



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



TESIS

**METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA
BASADO EN LA NORMA ASTM E-220**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:
GIULIANI EMMANUEL CRUZ PASCUAL

BAJO LA DIRECCIÓN DE:
DR. EDGAR VICENTE MACIAS MELO

CO-DIRECCIÓN DE:
DR. IVÁN ALEJANDRO HERNÁNDEZ PÉREZ

CUNDUACÁN, TABASCO, MÉXICO

JINIO 2025

Declaración de Autoría y Originalidad

En la ciudad de Cunduacán, el 02 de junio del 2025, el que suscribe **GIULIANI EMMANUEL CRUZ PASCUAL** alumno del Programa de Ingeniería Mecánica Eléctrica con número de matrícula 192D23181, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesina presentada para la obtención del título y titulada **METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA BASADO EN LA NORMA ASTM E-220**.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la **LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR** (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente

Villahermosa, Tabasco a 02 de junio de 2025



Nombre y firma

GIULIANI EMMANUEL CRUZ PASCUAL

METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA BASADO EN LA NORMA ASTM E-220

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Internet	158 palabras — 1%
2	www.coursehero.com Internet	100 palabras — 1%
3	instrumentacionbustos.blogspot.com Internet	81 palabras — 1%
4	Rodriguez, Celia Rodriguez. "Represion Catabolica Por Nitrogeno Y Homeostasis Cationica en la Levadura Hansenula Polymorpha: Papel De Ure2 Y De La Calcineurina", Universidad de La Laguna (Canary Islands, Spain), 2022 ProQuest	60 palabras — < 1%
5	docplayer.es Internet	44 palabras — < 1%
6	sedici.unlp.edu.ar Internet	42 palabras — < 1%
7	pdfcookie.com Internet	34 palabras — < 1%
8	bdigital.unal.edu.co Internet	28 palabras — < 1%



COORDINACIÓN
DE ESTUDIOS
TERMINALES



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/CD/0720/2025
FECHA: 30 de mayo de 2025.
ASUNTO: Autorización de Impresión Definitiva.

C. GIULIANI EMMANUEL CRUZ PASCUAL

PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
P R E S E N T E.

En virtud de haber elaborado el trabajo recepcional para obtener el Título de Licenciatura en INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, bajo la modalidad de "Tesis", el cual ha sido dirigido por el DR. EDGAR VICENTE MACÍAS MELO y el DR. IVAN ALEJANDRO HERNÁNDEZ PÉREZ, titulado:

"METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA BASADO EN LA NORMA ASTM E-220".

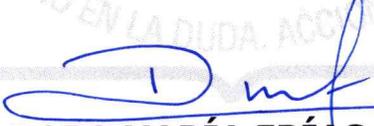
Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen profesional.

Asimismo, le informo que en el artículo 113, del Capítulo IV, de nuestro Reglamento de Titulación vigente, a la letra dice:

"Una vez emitido el oficio de autorización de impresión del Trabajo Recepcional por la Dirección de la División Académica correspondiente, el egresado tendrá un plazo máximo de seis meses para efectos de presentar el Examen Profesional. En caso contrario, podrá optar por la misma u otra modalidad que señale el presente Reglamento, llevando a cabo los trámites correspondientes".

Sin otro particular por el momento, me despido deseándole éxito en su carrera profesional.

ATENTAMENTE


DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA



DIRECCIÓN

C.c.p. Archivo-INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA-380
DRA' DMFM/M' LHC

Miembro CUMEX desde 2008
Consortio de
Universidades
Mexicanas
UNA ALIANZA DE CALIDAD PARA LA EDUCACIÓN SUPERIOR

Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, km. 1, Col. La Esmeralda
C.P.86690 Cunduacán, Tabasco
Tel. (993) 358.15.00 Ext. 6752
direccion.daia@ujat.mx

www.ujat.mx



DIRECCIÓN

MEMORANDO

PARA: DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA DE LA DAIA.

DE: COMISIÓN REVISORA DE TRABAJO RECEPCIONAL

FECHA: 29 DE MAYO DE 2025

ASUNTO: ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEFINITIVA DE TRABAJO RECEPCIONAL

CCP: ARCHIVO.

MEM/CET/380/ID380/2025

PRESENTE.

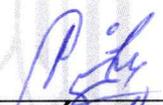
En cumplimiento a lo estipulado en el Art. 112 del Reglamento de Titulación aplicable, y después de revisar el Trabajo Recepcional denominado:

**"METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA
BASADO EN LA NORMA ASTM E-220"**

Desarrollado por el C. GIULIANI EMMANUEL CRUZ PASCUAL de la Licenciatura en INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA bajo la modalidad de "Tesis", le comunicamos que aceptamos la impresión final de dicho trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN REVISORA


**DR. CANDELARIO BOLAINA
TORRES**
Revisor


DR. CARLOS LAZARO NARANJO
Revisor


**DRA. KARLA MARÍA AGUILAR
CASTRO**
Revisor


M.A. ISA YADIRA PÉREZ OLÁN
Revisor


**DR. CARLOS ENRIQUE TORRES
AGUILAR**
Revisor


DR. EDGAR VICENTE MACÍAS MELO
Director de Trabajo Recepcional


DR. IVAN ALEJANDRO HERNÁNDEZ PÉREZ
Co-Director de Trabajo Recepcional

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 02 de junio de 2025.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR en la producción, creación y/o realización de la obra denominada: **METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA BASADO EN LA NORMA ASTM E-220.**

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES


NOMBRE Y FIRMA DEL ESTUDIANTE
**GIULIANI EMMANUEL CRUZ
PASCUAL**


NOMBRE Y FIRMA DEL DIRECTOR DE
DR. EDGAR VICENTE MACIAS MELO

AGRADECIMIENTOS

Dios, te doy gracias por haberme fortalecido en los momentos de desaliento, por sostenerme cuando flaqueaban mis fuerzas, por ayudarme a cumplir mis metas y por bendecirme en cada uno de los proyectos que he emprendido.

Con profundo agradecimiento, expreso mi gratitud a mi alma máter, la **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**, y en particular a la **División Académica de Ingeniería y Arquitectura**, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente.

Mi reconocimiento va dirigido a todos los profesores que contribuyeron a mi crecimiento académico y profesional. De manera especial, agradezco a la **Dra. Karla María Aguilar Castro** por permitirme trabajar a su lado, por abrirme múltiples puertas en el ámbito profesional, por sus valiosos consejos, su guía constante y por ser un modelo a seguir. Al **Dr. Edgar Vicente Macías Melo**, por creer en mí desde el inicio, por impulsar mi participación en este proyecto, y por su orientación tanto académica como personal. Al **Dr. Carlos Enrique Torres Aguilar**, por sus enseñanzas, consejos y por su invaluable acompañamiento durante este proceso.

También expreso mi sincero agradecimiento al **Taller de Soldadura y Forja** y al **Taller de Máquinas-Herramientas**, por acogerme como parte de su familia, brindarme su apoyo y acompañarme en esta etapa formativa.

A mis padres, **Francisca Pascual Peralta** y **Hernán Cruz Torres**, gracias por creer siempre en mí, incluso cuando yo no lo hacía, y por darme la oportunidad de superarme en la vida. Su esfuerzo, amor y apoyo han sido fundamentales para poder desarrollar este trabajo. A mi hermana, **Rosen Itzel Cruz Pascual**, gracias por ser una fuente constante de ánimo y por inspirarme a ser un ejemplo digno para ella.

Finalmente, agradezco de corazón a mis familiares, amigos y a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron en este camino. Gracias por su confianza en mis capacidades, por su apoyo incondicional y por impulsarme siempre a cumplir mis metas y sueños.

¡Muchas gracias!

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis con todo mi amor y gratitud a mi madre, **Francisca Pascual Peralta**, por su incansable sacrificio día tras día, por brindarme la oportunidad de forjarme una carrera y aspirar a un futuro mejor. Gracias por confiar en mis capacidades y por ofrecerme siempre tus palabras más sabias y reconfortantes en los momentos en que más las necesitaba.

A mi padre, **Hernán Cruz Torres**, por salir a trabajar cada día con el único propósito de respaldar mis sueños y metas. Gracias por celebrar cada uno de mis logros como si fueran propios, por desear siempre lo mejor para mi vida, y por enseñarme a nunca rendirme, incluso en los momentos de mayor frustración. Tu fortaleza ha sido mi inspiración.

A mi hermana, **Rotsen Itzel Cruz Pascual**, gracias por recordarme que nunca debo conformarme, por animarme a aspirar a más y por ser ejemplo vivo de resiliencia.

A mi abuela, **Sofía Torres Magalla**, por creer firmemente en mí y por sus palabras de aliento en cada paso de este camino.

Y, por encima de todo, a **Dios**, por permitirme culminar esta etapa con éxito y excelencia, y por derramar salud y bendiciones sobre mi familia, sosteniéndonos siempre con su amor infinito.

¡Gracias de todo corazón!

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar una metodología de calibración de sensores de temperatura, basada en la norma ASTM E220-19, con el propósito de reducir la incertidumbre de medición en aplicaciones energéticas dentro de edificaciones. Para ello, se implementó un sistema experimental que incluyó un baño térmico recirculante y un baño de hielo, utilizados como puntos de referencia para establecer condiciones controladas durante los ensayos de calibración. La metodología permitió evaluar el comportamiento térmico de distintos sensores, incluyendo PT1000, PT100, termistores de 2 k Ω , 20 k Ω , 100 k Ω y termopares tipo T y K. Las mediciones se realizaron en cuatro intervalos de temperatura (0 °C, 10 °C, 50 °C y 90 °C), repetidas en ciclos mensuales durante un periodo de tres meses. Los resultados mostraron que los sensores PT1000 y PT100 exhibieron buen desempeño en términos de precisión y estabilidad, aunque presentaron cierta deriva con el paso del tiempo. Los termopares tipo T y K registraron los errores medios cuadráticos más bajos y la menor deriva, posicionándose como los más confiables para aplicaciones de largo plazo. En contraste, los termistores de alta resistencia (20 k Ω y 100 k Ω) presentaron un comportamiento inestable, con el termistor de 100 k Ω mostrando una pérdida crítica de confiabilidad a partir del segundo mes. Estos resultados resaltan la importancia de establecer ciclos periódicos de recalibración, incluso en sensores de alta precisión, para asegurar la fiabilidad continua de las mediciones térmicas. En conclusión, la metodología propuesta demostró ser efectiva para incrementar la exactitud y confiabilidad de diferentes tipos de sensores de temperatura. Este enfoque puede ser implementado como una herramienta estandarizada para reducir la incertidumbre de medición en aplicaciones de estudios energéticos en viviendas, así como, en aplicaciones industriales, científicas y de monitoreo ambiental. Se recomienda su implementación con ciclos regulares de recalibración y la exploración futura de su desempeño bajo otros intervalos de temperatura y considerar su automatización vía remota.

