos y por lo tanto contribuir a la calidad de los productos, la eficiencia de los procesos y la competitividad de las empresas.

**e. Diálisis [12]**

La investigación en la medición de la conductividad electrolítica tiene un impacto directo sobre la calidad de vida de los pacientes de diálisis. La calidad de vida de los pacientes que necesitan de la diálisis se ve afectada por sus tratamientos, suele tener una duración de cuatro a cinco horas, dos o tres veces por semana, y sin los cuales podrían morir. Un tratamiento que afecta la vida del paciente, por lo cual es importante conseguir que el tratamiento sea lo más efectivo posible.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] CEM, Centro Español de Metrología. (Fecha de consulta: 10 de marzo de 2013) Disponible en: [http://www.cem.es/preguntas\\_frecuentes/%C2%BFque-es-la-metrolog%C3%ADa](http://www.cem.es/preguntas_frecuentes/%C2%BFque-es-la-metrolog%C3%ADa)
- [2] Real Academia de la Lengua Española. (Fecha de consulta: marzo de 2013) Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?d=drae&val=metrologia&x=-1189&y=-291>
- [3] EURAMET, CEM, CENAM, INDECOPI. "Metrología-Abreviada", traducción de "Metrology - in short" 3ª edición. 2ª Edición en español. 2008
- [4] CEM, Centro Español de Metrología. " Procedimiento TH-001 para la calibración de termómetros digitales". Madrid. 2003
- [5] Centro Español de Metrología. (Fecha de consulta: enero de 2013) Disponible en: [http://www2.cem.es:8081/cem/es\\_ES/FAQ/faq.jsp](http://www2.cem.es:8081/cem/es_ES/FAQ/faq.jsp)
- [6] Moro Piñeiro, M. "*METROLOGIA: Introducción, Conceptos e instrumentos*". Universidad de Oviedo. Oviedo. 2000
- [7] Revista YOTTA, Septiembre - Octubre de 2010. "¿Cual es la diferencia entre calibración, verificación y ajuste?". (Fecha de consulta: enero de 2013) Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/160819257/3era-Edicion-Yotta-Septiembre-Octubre>

- [8] Marbán Rocío M. & Pellecer C. Julio A. "*Metrología para no-metrólogos*". SIM (Sistema Interamericano de Metrología) 2<sup>da</sup> Edición. 2002
- [9] Quiminet. "Cómo calibrar en temperatura (Primera Parte)". 10 de junio de 2005. (Fecha de consulta: febrero de 2013) Disponible en: <http://www.quiminet.com/articulos/bloques-secos-y-banos-liquidados-2671217.htm>
- [10] INEN. (Fecha de consulta: febrero de 2013) Disponible en: [http://www.inen.gob.ec/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=58&Itemid=142](http://www.inen.gob.ec/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=58&Itemid=142)
- [11] CMEE. (Fecha de consulta: Junio de 2013) Disponible en: <http://cmee.mil.ec/>
- [12] CEM, Centro Español de Metrología. "La metrología científica en España y en su entorno europeo". Madrid. 2007
- [13] Grupo de Trabajo 2 del Comité Conjunto de Guías en Metrología (JCGM /WG 2), BIPM. "Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)". Traducción al español de la 3<sup>a</sup> edición del VIM. INDECOPI. 2008
- [14] Villena L. *Sistema Internacional de Unidades (S. I.)*. Revista Española de Física. V-1, nº 2, 1987, pp. 52-56.
- [15] Watlow. "*Temperature Sensor, Educational Series Book Four*". (Fecha de consulta: febrero de 2013) Disponible en: [http://www.metalesindustriales.com/media/File/watlow\\_sensores.pdf](http://www.metalesindustriales.com/media/File/watlow_sensores.pdf)