Índice

	Pág.
Lista de Figuras	VI
Lista de Tablas	VII
CAPÍTULO I. Introducción	
1.1 Generalidades.....	2
1.2 Antecedentes.....	3
1.2.1 Método de calibración	4
1.2.2 Aplicación de los métodos de calibración.....	7
1.3 Objetivo general.....	13
1.3.1 Objetivos específicos	13
1.4 Hipótesis	13
1.5 Estructura de la tesis.....	14
CAPÍTULO II. Fundamento Teórico	
2.1 Sensores	16
2.2 Calibración	20
2.3 Norma y ecuaciones para la calibración	22
2.4 Punto doble del agua	25
CAPÍTULO III. Materiales y Método	
3.1 Muestras	27
3.2 Sistema experimental	28
3.3 Diseño experimental.....	29
3.4 Procedimiento Experimental.....	30

CAPÍTULO IV. Resultados y Discusión	
4.1 Comportamiento de la temperatura.....	35
4.2 Diferencia de temperatura (ΔT).....	37
4.3 Deriva en el tiempo de la temperatura	43
CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Lista de Figuras

Figura	Descripción	Pág.
1.1	Clasificación de la revisión bibliográfica.	4
3.1	Sistema experimental de calibración.	28
3.2	Sistema experimental de calibración con baño de hielo. Fuente	29
3.3	Diagrama de flujo de configuraciones para las pruebas experimentales.	32
3.4	Diagrama de flujo de configuraciones para las pruebas experimentales.	33
4.1	Comportamiento de la temperatura del PT1000 calibrado a diferentes valores de temperatura.	36
4.2	Comportamiento de la temperatura del PT1000 calibrado a diferentes valores de temperatura. a) PT100, b) Termistor de 2 k Ω , c) Termistor de 20 k Ω , d) Termistor de 100 k Ω , e) Termopar tipo T, f) Termopar tipo K	37
4.3	Diferencia de temperatura (ΔT) en el PT1000.	38
4.4	Diferencia de temperatura (ΔT) en el PT100.	39
4.5	Diferencia de temperatura (ΔT) para el termistor de 2k Ω .	39
4.6	Diferencia de temperatura (ΔT) para el termistor de 20 K Ω .	40
4.7	Diferencia de temperatura (ΔT) para el termistor de 100k Ω .	40
4.8	Diferencia de temperatura (ΔT) en el Termopar Tipo T.	41
4.9	Diferencia de temperatura (ΔT) del Termopar Tipo K.	42

Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Pág.
2.1	Clasificación general de los tipos de sensores de temperatura	16
3.1	Muestras de sensores para calibración.	27
3.2	Pruebas experimentales ascendentes	30
4.1	Concentrado de las diferencias de temperatura de los sensores calibrados.	42
4.2	Resultados de la calibración para termistores de los PT 1000, PT100y los termistores 2, 20 y 100 k Ω .	44
4.3	Resultados de la calibración del Termopar tipo T.	45
4.4	Resultados de la calibración del Termopar tipo K	46

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presentan los antecedentes y la revisión bibliográfica del marco referencial de los métodos de calibración y las aplicaciones de estos métodos, así como los objetivos e hipótesis del trabajo. Lo anterior, con el fin de desarrollar una metodología para la calibración de sensores mediante el desarrollo de un sistema experimental basado en la Norma ASTM E220-19 para disminuir la incertidumbre de medición de diferentes sensores.

1.1 Generalidades

La calibración de sensores de temperatura es crucial en diversos campos de aplicación, como la industria alimentaria, farmacéutica, automotriz, entre otros, donde es común utilizar múltiples sensores de temperatura para monitorear y controlar procesos críticos. Sin embargo, la falta de estandarización en la medición de temperatura puede resultar en mediciones inconsistentes y poco confiables, también es importante tener en cuenta que la precisión y fiabilidad de los sensores de temperatura pueden variar dependiendo de factores como la marca, el modelo y las condiciones de operación. Por lo tanto, es fundamental realizar una adecuada calibración y verificación para asegurar la exactitud de los resultados obtenidos mediante la colaboración de estos sensores.

La norma ASTM E220-19 establece las guías para la utilización de termopares y termómetros de resistencia en la medición de temperatura, con el objetivo de asegurar la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos. A pesar de esto, es necesario investigar cómo la calibración de diferentes sensores de temperatura puede mejorar la precisión de las mediciones y minimizar los errores asociados. Esta normativa emplea una calibración fundamentada en comparar las señales del termopar con las de un termómetro de referencia a la misma temperatura. El termómetro de referencia puede ser un termopar diferente, un termómetro de líquido en vidrio o un termómetro de resistencia de platino, en función de la temperatura, el nivel de exactitud necesario u otros factores (ASTM, 2017).

Por lo tanto, surge la necesidad de desarrollar un conjunto de prácticas y procedimientos estandarizados para la medición y monitoreo preciso de la temperatura en diferentes entornos y aplicaciones. Por lo que, una metodología de calibración efectiva de sensores de temperatura, basado en la norma ASTM E220-19 podría contribuir a satisfacer dicha necesidad. Esta metodología deberá establecer los procedimientos para la calibración entre sensores, la sincronización de datos, la resolución de conflictos y la calibración conjunta para garantizar la precisión y la fiabilidad de las mediciones. También, contribuiría a mejorar la

eficiencia de los procesos industriales, reducir los costos de mantenimiento y optimizar la toma de decisiones basada en datos de temperatura más precisos y confiables, con la calibración de sensores de temperatura con la metodología e identificar posibles limitaciones, desafíos y áreas de mejora.

Es importante la correcta calibración de sensores de temperatura, como los termopares termistores y PT entre otros debido a su importancia en el monitoreo de variables en múltiples procesos. Por lo tanto, la metodología de calibración podrá aportar con el proceso estandarizado para minimizar la incertidumbre en las mediciones, por lo tanto, permitiría tener mejor mediciones valores más confiables y precisos. También, la calibración permite disminuir el errores sistemáticos y aleatorios de los sensores de temperatura, así mismos permitiría que las mediciones sean más precisas y confiables. Por lo mencionado con anterioridad la calibración de sensores de temperatura permitiría tomar decisiones operativas de control de procesos y mantenimiento de forma más confiables. Así mismo, se contribuiría en la detección y solución de problemas para reducir incertidumbre, lo cual, facilitaría la identificación de cambios o desviaciones en las mediciones. Finalmente, podría optimizarse el uso de los recursos, como materias primas, energía o tiempo, al tomar decisiones basadas en datos confiables (Purtscher's, 2016).

1.2 Antecedentes

En la Figura 1.1 se presenta una clasificación de la revisión bibliográfica realizada considerando artículos científicos relacionados con la temática. Como se puede observar se clasifico en dos temas, Métodos de Calibración y Aplicación de los Métodos de calibración. En las siguientes secciones, se presentarán algunos trabajos y artículos científicos en lo que se han desarrollado metodologías para la calibración de sensores de temperatura basado en la norma ASTM E220-19.



Figura 1.1 Clasificación de la revisión bibliográfica.

1.2.1 Métodos de calibración

Los métodos de calibración permiten ajustar y verificar la precisión de instrumentos de medición, garantizando que los equipos funcionen correctamente y proporcionando resultados confiables en procesos de control y monitoreo. A continuación, se presentan los principales estudios analizados respecto a esta temática.

Andrés et al., (2019) presenta un conjunto de lineamientos técnicos para la calibración de termómetros digitales con sensores de diferentes tipos (PRT, termistor y termopar), utilizando métodos de comparación en baños líquidos y hornos de bloque metálico. En el documento, desarrollado por el Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM) en colaboración con la Red Colombiana de Metrología (RCM) y el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), tiene como objetivo estandarizar las metodologías de calibración y asegurar la consistencia y trazabilidad de los resultados obtenidos por los laboratorios de calibración. El estudio presenta una guía detallada del proceso de calibración, incluyendo la secuencia de calibración, las condiciones ambientales requeridas y la evaluación de la incertidumbre de medición. También, se consideran las características específicas de los sensores utilizados, la preparación de los instrumentos bajo calibración (IBC) y las fuentes de incertidumbre asociadas con el proceso. Los autores concluyen que esta guía es fundamental para laboratorios y organismos que requieren calibraciones precisas y trazables de instrumentos de

medición de temperatura, siguiendo normativas internacionales y asegurando la calidad en las mediciones.

ASTM E220-19 (2019) describe el método estándar para la calibración de termopares utilizando técnicas de comparación. Este método se basa en comparar las indicaciones de un termopar con las de un termómetro de referencia en una serie de temperaturas, con el objetivo de determinar la relación fuerza electromotriz (FEM)/temperatura del termopar. El rango de temperaturas para la calibración abarca desde aproximadamente -180 hasta 1700°C . El procedimiento incluye el uso de baños líquidos agitados, bloques metálicos uniformemente calentados, hornos de tubo, y baños fluidizados, según el rango de temperatura específico. Además, se requiere el uso de instrumentos de medición de FEM, como potenciómetros de alta precisión, para garantizar que las mediciones sean precisas y no influenciadas por otras fuentes. Este método es aplicable tanto para termopares de alambre desnudo como para termopares con vaina protectora, aunque estos últimos pueden requerir cuidados especiales para controlar las pérdidas por conducción térmica. En el documento se hace énfasis en la necesidad de mantener el termopar y el termómetro de referencia a la misma temperatura dentro de los límites requeridos para asegurar la precisión de la calibración. El documento también proporciona directrices sobre el uso de termómetros de referencia, como termómetros de resistencia de platino, termómetros de líquido en vidrio y otros termopares de alta precisión. Además, incluye recomendaciones sobre la construcción y uso de baños de referencia para mantener las uniones de referencia a una temperatura constante, y sobre la instrumentación y el equipo de soporte necesario para realizar la calibración de manera efectiva. Este estándar es relevante para fabricantes y usuarios de termopares, ya que proporciona un medio para verificar la aceptabilidad de los materiales en su estado ensamblado y para cumplir con tolerancias de temperatura especificadas en aplicaciones comerciales, militares o de investigación.

Koestoer et al., (2019) proponen un método para la calibración de sensores de temperatura DS18B20 (sensor de temperatura digital) utilizando un baño de aceite y un sistema de adquisición de datos basado en Arduino. El propósito del estudio

fue reducir los errores de medición de estos sensores, que son utilizados por su facilidad de uso y bajo costo, pero que requieren calibración para aumentar su precisión. El proceso de calibración se llevó a cabo sumergiendo 12 sensores DS18B20 (sensor de temperatura digital) en un baño de aceite junto con un termómetro calibrador ASTM 117C, que sirve como referencia para las mediciones. La selección del aceite como medio de calibración se debe a su capacidad para mantener la estabilidad de la temperatura, lo que permite obtener mediciones más precisas. Antes de la calibración, los sensores DS18B20 (sensor de temperatura digital) mostraban un error promedio del 3%, tras aplicar el método propuesto, el error promedio se redujo al 0.85%, mejorando significativamente la precisión de los sensores. Este proceso de calibración es especialmente útil para sistemas de adquisición de datos de bajo costo, como el utilizado en incubadoras para bebés, donde la exactitud en la medición de la temperatura es crucial. Los autores concluyen que el método propuesto ofrece una forma eficaz y económica de calibrar sensores de temperatura DS18B20 (sensor de temperatura digital), mejorando su precisión y facilitando su aplicación en diversos sistemas de control y monitoreo.

En el trabajo de análisis de Goplani, (2017) nos redacta algunos sensores como sensor de temperatura KEYES KY-001, sensor de temperatura KEYES KY-013, sensor de temperatura KEYES KY-028, entre otros sensores, en el trabajo nos redacta especificaciones sus funcionamientos, sus métodos de calibración, sus esquemas eléctricos, principios fundamentales. El proyecto final cumple objetivos como analizar las características de los sensores, adaptar códigos Arduino, construir circuitos eléctricos y calibrar sensores.

Chapon et al., (2012) presentan un estudio sobre la calibración y evaluación de un prototipo de sensor de temperatura mediante un procedimiento de calibración de un solo punto. El estudio se llevó a cabo con el objetivo de determinar la precisión y la inercia temporal del prototipo, en el contexto del desarrollo de un sensor telemétrico de temperatura. Los autores evalúan la estabilidad del baño de calibración y luego determinaron la precisión de 16 prototipos a diversas temperaturas que oscilan entre 29 y 45°C. Como resultados, se observó que, aunque la mayoría de los prototipos

se mantuvieron dentro del rango de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, la precisión disminuye a medida que la temperatura del baño se aleja de los 37°C mostrando una subestimación de las temperaturas altas y una sobreestimación de las bajas. El estudio concluye que, aunque el procedimiento de calibración de un solo punto permite cumplir con los estándares normativos, no es óptimo, y se sugiere realizar una calibración de dos puntos para evitar la pendiente observada en los datos de temperatura. Además, la inercia temporal de los sensores se ajustó a las normas establecidas, con un tiempo máximo de respuesta de 150 segundos. Este resultado es fundamental para el desarrollo de sensores de temperatura telemétricos que puedan ser utilizados tanto en humanos como en animales, garantizando un alto nivel de precisión y fiabilidad.

Los artículos analizados en esta sección en general tienen como propósito reducir los errores en la medición de sensores de temperatura, donde se requiere un proceso de calibración para aumentar su precisión y reducir las incertidumbres de medición. En los procedimientos que reportan los autores, generalmente se utilizan baños líquidos agitados, bloques metálicos uniformemente calentados, hornos de tubo, y baños fluidizados, según el rango de temperatura específico. Los autores comentan que al realizar mediciones no siempre se proporcionan valores totalmente exactos, debido a que siempre están sujetas a imperfecciones que no se puede determinar con precisión. Como resultado de las mediciones, dependen de métodos de medición aplicada, de las condiciones ambientales como son la temperatura, humedad, y presión ambiental entre otros.

1.2.2 Aplicación de los métodos de calibración

Los métodos de calibración se aplican en diversas áreas como la medición de temperatura, presión, flujo y potencia en sistemas eléctricos y mecánicos. Son esenciales para garantizar que los equipos operen con precisión, evitando errores en los procesos de manufactura, mantenimiento y control de calidad, asegurando así la seguridad y eficiencia.

Martina et al., (2022), desarrollaron un estudio sobre la detección de no uniformidad de temperatura en chips dPCR (reacción en cadena de polimerasa digital) y

calibración de sensores de temperatura como un método innovador para medir la temperatura local. También, aborda el desafío de mantener una distribución de temperatura uniforme en microfluidos, esencial para la eficiencia del PCR (reacción en cadena de la polimerasa). Los autores describen un enfoque de medición de temperatura no constante utilizando imágenes fluorescentes de una solución de PCR que contiene fragmentos de ADN (ácido desoxirribonucleico) con una temperatura de fusión conocida. A medida que se calienta el chip, se capturan imágenes de fluorescencia en diferentes temperaturas, lo que permite calcular los valores de T_M (temperatura de fusión) en cada partición del chip. A pesar de que la T_M real fue constante, los valores medidos variaron debido a la no uniformidad térmica. En el estudio se destacó que el método propuesto no solo mide la temperatura en la superficie del chip, sino también dentro de las particiones superando las limitaciones de técnicas anteriores que sufren de foto degradación. Además, se utiliza para calibrar sensores de temperatura y mejorar la configuración del dPCR. Los resultados indicaron que la uniformidad de temperatura fue crucial para optimizar los ensayos dPCR y evitar resultados falsos negativos. Los autores concluyen que el método de medición de temperatura basado en la T_M puede aplicarse a otros sistemas microarray donde el acceso físico es complicado, ofreciendo una herramienta valiosa para la investigación en microfluidos y biotecnología.

Reski et al., (2020) abordan la importancia de medir la temperatura con precisión en diversos contextos. Los autores proponen un método de calibración para termopares tipo K y sensores MAX6675 utilizando un microprocesador Arduino y termistores DS18B20 como referencia. El objetivo principal fue mejorar la exactitud de los sensores que inicialmente mostraron errores de hasta un 4.9%, antes de la calibración. El estudio se centró en la calibración bajo condiciones ambientales utilizando agua y aire. Para esto, se implementaron métodos matemáticos sencillos en la programación del Arduino, como el promedio y el filtrado, logrando una reducción significativa de los errores a 0.42% en agua y 0.61% en aire. El proceso de calibración se basó en mantener un estado estacionario donde la temperatura permaneció constante, lo cual permite obtener valores precisos. Se demostró que,

tras aplicar los métodos propuestos, la precisión y exactitud de los sensores mejoró considerablemente, lo que habilita su uso confiable en la medición de temperaturas en distintos fluidos de trabajo.

Sawan Shadadpuri (2018) presenta un estudio que se centra en la evaluación de sensores económicos compatibles con la plataforma Arduino. El estudio aborda la caracterización y calibración de diversos tipos de sensores, incluyendo sensores de temperatura, humedad, luz, ultrasonido y campo magnético. En este estudio cada sensor es analizado de manera exhaustiva, detallando su principio de funcionamiento, especificaciones técnicas y los métodos de calibración aplicados. Los resultados experimentales que se presentan son derivados de las pruebas realizadas con cada dispositivo, los cuales son discutidos en términos de precisión y fiabilidad. Asimismo, el documento incluye un análisis de las herramientas y equipos utilizados en las evaluaciones, tales como Arduino, MATLAB y diversos instrumentos de medición. Los autores ofrecen reflexiones sobre la idoneidad de estos sensores para aplicaciones prácticas, así como, sugerencias para mejoras en futuras investigaciones, enfatizando la relevancia de estos dispositivos en el ámbito de la electrónica y la automatización.

Alava Zavala y Villao Alejandro (2017) señalan las dificultades con la calibración de los sensores de temperatura en su zona, resaltando los elevados gastos y la escasez de sitios especializados, preparados y exactos para este procedimiento. La investigación propone el desarrollo de un sistema de computación para calibrar termómetros que respeten las tolerancias fijadas por el Buró Internacional de Pesas y Medidas, considerando las regulaciones y recomendaciones internacionales relevantes. El autor menciona que los baños líquidos, frecuentemente empleados para calibraciones de gran exactitud, son uno de los métodos habituales de calibración. Estos operan de manera eficiente con termómetros de líquido de vidrio e incluso con geometrías más sofisticadas. Además, se refiere a la calibración absoluta, también conocida como calibración por puntos fijos, que utiliza la escala de temperatura internacional ITS-90. Este libro actúa como un referente global para definir procesos y termómetros que posibiliten a los laboratorios locales concretar y

establecer valores de alta repetibilidad. El escritor también hace referencia al calibrador de bloque seco, que se compone de un bloque de metal calentado mediante resistencias y regulado por un sistema de temperatura exacto ($\pm 2^\circ\text{C}$). Es apropiado para usos que demandan temperaturas elevadas (desde -25°C hasta 1200°C). La investigación se concentró en desarrollar un método de calibración más eficaz. Para conseguirlo, se desarrolló un procedimiento experimental que empleó una placa Peltier, pernos, Arduino y sus respectivos programas de programación. Para asegurar el correcto funcionamiento del experimento, el diseño también consideró las tolerancias y los cálculos de sus elementos.

Dado que la pérdida de calor está directamente relacionada con las diferencias de temperatura entre el fluido y el medio circundante, se descubrió que el comportamiento del sistema puede variar según la temperatura que se desea generar. Se evaluó la estabilidad del sistema y se determinó que funciona correctamente hasta 90°C .

Respecto a los estudios de calibración, Paseltiner et al., (2017) presentan un sistema innovador destinado a la monitorización continua de la temperatura en laboratorios de resistencia. Este sistema es capaz de soportar hasta 19 sondas de temperatura y opera en un rango de temperatura 295.15 a 299.15 K, su funcionamiento se basa en termistores de coeficiente de temperatura negativo (NTC), que permiten medir la temperatura a través de la resistencia. Se utilizan mediciones de voltaje en un circuito de cuatro terminales para calcular la resistencia de cada sonda, que luego se convierte en temperatura utilizando el modelo de Steinhart-Hart. Además, el sistema está diseñado para enviar alertas por correo electrónico en el caso de que, si alguna sonda registre temperaturas fuera de los límites preestablecidos, lo que proporciona un mecanismo eficaz para el monitoreo de condiciones críticas en el laboratorio. La infraestructura propuesta no solo permite la monitorización continua, sino que también incluye un sistema de registro de datos y la capacidad de calibrar las sondas de temperatura mediante un termómetro de referencia y un baño de aceite programable. El artículo destaca la importancia de mantener un control preciso de la temperatura, ya que variaciones incluso menores a 20 mK pueden afectar significativamente las mediciones de

resistencia. La implementación del sistema ha demostrado ser efectiva, identificando fallos en los controles climáticos del edificio y en los controladores de temperatura de los baños, lo que permite a los investigadores tomar medidas correctivas oportunas. Este sistema tiene aplicaciones potenciales en otros entornos de laboratorio e industriales donde se requiera monitoreo continuo de la temperatura y alarmas automatizadas en múltiples ubicaciones.

Chi Deng et al., (2015) muestra un sensor de temperatura inteligente construido utilizando el proceso CMOS (semiconductor complementario de óxido metálico) estándar de 0,18 μm de TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company). El sensor utiliza transistores de sustrato PNP (positivo, negativo, positivo) para extraer datos térmicos y utiliza un método de transistor y un método de eliminación de compensación para permitir técnicas como la coincidencia dinámica de elementos (DEM). Estas ideas abordan la importancia de los errores resultantes del proceso de disipación de la brecha del transistor. Después de una calibración puntual, el sensor tiene una capacidad de error de $\pm 0,1$ $^{\circ}\text{C}$ en el rango de temperatura de 20 a 50 $^{\circ}\text{C}$, ya que tiene un consumo de energía promedio de 16 μW a una velocidad de rotación de 10 Hz. Sobretensión de corriente, desajuste de tipos, tensión mecánica y disipación del proceso. Para cumplir con el error de 0,1 $^{\circ}\text{C}$ requerido para los termómetros clínicos, los autores proponen un procedimiento de calibración simple que garantiza la precisión. En términos de este modelo, el sensor se basa en un sensor de voltaje que proporciona una señal sensible a la temperatura combinada con un sensor sensible a la temperatura para producir un voltaje proporcional al calor y al frío. Al enfatizar la importancia de la calibración, se identifican las fuentes de error y se sugieren métodos para minimizarlas. Los resultados de la prueba muestran que después de una serie de pruebas, el dispositivo cumple con el estándar de medición de temperatura de $\pm 0,4$ $^{\circ}\text{C}$ en el rango de -40 $^{\circ}\text{C}$ a 120 $^{\circ}\text{C}$, y la repetibilidad está dentro del rango de $\pm 0,0632$ $^{\circ}\text{C}$ a 35 $^{\circ}\text{C}$. Esta investigación sienta las bases para futuras aplicaciones médicas de sensores de temperatura CMOS (semiconductor complementario de óxido metálico) de alta precisión.

Ahmet (2011) explica un método para calibrar sensores y reporta los resultados obtenidos por baños líquidos donde explica su funcionamiento y como están compuestos los baños líquidos y su temperatura de trabajo. El autor asegura que los baños sirven para reducir o controlar la incertidumbre los resultados. En el estudio se desarrolló un escáner 3D con dos sondas para escanear en tres dimensiones y determinar perfiles de temperatura en baños de agua, aceite y sal. El escaneo está controlado por computadora para reducir el error humano. Se descubrió que con motores paso a paso se pueden lograr temperaturas homogéneas moviendo la plataforma sobre tornillos y rieles. Se pudo encontrar estabilidad de la temperatura del baño en comparación con las especificaciones manuales. Se pudo concluir que estos escáneres pueden resultar útiles para laboratorios industriales que trabajan con baños, aumentando la incertidumbre en las mediciones.

Como se puede concluir de esta sección de metodologías de calibración, los autores reportan que esta es de gran valor debido a que permiten una precisión y exactitud en las mediciones, reduciendo el margen de error. Por lo tanto, un sensor mal calibrado afecta las mediciones y las decisiones tomas a partir de esos datos. Por otra parte, los autores reportan que en el cumplimiento de normas a menudo muchos sectores de la industria como son la farmacéutica, la aeronáutica o la manufactura que se rigen por normas estrictas, requieren que los sensores estén calibrados y certificados bajo ciertos estándares.

Por otra parte, a partir de la revisión bibliográfica se encontró que las metodologías que se han reportado como las más factibles son las que involucran baño de hielo, específicamente utilizado para la calibración de sensores de temperatura debido a su alta precisión y estabilidad. Además, algunos autores reportan están metodologías como la mejor opción porque se basan en estándares internacionales, debido a que considera un punto de referencia de calibración "0C", punto doble del agua.

1.3 Objetivo general

Desarrollar una metodología para la calibración de sensores mediante el desarrollo de un sistema experimental basado en la Norma ASTM E220-19 para disminuir la incertidumbre de medición de diferentes sensores.

1.3.1 Objetivos específicos

- Seleccionar los sensores de temperatura mediante una revisión de la literatura considerando como criterio la señal de respuesta y los intervalos de medición para aplicaciones en estudios energéticos de edificaciones.
- Realizar un diseño de experimento para determinar el número de pruebas a realizar y los intervalos de temperatura en función de los requerimientos de uso para aplicaciones de sistemas energéticos en edificaciones.
- Implementar el sistema experimental de calibración basado en la Norma ASTM E220-19 mediante el uso de sensores, equipos de medición y sistema de adquisición de datos para obtener mediciones de tensión eléctrica o resistencia.
- Obtener la incertidumbre de medición de los sensores de temperatura en función de la tensión eléctrica o la resistencia a partir de un análisis de propagación de error considerando la ecuación de calibración y un factor de cobertura $k=2$.

1.4 Hipótesis

Desarrollar una metodología para la calibración de sensores basada en la Norma ASTM E220-19, contribuirá a determinar con precisión la incertidumbre de medición de una variedad de sensores basado en procedimientos sistemáticos y reproducibles para la calibración.