- [16] Jofra. (Fecha de consulta: marzo de 2013) Disponible en: <http://www.ametekcalibration.com/>
- [17] Wadehati. (Fecha de consulta: marzo de 2013) Disponible en: <http://www.wadehati.com/>
- [18] Interempresas. (Fecha de consulta: Junio de 2013) Disponible en: <http://www.interempresas.net/Quimica/FeriaVirtual/Producto-Controladores-de-temperatura-PID-14700.html>
- [19] OMRON. "Guía Rápida, Relés de estado sólido SSRs". (Fecha de consulta: abril de 2013) Disponible en: <http://www.reitec.es/V2/Pdf/documentacion6.pdf>
- [20] Xiamen Hongfa Electroacoustic Co., Ltd. Datasheet: "*HFS15 SOLID STATE RELAY*".
- [21] Benchmark *Scientific*. "Benchmark Hotplates, Stirrers and Hotplate Stirrers". (Fecha de consulta: abril de 2013) Disponible en: [http://www.benchmarkscientific.com/index\\_files/BenchmarkHotplatesStirrersandHotplateStirrers.htm](http://www.benchmarkscientific.com/index_files/BenchmarkHotplatesStirrersandHotplateStirrers.htm)
- [22] NFPA. "National Electrical Code". Quincy. 2008
- [23] MTI SENSORS. (Fecha de consulta: mayo de 2013) Disponible en: <http://www.mtisensors.com/>
- [24] Ruvalbaca Becerra Carlos Mario. "Instrumentación Industrial". Universidad de Guadalajara. (Fecha de consulta: mayo de 2013) Disponible en: <http://proton.ucting.udg.mx/~cruval/apunintro.pdf>



- [25] Isotech. (Fecha de consulta: junio de 2013) Disponible en: [http://www.isotechna.com/Orion\\_Calibraton\\_Baths\\_p/orion-796.htm](http://www.isotechna.com/Orion_Calibraton_Baths_p/orion-796.htm)
- [26] Sika. (Fecha de consulta: junio de 2013) Disponible en: <http://www.sika.net/en/>
- [27] Fisicanet. (Fecha de consulta: agosto de 2013) Disponible en: [http://www.fisicanet.com.ar/energias/alternativas/en05\\_propagacion\\_d\\_el\\_calor.php](http://www.fisicanet.com.ar/energias/alternativas/en05_propagacion_d_el_calor.php)
- [28] National Instruments. (Fecha de consulta: octubre de 2013) Disponible en: <http://latam.ni.com/>
- [29] Iván Darío Estrada Viana, J. A. "Estimación de modelos lineales para el control predictivo de pequeñas centrales hidroeléctricas". *Soluciones de Postgrado EIA* , pag. 63-78. 2012
- [30] Martínez Bueno A. "Identificación experimental de sistemas". Universidad de Alicante. 2011
- [31] Mazzone Virginia. "Controladores PID". *Apuntes* . Quilmes. 2002
- [32] Harriott, McCabe-Julian C. Smith-Peter. "*Operaciones unitarias en Ingeniería Química*". 4<sup>ta</sup> edición. 1991
- [33] EURAMET (European Association of National Metrology Institutes). "*Calibration of Temperature Block Calibrators*". 2011
- [34] SERLAM. "Procedimiento Operativo CALIBRACION DE BLOQUE SECO DE TEMPERATURA". Guayaquil. 2013

- [35] MONTBRUN DI FILIPPO, Jenny. Departamento de Procesos y Sistemas. (Fecha de consulta: mayo de 2013) Disponible en: <http://prof.usb.ve/montbrun/>
- [36] Santamaría Germán & Castejón Agustín. "Electrotecnia: Electricidad y Electrónica". Editex. 2009
- [37] Real Academia de la Lengua Española. (Fecha de consulta: marzo de 2013) Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?val=calor>
- [38] SERLAM. "Procedimiento Operativo CALIBRACION DE TERMÓMETROS ANÁLOGOS Y DIGITALES". Guayaquil. 2013
- [39] Omega. (Fecha de consulta: junio de 2013) Disponible en: <http://es.omega.com/prodinfo/controladores-de-temperatura.html>
- [40] Quiminet. "¿Qué son los indicadores para calibración en temperatura?". (Fecha de consulta: marzo de 2013) Disponible en: <http://www.quiminet.com/articulos/que-son-los-indicadores-para-calibracion-en-temperatura-776.htm>
- [41] IXYS. (Fecha de consulta: junio de 2013) Disponible en: [http://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/AN-145ES.pdf/\\$file/AN-145ES.pdf](http://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/AN-145ES.pdf/$file/AN-145ES.pdf)
- [42] Fernández Ramírez José Antonio. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI). Madrid. 2012. (Fecha de consulta: agosto 2013) Disponible en: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4fbd1db995748.pdf>

- [43] Real Academia de la Lengua Española. (Fecha de consulta: mayo de 2013). *Disponible en:* <http://lema.rae.es/drae/?val=homogenizar>
- [44] Universidad Politécnica de Madrid. "Conceptos fundamentales de Termodinámica Química". (Fecha de consulta: septiembre 2013) *Disponible en:* <http://ocw.upm.es/explotacion-de-minas/termodinamica-quimica-i/contenidos/General/>