1.5 Estructura de la tesis

La estructura del trabajo de investigación está comprendida en cuatro Capítulos, distribuidos de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se presentan los antecedentes y la revisión bibliográfica del marco referencial de los métodos de calibración y sus aplicaciones, así como los objetivos e hipótesis del trabajo. En el Capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos de los tipos de sensores, la calibración, la determinación de la incertidumbre, las normas relacionadas y el concepto de punto doble del agua. En el Capítulo 3 se presenta la metodología del proyecto, que involucra el desarrollo de un código computacional para análisis de datos, el procedimiento y el diseño experimental. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

En este capítulo se presentan los tipos de sensores y sus características, así como, la terminología de calibración, incertidumbre, normas y ecuaciones para la calibración. Lo anterior, con el objetivo de proporcionar las bases para la comprensión de la metodología de calibración.

2.1 Sensores

En la Tabla 2.1 se presenta una clasificación general de los tipos de sensores de temperatura. Como se puede observar se mencionan algunos tipos, indicando los materiales de los cuales están fabricados y las condiciones a las que pueden ser expuestos.

Tabla 2.1 Clasificación general de los tipos de sensores de temperatura.

Termistor	
	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="491 725 1359 1160">• El termistor PTC (Coeficiente de Temperatura Positivo) son dispositivo de resistencia variable cuyo comportamiento cambia de manera no lineal en función de la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, su resistencia también lo hace, mientras que disminuía cuando la temperatura bajaba. Este comportamiento generaba un efecto de auto-refuerzo, limitando la corriente al aumentar la resistencia cuando el dispositivo se calentaba, lo que permitía su uso en aplicaciones de protección contra sobrecalentamiento. <li data-bbox="491 1182 1359 1666">• Los sensores PTC se clasifican en dos tipos principales El primer tipo son los basados en resistencia de silicio, los cuales presentan un coeficiente positivo uniforme (+0.77 %/°C) y se utilizan para la compensación de temperatura en semiconductores. El segundo tipo son los de cerámica policristalina, fabricados a partir de compuestos como el bario y los titanitos con dopantes, que se convierten en semiconductores y ofrecen resistencia a altas temperaturas. Ambos tipos de sensores se emplean en diversas aplicaciones y están disponibles en el mercado para su uso industrial y comercial. <li data-bbox="491 1688 1359 1980">• Los termistores NTC (negative temperture coefficient) es una resistencia variable cuyo valor va decreciendo mientras la temperatura va en aumento la temperatura. Los termistores tienen muchas aplicaciones como la limitación de corriente, sensor de temperatura desmagnetización y para la protección por sobre calentamientos. En ciertas cosas los termistores PTC pueden

	llegar comportarse como NTC si llega a temperaturas demasiado alta.
Termopar	<p>Un termopar es un dispositivo formado por un circuito de dos metales distintos, creado para producir un voltaje basándose en la variación de temperatura entre dos puntos: uno conocido como "punto caliente" y el otro "punto frío". Para conseguir mediciones exactas utilizando estos sensores, se utiliza un método denominado Compensación de Unión Fría (CUF). Existen diversas clases de termopares, que se diferencian por su sensibilidad, los materiales que los constituyen y el rango de temperatura en el que operan. Estos se modifican según las demandas de las aplicaciones industriales y científicas en las que se emplean (Emanuel Solís, 2008).</p> <p>Existen varios tipos de termopares, los cuales se diferencian por su sensibilidad, los materiales que los constituyen y el rango de temperatura en el que operan. Estos varían en función de las necesidades de las aplicaciones industriales y científicas en las que se utilizan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Termopar tipo K: (cromo ni-cr) Chromel-aluminio, con una amplia diversidad de usos, se encuentra a un costo reducido y ofrece una diversidad de sondas, con un rango de temperatura de -200 a +1200°C y una sensibilidad de 41µV/°C. • Termopar tipo E: (cromo-constantan aleación de Cu-Ni) carecen de magnetismo y, debido a su sensibilidad, son ideales para ser utilizados en ambientes de bajas temperaturas en el ámbito criogénico. Su sensibilidad es de 68µV/°C. • Termopar tipo J: (hierro / Constantán): Debido a su rango restringido, el tipo J es menos frecuentemente utilizado que el tipo K. Son perfectos para usar en antiguos dispositivos que no admiten el uso de termopares más actuales. Este tipo de termopares poseen un rango de -40 a +750°C y una sensibilidad de ~52µV/°C. • Termopar de tipo N: (nicrosil aleación de Ni-Cr-Si/ Nisil (Ni-Si)), es idóneo para medir a altas temperaturas debido a su alta

	<p>estabilidad y resistencia a la oxidación a altas temperaturas, y no emplea platinos como B, R, y S, que resultan más caros. Las clases de termopares B, R, y S son las más estables, aunque tienen una sensibilidad de $10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, y se utilizan para medir 300°C.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Termopar tipo B (platino Pt / radio Rh): se aconseja su uso para mediciones de altas temperaturas que superen los 1800°C, aunque el tipo B suele mostrar el mismo resultado entre 0 y 42°C debido a su curva de temperatura/voltaje. • Termopar R: platino (Pt)-radio(Rh), idóneo para registrar temperaturas de hasta 1300°C. • Termopar tipo T: Este tipo de termopar es apropiado para mediciones que oscilan entre -200 y 0°C, con el conductor positivo hecho de cobre y el negativo de Constantán.
<p>Termómetro de vidrio</p>	<p>En el año 1592, Galileo diseñó un prototipo que se basa en un tubo de vidrio vertical, cerrado en ambos extremos, que contenía agua en la que flotaban varias esferas de vidrio selladas.</p> <p>Cada esfera contenía una cierta cantidad de líquido coloreado y la forma en la que se comportaba dentro del tubo que consentía medir variaciones en la temperatura, Salomón et al., (2010).</p> <p>El termómetro bimetálico se fundamenta en la dilación de dos metales distintos, tales como latón, monel, acero o una aleación de ferroníquel, o en laminas juntas. Es importante destacar que las láminas pueden ser de forma recta o en forma de espirales o hélices. Así pues, este tipo de termómetro cuenta con escasas componentes móviles, únicamente las agujas indicadoras sujetas al extremo de los elementos bimetálicos y el eje al elemento que se sostiene mediante rodamientos. Los rangos operativos se determinan por el tipo de aleación y otros elementos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • De -20 a 120°C y de 0 a 250°F • De -70 a $+600^\circ\text{C}$ [-94 a $+1.112^\circ\text{F}$] • De -80°F a 1000°F, -50° a 500°F • De 0 a 200°C

- El Termómetro de gas, que opera mediante la variación de la presión de los gases en respuesta a las fluctuaciones de la temperatura. El termómetro cuenta con una carátula que indica la temperatura del gas, la cual registra las fluctuaciones de presión al calentar el depósito metálico situado en su extremo.
- Termómetro de resistencia, los termómetros de resistencia, también conocidos como termómetros a resistencia, son aparatos de transmisión de temperatura. Su fundamento radica en la relación entre la resistencia eléctrica de un material y la temperatura. Su resistencia eléctrica varía con las variaciones de temperatura. Estas son medibles y convertidas en un número mostrado en una pantalla digital.
- Los termómetros de resistencia son aparatos que registran la temperatura a través de la alteración de la resistencia eléctrica de un material a medida que se modifica la temperatura. Conforme la temperatura fluctúa, la resistencia del material también cambia, lo que facilita la identificación y transformación de estas variaciones en un valor numérico. Estos valores se presentan en una pantalla digital, lo que simplifica la interpretación y el seguimiento de la temperatura. Debido a su exactitud y confiabilidad, estos termómetros se emplean extensamente en usos industriales y científicos, donde resulta vital disponer de mediciones precisas y consistentes para la gestión de procesos y la recolección de datos.

Estos son rango de operación de algunos termómetros, se engloban los bimetalicos los de tensión, de dilatación de gas y mercurio:

- **Termómetro bimetalico:** Su rango de medición común es de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Termómetro de tensión:** Su rango de medición es de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

	<ul style="list-style-type: none"> • Termómetro industrial de dilatación de gas: Su rango de medición es de -200 °C a 700 °C. • Termómetro de mercurio: Su rango de medición es de -170 °C a 500 °C.
Pt 100 y 1000	<p>Los sensores RTD (Resistance Temperature Detector) son dispositivos utilizados para medir la temperatura mediante la variación de la resistencia eléctrica de un material, comúnmente platino. Los tipos más frecuentes son el PT100 y el PT1000.</p> <p>El PT100 tiene una resistencia de 100 ohmios a 0 °C, y se destaca por su alta precisión, lo que lo hace adecuado para aplicaciones industriales. Por su parte, el PT1000, con una resistencia de 1000 ohmios a 0°C, ofrece mayor sensibilidad y es ideal para aplicaciones que requieren mayor resolución.</p> <p>Estos sensores se caracterizan por su precisión, estabilidad a largo plazo, linealidad en la respuesta de resistencia a temperatura y un amplio rango de funcionamiento, que generalmente oscila entre -200 °C y 850 °C. Sin embargo, su coste es más elevado en comparación con otros tipos de sensores de temperatura, y requieren circuitos de medición específicos para obtener lecturas precisas.</p> <p>Tanto el PT100 como el PT1000 se emplean en diversas aplicaciones, tales como control de procesos industriales, sistemas de climatización y refrigeración, así como en equipos médicos y de laboratorio. La elección entre uno u otro depende de los requerimientos específicos de tipo de proyecto y condiciones a ser sometido.</p>

2.2 Calibración

La calibración abarca una serie de operaciones que, bajo condiciones reguladas, determinan la correlación entre las señales generadas por un aparato de medición y los valores de referencia de temperatura de los patrones empleados. Su meta es garantizar la exactitud y fiabilidad del aparato calibrado, considerando sus valores de incertidumbre.

Error medio cuadrático (ECM)

El ECM es un índice estadístico clave para analizar la calidad y la precisión de las mediciones en el proceso de calibración. Este indicador se obtiene al calcular la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las diferencias entre los valores medidos y los valores verdaderos o de referencia. Este índice proporciona una visión clara de la variabilidad o dispersión que puede existir en un proceso de medición. El ECM no solo compila en un solo número el comportamiento de los errores aleatorios y sistemáticos, sino que también facilita la medición del grado de incertidumbre que acompaña el resultado final de una medición. Es crucial realizar un análisis y una estimación adecuados del mismo para asegurar la trazabilidad metrológica, ya que muestra que tan capaz es el sistema de medición para proporcionar resultados consistentes y comparables bajo distintas condiciones y contextos operativos. Por lo tanto, el ECM se transforma en una herramienta esencial no solo para la autoevaluación de los procesos, sino también para hacer comparaciones justas entre distintos laboratorios, instrumentos o métodos de medición, favoreciendo la armonización de resultados tanto a nivel nacional como internacional y se puede expresar con la Ec. (1).

$$EMC = \left[\sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{T_{med} - T_{CAL}}{n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Donde:

N= es el número de datos,

T_{med} = es la temperatura medida (°C),

T_{CAL} = es la temperatura calibrada (°C).

Desviación estándar (σ)

La σ es un aspecto clave de la estadística que se utiliza para evaluar cuánto variación o dispersión existe en un grupo de datos en relación con su promedio. En términos sencillos, esta herramienta ayuda a medir cuán distantes están, en promedio, los valores individuales de un conjunto o población respecto a la media aritmética. Cuando se usa en el análisis de datos como las temperaturas, la σ se

convierte en un recurso muy útil para investigar fenómenos climáticos y patrones en el medio ambiente. Por ejemplo, al analizar la desviación estándar de las temperaturas diarias en una zona específica, se puede descubrir si el clima es estable o si hay grandes cambios de un día a otro. La manera de interpretar la σ es bastante clara:

- Un valor bajo de σ sugiere que la mayoría de los datos se encuentran cercanos a la media. En cuanto a las temperaturas, esto indica que las lecturas son uniformes y que el clima durante ese tiempo es relativamente constante.
- Por el contrario, un valor alto de la σ muestra que hay una gran dispersión de los datos, lo que significa mayor variabilidad y podría señalar eventos extremos o inusuales, como olas de calor o descensos abruptos en la temperatura. Desde un enfoque matemático, la σ se puede calcular usando la Ec. (2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{\mu})^2} \quad (2)$$

Donde:

N es el tamaño de la población,

x_i es el valor individual de la población,

μ es la media poblacional que se puede expresar de acuerdo con la Ec. (3).

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

2.3 Normas y Ecuaciones para la calibración

A continuación, se presentan las normas consideradas en este estudio:

ASTM E220-19: en este documento se describe un método estándar para la calibración de termopares utilizando la técnica de comparación. Este es un método que se basa en comparar las indicaciones de un termopar con las de un

termómetro de referencia en una serie de temperaturas. Este procedimiento incluye el uso de baños líquidos agitados, bloques metálicos uniformemente calentados, hornos de tubo, y baños fluidizados, según el rango de temperatura específico. Además, se requiere el uso de instrumentos de medición, como potenciómetros de alta precisión, esto para garantizar que las mediciones sean precisas y no influenciadas por otras fuentes. Este método es aplicable tanto para termopares de alambre desnudo como para termopares con vaina protectora, aunque estos últimos pueden requerir cuidados especiales para controlar las pérdidas por conducción térmica.

ASTM E230-17: en esta norma se presenta la relación de temperatura que tienen los diferentes tipos de termopares (Tipo B, Tipo E, Tipo J, Tipo K, tipo N, Tipo R, Tipo S y Tipo T). También, se incluyen las tablas y fórmulas que se pueden utilizar en el entorno industrial y los laboratorios certificados para temperatura en valores de FEM (fuerza electromotriz). Esta norma indica el procedimiento para transformar las mediciones de FEM que genera un termopar a valores de temperatura, de acuerdo con el tipo de termopar. También, se presenta de manera polinomial, Ec. (4), la relación entre la FEM y la temperatura para cada tipo de termopar.

$$E = C_0 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3 + \dots + C_nT^n \quad (4)$$

Donde

E= es la FEM (mV),

T= es la temperatura (°C),

C₁, C₂, C₃ ...C_n = son los coeficientes polinomiales proporcionados en las, tablas para cada tipo de termopar (ASTM E230-17).

ITS 90 (TERMOPARES): la norma establece una escala de temperatura que permita la coherencia y reproducción, que se basa en valores fijos de referencia y dispositivos de referencia. También, define los valores de referencia de la temperatura utilizando los métodos de calibración para realizar mediciones de temperatura precisas. La Ec. (5) expresa la relación entre la resistencia R de un termómetro de platino y la temperatura (T).

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (5)$$

Donde

R_0 = es la resistencia en (ohms) a 0°C ,

α = es el coeficiente de temperatura lineal,

β = es el coeficiente de temperatura cuadrática.

Ecuación de Steinhart–Hart (TERMISTORES)

Para el caso de los termistores es necesario la utilización de la ecuación de **Steinhart–Harten** (Ec. 6) para obtener la temperatura, debido a que los termistores funcionan por medio de una temperatura de referencia, en otras palabras, se podría decir que es la resistencia eléctrica de un semi conductor en función de la temperatura.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3 \quad (6)$$

Donde

A, B, C= son constates de steinhart-hart,

T= temperatura en Kevin (K),

R= es la resistencia en ohms (Ω).

Callendar-Van Dusen (PT-1000 y PT-100)

Para la cuestión de los sensores tipo PT-1000 y PT-100 es necesario utilizar la ecuación de Callendar-Van Dusen (Ecs. 7 y 8) para obtener la temperatura, ya que estos sensores funcionan a partir de la variación de la resistencia en función de la temperatura. En otras palabras, la ecuación relaciona la resistencia eléctrica del sensor con la temperatura del entorno, considerando parámetros específicos del material (platino) y su comportamiento lineal y no lineal en diferentes rangos de temperatura. Esta ecuación es fundamental para calcular la temperatura con precisión, especialmente cuando se trabaja con sistemas de medición basados en RTD (Resistance Temperature Detector), ya que permite corregir las desviaciones del comportamiento ideal.

$$R_t = R_0 [1 + (\alpha * T)] \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 * R_0} \quad (8)$$

Donde

R_t = resistencia (ohms) en temperatura, T ($^{\circ}\text{C}$),

R_0 = constante específica del sensor (resistencia en $T=0^{\circ}\text{C}$),

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$),

α , β y δ son constantes definidos por la norma (IEC- 60751 para platino).

2.4 Punto doble del agua

Dentro de la calibración de instrumentos de medición de temperatura, se contempla una técnica específica para la preparación y conservación de un baño de referencia, comúnmente utilizado para reproducir el punto de congelación del agua, cercano a los 0°C . Esta referencia es especialmente útil en la calibración de termómetros de resistencia de calidad industrial y otros sensores térmicos. El baño se conforma a partir de una mezcla homogénea de hielo y agua destilada, cuidadosamente preparada para mantener condiciones de equilibrio térmico ASTM-E1159-15-2020-e1.

Cabe señalar que, en este contexto, no es imprescindible alcanzar el punto triple del agua, el cual exige condiciones más estrictas de presión y pureza. La clave radica en asegurar que el baño ha sido preparado con agua destilada libre de impurezas y hielo limpio, manteniendo una cantidad adecuada de fase sólida en equilibrio con la fase líquida para garantizar la estabilidad térmica. A este valor se le asocia una incertidumbre, que depende directamente de la calidad con la que se haya ejecutado y mantenido el baño de referencia.

Capítulo 3

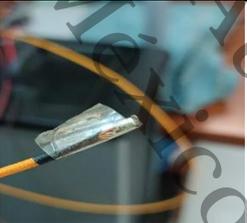
Materiales y Método

En este capítulo se presentan las muestras utilizadas, el diseño del experimento, el sistema experimental, así como, el procedimiento experimental para obtener la metodología para la calibración de sensores basado en la Norma ASTM E220-19 que permita contribuir a bajos valores de incertidumbre.

3.1 Muestras

En la Tabla 3.1 se presentan los sensores utilizados para el proceso de calibración. Se utilizaron siete sensores, los cuales fueron habilitados con extensiones de 3 m de longitud para su ajuste con el sistema experimental.

Tabla 3.1 Muestras de sensores para calibración.

Tipo de sensor	Foto	Características generales
PT1000		<ul style="list-style-type: none"> • El material con el que es construido es platino. • El rango de medición es $-200 + 650^{\circ}\text{C}$.
Termopar tipo T (Tp T)		<ul style="list-style-type: none"> • Esta fabricado con Cobre y Constantán. • Tiene un rango de temperatura de -200 a $+1200^{\circ}\text{C}$ y una sensibilidad $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
Termopar tipo K (Tp K)		<ul style="list-style-type: none"> • Cromo / Cromo-Níquel. • Rango de medición de -200 y $+1260^{\circ}\text{C}$.
PT100		<ul style="list-style-type: none"> • El material con el que es construido es platino. • El rango de medición es de -80 a $+250^{\circ}\text{C}$.
Termistor NTC $2\text{k}\Omega$		<ul style="list-style-type: none"> • Los materiales son una mezcla de Mn, Ni, Co, Cu, Fe y están moldeados en un cuerpo cerámico de varios tamaños. • Típicamente tienen una resistencia entre Rango: -50°C a 150°C.

Termistor NTC
20k Ω



- Los materiales son una mezcla de Mn, Ni, Co, Cu, Fe y están moldeados en un cuerpo cerámico de varios tamaños.
- Típicamente tienen una resistencia entre Rango: -40 °C a 125 °C.

Termistor TR NTC
100k Ω



- Los materiales son una mezcla de Mn, Ni, Co, Cu, Fe y están moldeados en un cuerpo cerámico de varios tamaños.
- Típicamente tienen una resistencia entre Rango-40 °C a 125 °C.

3.2 Sistema experimental

En la Figura 3.1 se presenta el esquema del sistema experimental de calibración sugerido, que incluye un baño de recirculación (también conocido como baño térmico o baño agitado), un dispositivo para la captura de datos, sensores de temperatura y una computadora con pantalla para el monitoreo de las mediciones.

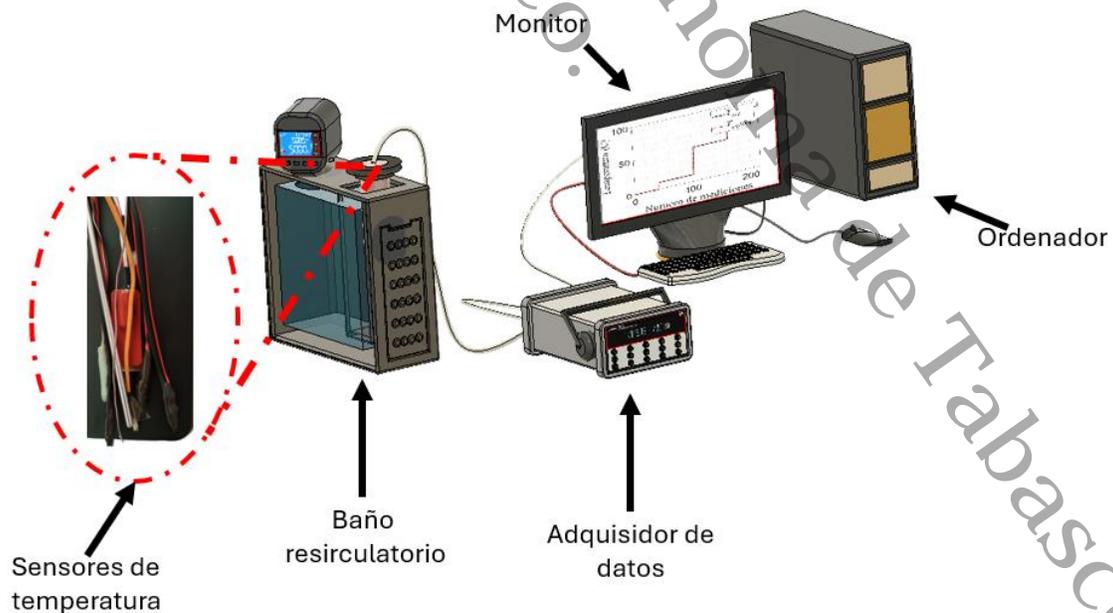


Figura 3.1 Sistema experimental de calibración. Fuente: propia.

Tal como se muestra en la Figura 3.2, se presenta el sistema experimental que se utiliza para la calibración, donde se incluye un baño de hielo (punto de fusión del agua). Esto se logra añadiendo un contenedor aislante al sistema experimental mostrado en la Figura 3.1.

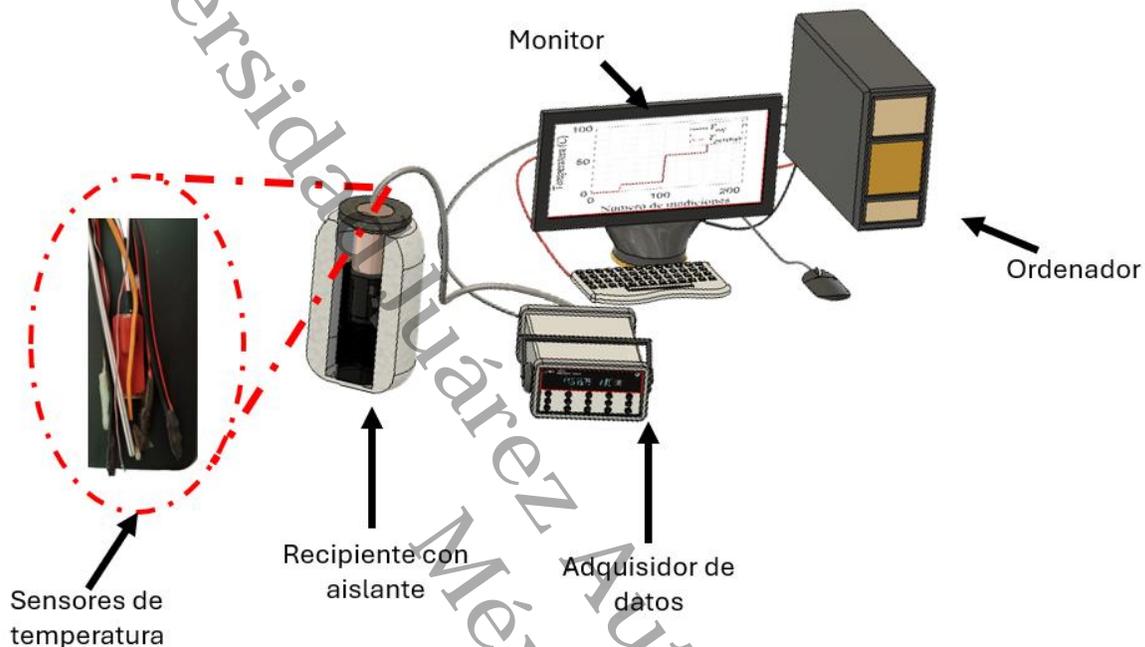


Figura 3.2 Sistema experimental de calibración con baño de hielo. Fuente: propia.

3.3 Diseño experimental

En la Tabla 3.2 se presenta el diseño experimental donde se muestran las pruebas realizadas. Las pruebas se realizaron por triplicado considerando diferentes temperaturas dentro del intervalo de estudio (0-90°C). Dentro del procedimiento de prueba se aumentó gradualmente la temperatura del baño térmico, registrando las lecturas de los sensores calibrados y del sensor de referencia en diferentes puntos de temperatura. Con el objetivo de asegurar la repetibilidad e independencia de los procesos en la determinación de la temperatura (histéresis), se realizaron las pruebas de la Tabla 3.2 considerando iniciar con la temperatura más alta, 90°C, y se realizaron en dos periodos diferentes (Experimento 1 y Experimento 2).

Tabla 3.2. Pruebas experimentales ascendentes.

No. prueba	Tipo de sensor	Temperatura de Baño térmico (°C)	Punto doble del agua
Experimento 1			
1.	Termopar tipo T	0	✓
2.		10	X
3.		50	X
4.		90	X
5.	Termopar tipo J	0	✓
6.		10	X
7.		50	X
8.		90	X
9.	Termistor NTC-(2kΩ)	0	✓
10.		10	X
11.		50	X
12.		90	X
13.	PT1000	0	✓
14.		10	X
15.		50	X
16.		90	X
17.	PT100	0	✓
18.		10	X
19.		50	X
20.		90	X
21.	Termistor NTC-(20 kΩ)	0	✓
22.		10	X
23.		50	X
24.		90	X
25.	Termistor NTC-(100kΩ)	90	X
26.		50	X
27.		10	X
28.		0	✓

3.3 Procedimiento Experimental

En la Figura 3.3 se presenta un diagrama de flujo para indicar los pasos a seguir para realizar las pruebas experimentales en el sistema de calibración. A continuación, se enumeran los pasos a seguir:

1. Se introducen los siete sensores de temperatura en la sonda de medición con cuidado, asegurándose de que estén distribuidos uniformemente para obtener lecturas precisas.

2. Se introduce la sonda con los sensores de temperatura dentro del baño recirculatorio.
3. Se enciende el baño recirculatorio y se establece la temperatura de referencia, en 10°C, para comenzar el proceso de calibración.
4. Se espera a que el baño recirculatorio alcance la temperatura fijada y se estabilice dicha temperatura.
5. Una vez que se alcanza la temperatura de referencia, se enciende el equipo de adquisición de datos y se activa el programa destinado al monitoreo y registro de datos. Para ello, se selecciona una carpeta compatible con documentos de Excel para almacenar los datos recolectados.
6. Una vez activado el programa, se deja funcionando el experimento durante 30 min para recopilar datos. Adicionalmente, se lleva un control de los valores de la temperatura de referencia del baño recirculatorio, con el fin de monitorear la deriva en el tiempo y considerarlo dentro del cálculo del error medio cuadrático (EMC). Esta temperatura se registra de manera manual al inicio del experimento, a los 10 min, a los 20 min y a los 30 min.
7. Una vez concluido el experimento se transfieren los datos a una unidad extraíble (USB) para su almacenamiento y posterior procesamiento.
8. Los Pasos del 3 al 7 se repiten para las temperaturas de referencia de 50°C y luego a 90 °C, siguiendo los mismos pasos de recolección de datos.
9. Una vez que se cuentan con los datos para las tres temperaturas de referencia (10, 50 y 90°C), se continua con la obtención de las curvas de trabajo y determinación de los valores de EMC y desviaciones estándar.

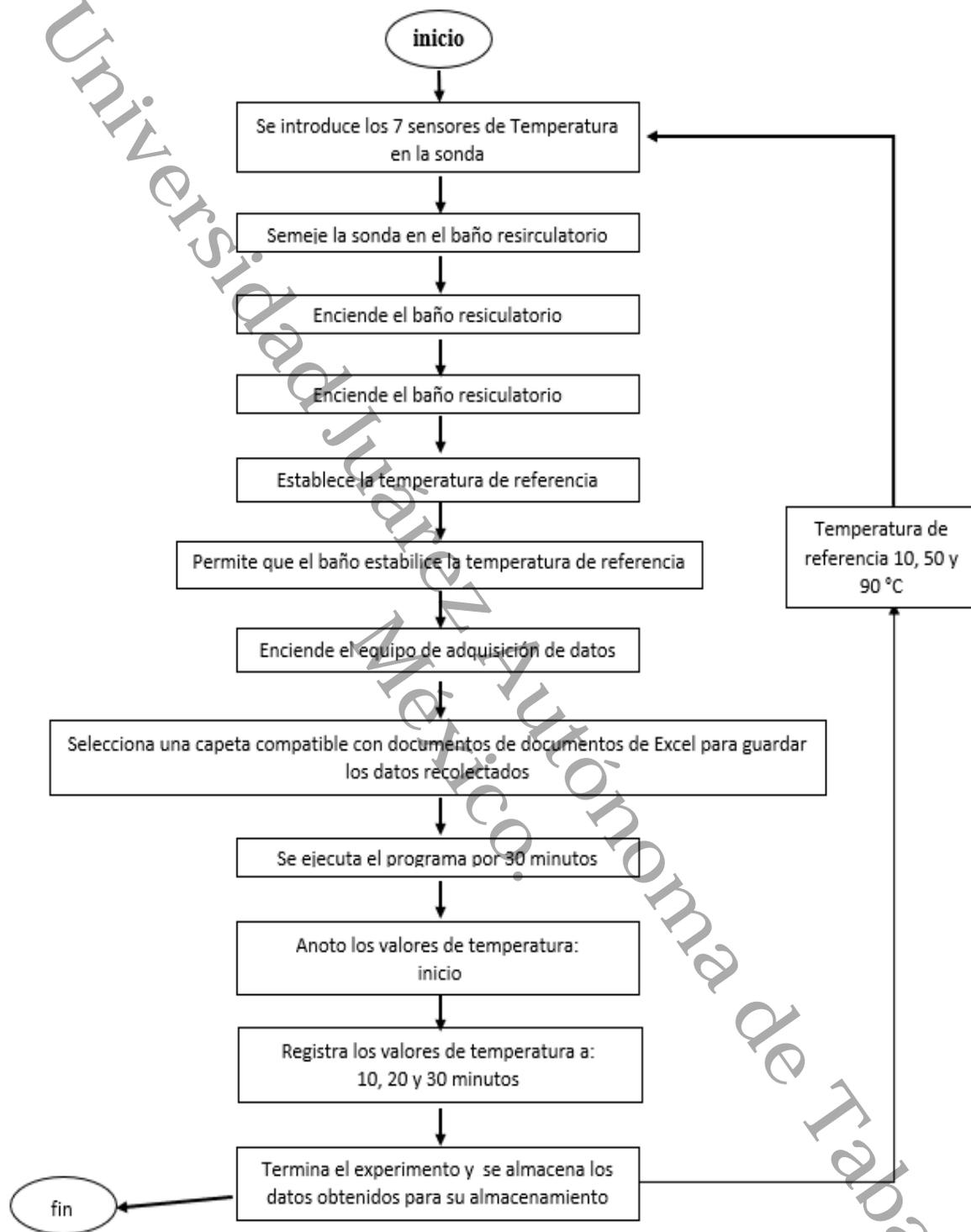


Figura 3.3 Diagrama de flujo de configuraciones para las pruebas experimentales.

Fuente: Propia.

La Figura 3.4 muestra el diagrama de flujo del procedimiento general para obtener la temperatura de referencia de los sensores bajo prueba a 0°C, con el fin de contar con una temperatura de referencia que mejore la curva de trabajo de cada uno de los sensores. Como se puede observar, la primera parte consiste en preparar el punto doble del agua colocando la misma cantidad de hielo y agua en un recipiente con aislamiento. Posteriormente, se introducen los sensores de temperatura en la sonda, y esta es sumergida en el punto doble del agua. Una vez realizado esto, se enciende el sistema de adquisición de datos y se activa el programa de monitoreo para el registro de mediciones. Los datos obtenidos son almacenados para su posterior procesamiento.

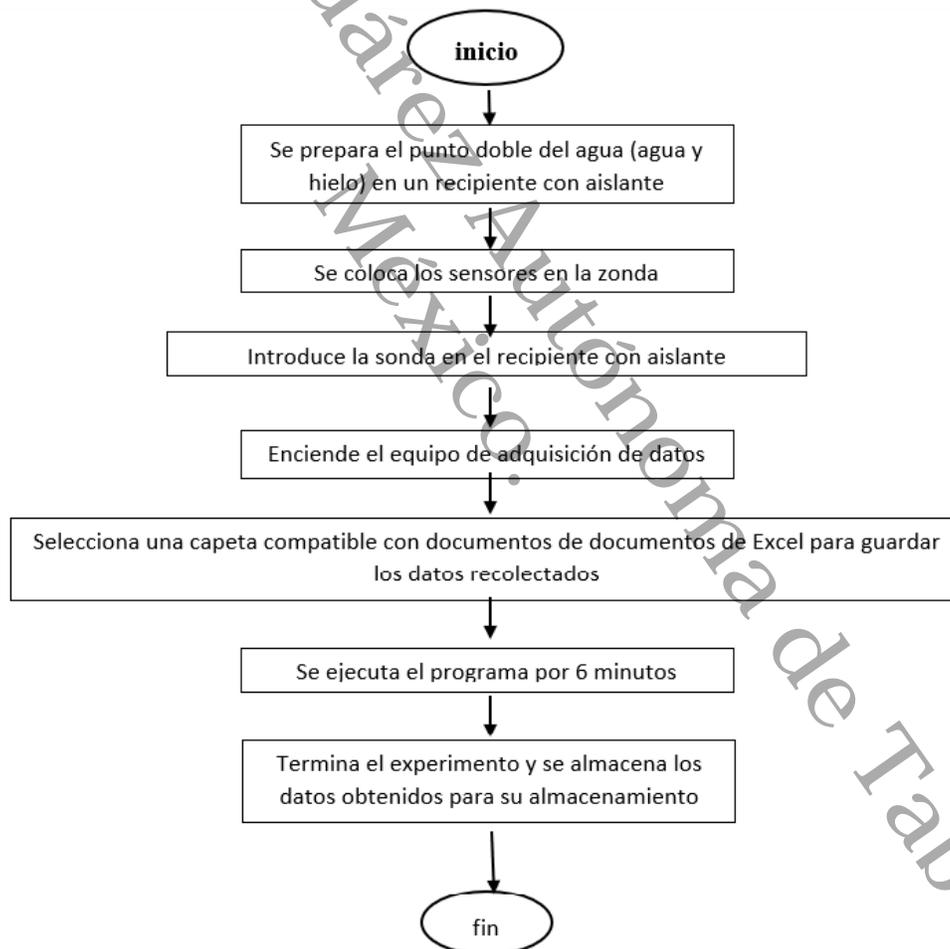


Figura 3.4 Diagrama de flujo del procedimiento general para obtener la temperatura de referencia de los sensores bajo prueba a 0°C. Fuente: Propia.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

En esta sección se presenta las conclusiones de las pruebas experimentales que se han desarrollado, así como una discusión en torno a estos resultados. Se realizará un análisis de las gráficas que se presenta y se realizarán conclusiones en función del comportamiento de los datos analizados.

4.1 Comportamiento de la temperatura

En esta sección se presentará el comportamiento de la temperatura de los sensores bajo prueba. Como se ilustra en la Figura 4.1, las curvas de la T_{REF} (temperatura de referencia) y la temperatura registrada por el sensor PT1000 exhiben un comportamiento extremadamente preciso en todas las pruebas realizadas, lo cual valida la alta precisión del sensor en la medición de temperatura. Las discrepancias observadas entre ambas curvas son mínimas y no afectan la fiabilidad de las mediciones, lo que fortalece la solidez del sistema de medición. Es importante señalar que el sensor PT1000 presenta una notable estabilidad tanto en condiciones de bajas temperaturas (0°C y 10°C) como en condiciones de altas temperaturas (50°C y 90°C). Esta propiedad sugiere que el sensor es capaz de mantener su rendimiento en un amplio rango de condiciones térmicas, lo que lo convierte en una herramienta confiable para aplicaciones que requieren mediciones precisas y consistentes.

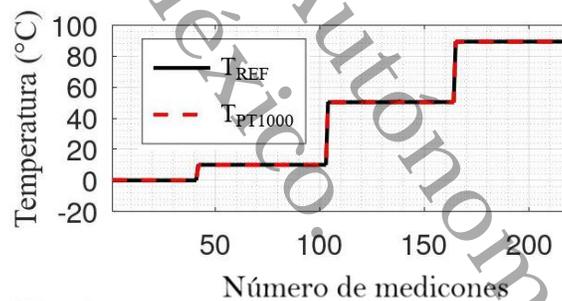


Figura 4.1 Comportamiento de la temperatura del PT1000 calibrado a diferentes valores de temperatura.

La estabilidad evidenciada en las gráficas actúa como un indicador crucial de la calidad del sensor, puesto que asegura que las mediciones no se vean afectadas por fluctuaciones o desviaciones significativas, incluso en contextos variables. Esta consistencia entre la T_{REF} y las mediciones del PT1000 apoya su utilización en aplicaciones críticas, tales como sistemas de monitoreo en tiempo real, control de procesos industriales y calibración de equipos de alta precisión. Además, la capacidad del sensor para funcionar adecuadamente en un amplio rango de temperaturas lo hace altamente versátil y apropiado para diversas industrias, desde la alimentaria hasta la automotriz. Esta versatilidad resulta especialmente relevante

en aplicaciones donde la precisión de la temperatura es un factor crítico, como en procesos industriales avanzados, laboratorios de investigación y sistemas de control ambiental. Los resultados obtenidos durante el experimento, representados en las gráficas, confirman que el sensor PT1000 provee mediciones precisas y exactas en todas las condiciones evaluadas. Su elevada precisión, estabilidad y habilidad para operar en un amplio rango térmico lo posicionan como una solución confiable y eficiente para aplicaciones que demandan exactitud y consistencia en la medición de temperatura.

El resto de los sensores calibrados, en los resultados, mostraron un comportamiento similar al obtenido con el PT1000 en relación con la mínima diferencia significativa entre la T_{REF} y la temperatura medida por el sensor en estudio. En la Figura 4.2 se puede ver el comportamiento del resto de los sensores.

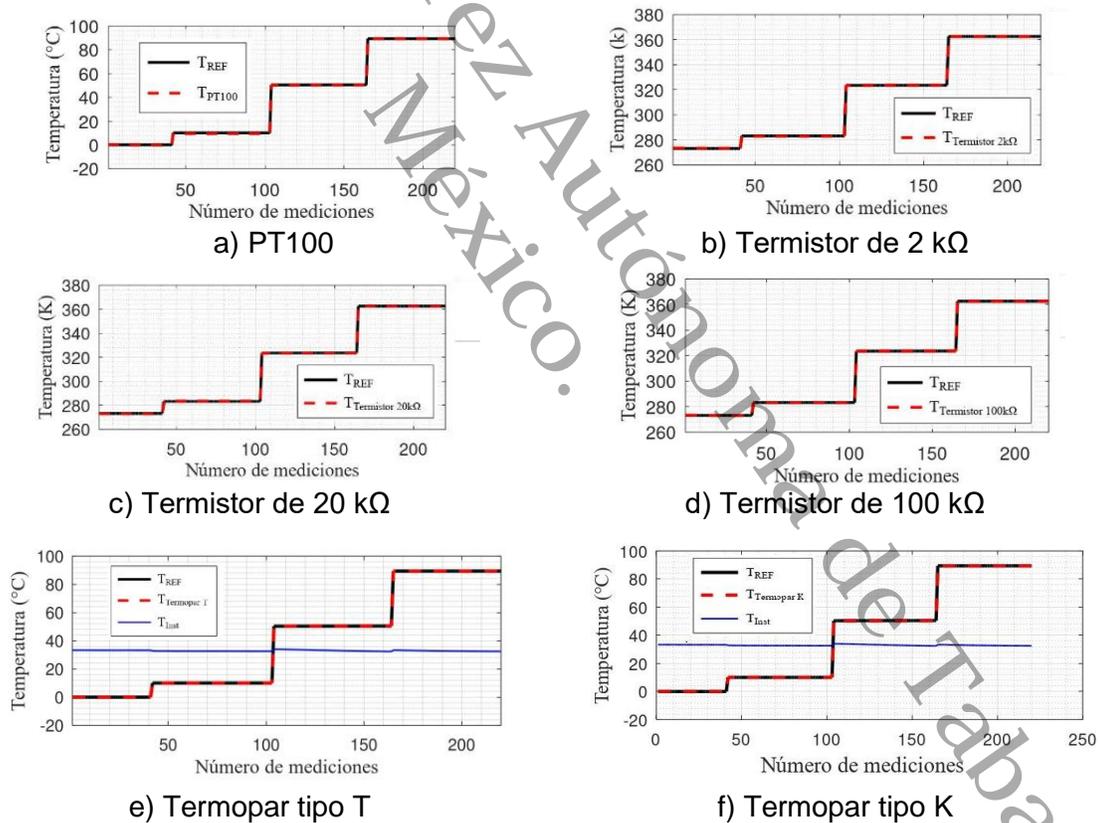


Figura 4.2 Comportamiento de la temperatura, a) PT100, b) Termistor de 2 kΩ, c) Termistor de 20 kΩ, d) Termistor de 100 kΩ y e) Termopar tipo T y f) Termopar tipo K a diferentes valores de temperatura.

4.2 Diferencia de temperatura (ΔT)

La gráfica presentada en la Figura 4.3 ilustra la variación de la ΔT ($T_{REF} - T_{med}$) en función del número de mediciones realizadas. Como se observa, la ΔT fluctúa alrededor de cero, lo cual es un indicador clave de la estabilidad del sensor. Estas fluctuaciones se encuentran dentro de un rango de 0.4°C a 0.62°C , lo que sugiere que el sensor mantiene un comportamiento consistente a lo largo del tiempo. Esta estabilidad es fundamental, ya que garantiza mediciones confiables incluso en condiciones de operación prolongadas, lo que es esencial en aplicaciones que requieren precisión y exactitud en la medición de la temperatura. Además, el hecho de que la ΔT se aproxime a cero en la mayoría de las mediciones confirma que el sensor posee una alta precisión. Esta característica es particularmente importante en aplicaciones críticas, como en la industria médica, la investigación científica o el control de procesos industriales, donde incluso pequeñas desviaciones pueden tener un impacto significativo. Por lo tanto, la capacidad del sensor para mantener la ΔT cercana a cero, refuerza su idoneidad para estas aplicaciones.

Sin embargo, aunque el sensor muestra un desempeño notable, es importante reconocer que las pequeñas fluctuaciones de la ΔT no afectan la medición. Asimismo, una calibración adicional podría optimizar el rendimiento del sensor, ajustando posibles desviaciones y asegurando que las mediciones se mantengan dentro de los límites deseados. Estas mejoras no solo aumentarían la precisión del sensor, sino que también ampliarían su aplicabilidad en entornos más exigentes. La misma gráfica demuestra que el sensor es altamente preciso y estable, estas características lo hacen adecuado para aplicaciones que requieren mediciones exactas de temperatura. No obstante, la implementación de técnicas de filtrado y calibración adicional podría optimizar aún más su rendimiento, reduciendo las fluctuaciones y mejorando su confiabilidad en condiciones operativas más desafiantes.

Por su parte, en la Figura 4.4 se muestra el comportamiento de una PT100 observando que las fluctuaciones se encuentran dentro de un rango de -0.4°C a

0.8°C. Cabe mencionar que, aunque ambos sensores (PT1000 y PT100) son estables y confiables, el PT1000 ofrece una mayor precisión y sensibilidad, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones exigentes. Por otro lado, el PT100 es una opción más económica y suficiente para usos generales.

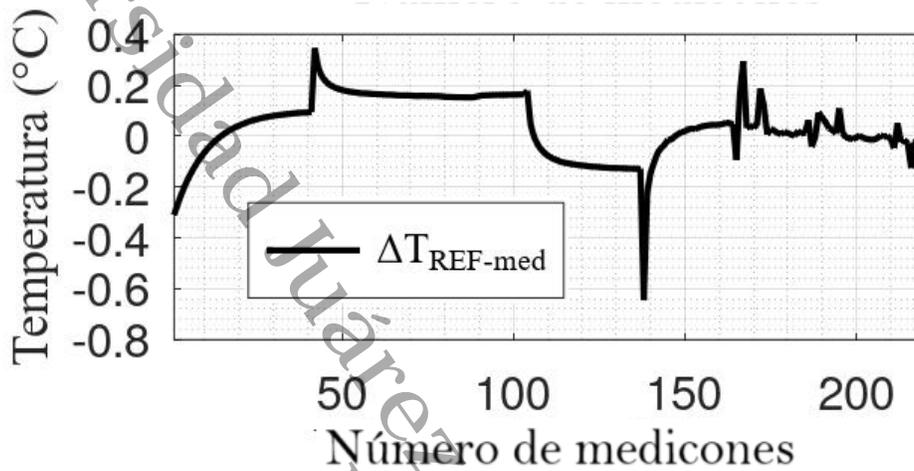


Figura 4.3 Diferencia de temperatura (ΔT) en el PT1000.

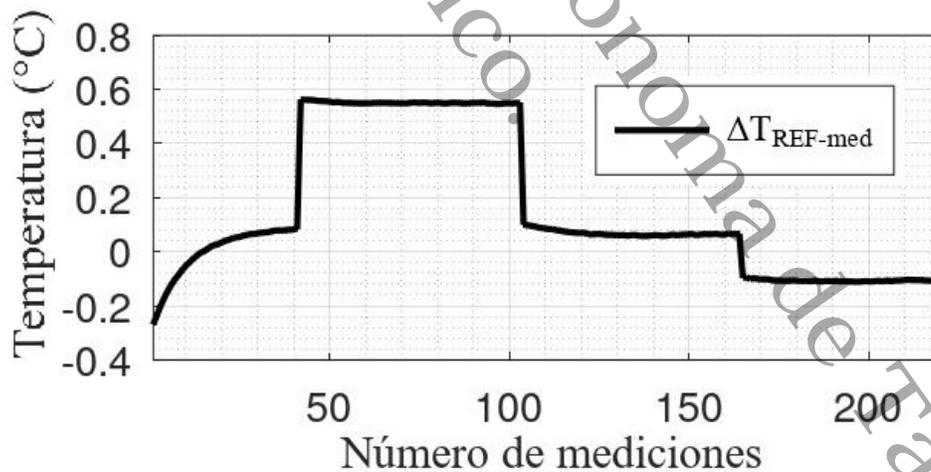


Figura 4.4 Diferencia de temperatura (ΔT) en el PT100.

Como se muestra en la Figura 4.5, el termistor de 2k Ω exhibe fluctuaciones de temperatura en el intervalo de -273.5 a 272.9 K. Sin embargo, a pesar de estas variaciones que generan picos y caídas en su rendimiento, el aparato conserva una

precisión confiable en las lecturas. Es importante mencionar que estas oscilaciones son el resultado de la incertidumbre propia del instrumento de medición, un factor que no se puede medir y que no influye en la validez de la información capturada.

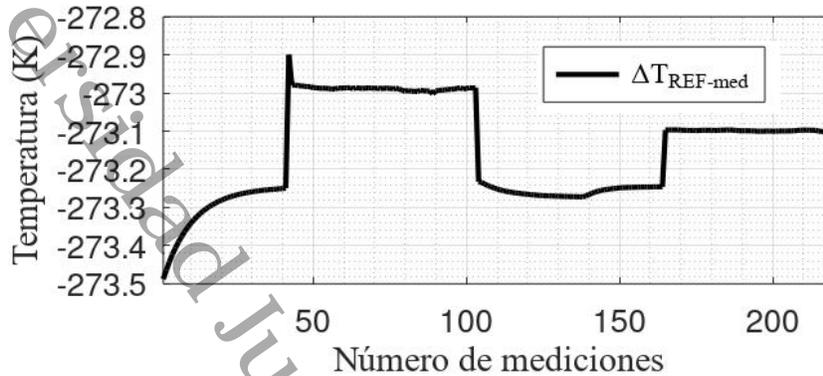


Figura 4.5 Diferencia de temperatura (ΔT) para el termistor de $2k\Omega$.

Como se presenta en la Figura 4.6, para el termistor de $20k\Omega$ las fluctuaciones se encontraron en un rango de -273.5 y -271 K, al igual que con el termistor de $2k\Omega$ estas variaciones no afectan las temperaturas medidas por el sensor.

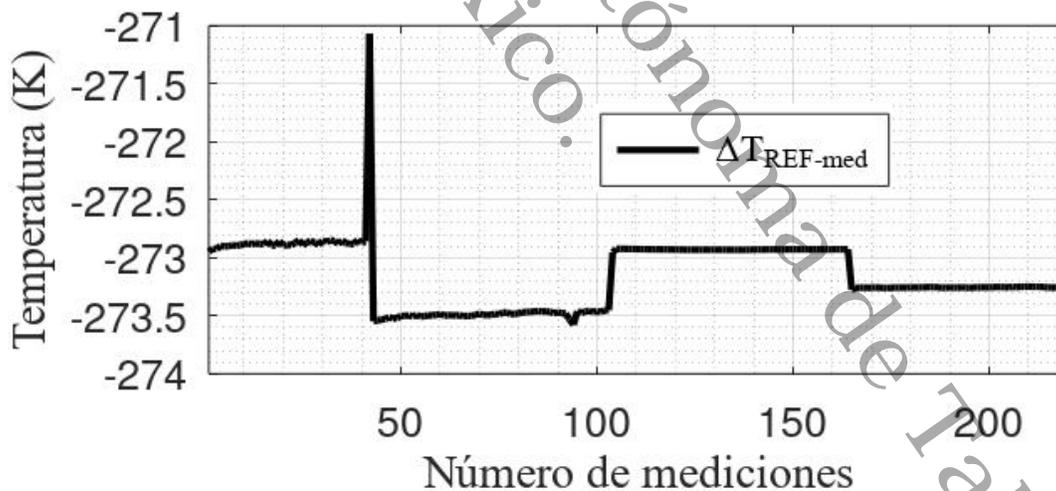


Figura 4.6 Diferencia de temperatura (ΔT) para el termistor de $20 k\Omega$.

En la Figura 4.7 se presenta el comportamiento del termistor de $100k\Omega$, el cual muestra otro comportamiento y sus fluctuaciones oscilan entre -273.1 y -273.7 K con variaciones alrededor del cero absoluto.

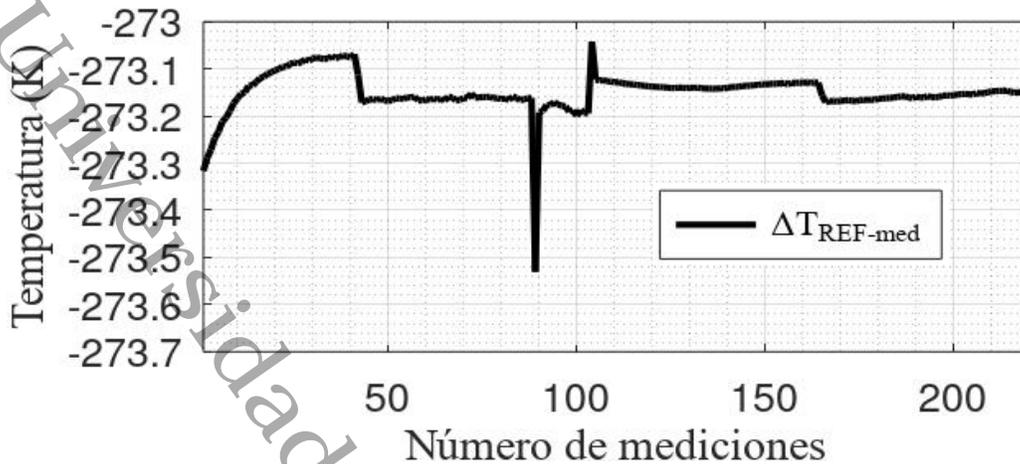


Figura 4.7 Diferencia de temperatura (ΔT) para el termistor de 100k Ω .

La gráfica que se presenta en la Figura 4.8 muestra el comportamiento de la diferencia de temperatura, para el Termopar Tipo T, en un rango crítico cercano al 0°C registrando fluctuaciones entre -0.06 y +0.02 °C durante un periodo de 200 lecturas. Estos resultados revelan un comportamiento oscilatorio no aleatorio, con una desviación estándar de $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$, lo cual muestra su viabilidad para el monitoreo térmico general.

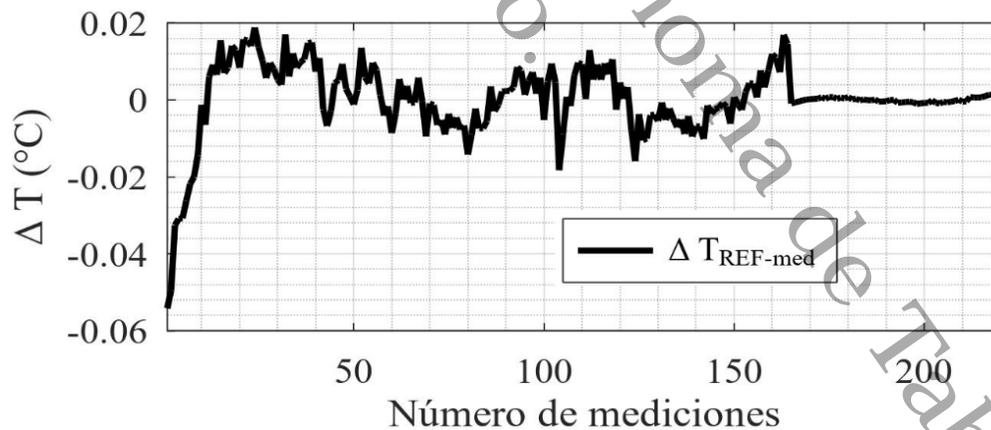


Figura 4.8 Diferencia de temperatura (ΔT) en el Termopar Tipo T.

En la Figura 4.9 muestra el análisis de la ΔT , entre las lecturas obtenidas con un termopar y una temperatura de referencia ($T_{\text{REF-med}}$), en función de cuántas

mediciones se realizaron durante un proceso de calibración. Las variaciones se sitúan dentro de un rango de -0.015 hasta 0.02°C . Estas ligeras diferencias sugieren que el termopar ofrece un buen nivel de exactitud, dado que las discrepancias respecto a la temperatura de referencia son mínimas. Por otro lado, se muestra el total de mediciones, que van de 0 a 200. En relación con la tendencia de los datos, se puede notar que las ΔT se encuentran cercanas a 0°C , sin evidenciar una dirección clara hacia temperaturas altas o bajas. La ausencia de una tendencia ascendente o descendente indica una gran estabilidad en las lecturas del sensor. La regularidad de estas variaciones alrededor de cero sugiere que el termopar no solo es exacto, sino también confiable a lo largo del tiempo. Además, se incluye una línea de referencia en $\Delta T=0^\circ\text{C}$, que representa la temperatura de referencia perfecta. Las lecturas que se aproximan a esta línea refuerzan la idea de que el dispositivo permite una adecuada calibración.

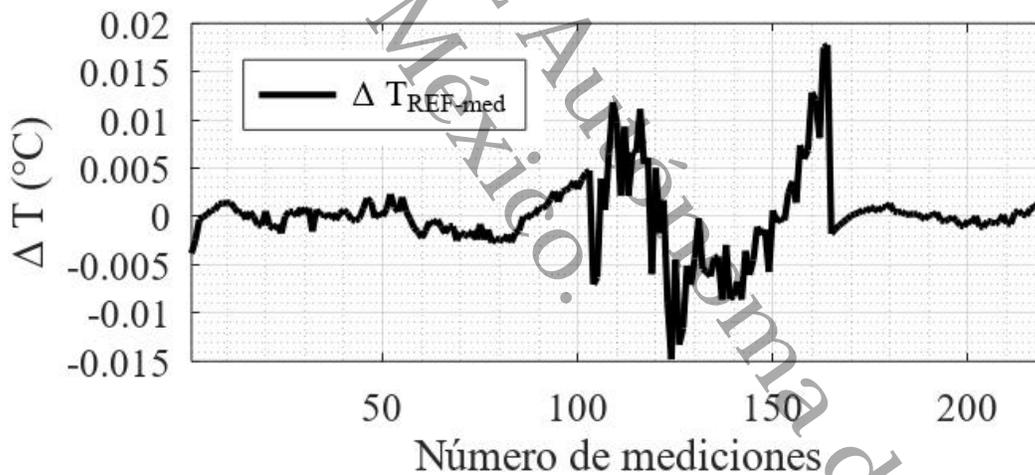


Figura 4.9 Diferencia de temperatura (ΔT) del Termopar Tipo K.

A continuación, en la Tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos durante la calibración de los distintos sensores de temperatura, entre ellos los modelos PT100, PT1000, Termistores de $2\text{k}\Omega$, $20\text{k}\Omega$ y $100\text{k}\Omega$, así como, Termopares Tipo T y Tipo K. También, se muestran los valores de ΔT registrados durante el proceso de calibración, a distintas temperaturas y en diferentes intervalos de tiempo. Estos resultados permiten observar las variaciones en la diferencia de temperatura, lo cual

proporciona información relevante sobre el comportamiento de los sensores en distintas condiciones de operación. Cabe mencionar que entre cada experimento se estableció un período de reposo de un mes. En total, se realizaron cuatro calibraciones, es decir, un mes entre cada experimento. Este tiempo de reposo entre experimentos permitió evaluar la estabilidad y repetibilidad del proceso de calibración bajo condiciones controladas.

Tabla 4.1 Concentrado de las diferencias de temperatura de los sensores calibrados.

EXPERIMENTO 1			EXPERIMENTO 3		
Sensores	Intervalos de variación (Min a Máx)	ΔT_{REF}	Sensores	Intervalos de variación (Min a Máx)	ΔT_{REF}
PT1000	-0.6°C a +0.4°C	1.0°C	PT1000	-0.38 a 0.4 °C	0°C
PT100	-0.4°C a +0.8 °C	1.2°C	PT100	-0.25 a 1 °C	0.75°C
Termistor 2k Ω	-273.5K a -272.9 K	0.6K	Termistor 2k Ω	-273.35 a -272.9 K	0.45 K
Termistor 20k Ω	-273.5K a -271 K	2.5 K	Termistor 20k Ω	-273.4 a -272.77K	1.6 K
Termistor 100k	-273.5K a -273 K	0.5 K	Termistor 100k	-273.55 a -271.8 K	1.75 K
Termopar Tipo T	-0.015°C a +0.017°C	0.032°C	Termopar Tipo T	-0.2 a 0.19 °C	-0.01°C
Termopar Tipo K	-0.05°C a 0.02°C	0.070°C	Termopar Tipo K	-0.19 a 0.2 °C	0.01°C
EXPERIMENTO 2			EXPERIMENTO 4		
PT1000	-0.21 a 0.59 °C	0.38°C	PT1000	-0.4 a 0.21°C	0.19 °C
PT100	-0.25 a 0.38 °C	0.13°C	PT100	-0.2 a 0.8 °C	0.6°C
Termistor 2k Ω	-273.5 a -272.8 K	0.7 K	Termistor 2k Ω	-273.4 a -272.9 K	0.5 K
Termistor 20k Ω	-273.4 a -272.8 K	0.6 K	Termistor 20k Ω	-273.41 a -272.6 K	0.81 K
Termistor 100k Ω	-273.4 a 272.9 K	0.5 K	Termistor 100k	-285 a -262.5 K	22.5 K
Termopar Tipo T	-0.065 a +0.021 °C	0.044 °C	Termopar Tipo T	-0.075 a 0.075 °C	0°C
Termopar Tipo K	-0.03 a +0.015 °C	0.015°C	Termopar Tipo K	-0.075 a 0.075 °C	0°C

También, en los resultados de la Tabla 4.1 se puede observar que los termopares Tipo T y Tipo K presentan la mayor precisión, evidenciada por variaciones mínimas en los diferentes experimentos realizados. Estos sensores demostraron un comportamiento altamente consistente, incluso en condiciones variables. En comparación, con los resultados de los sensores PT100 y PT1000 mostraron una precisión moderada, con fluctuaciones que se encuentran en rangos que se consideran aceptables. Su desempeño fue estable en la mayoría de las pruebas, lo que los hace adecuados para aplicaciones de precisión intermedia. Por su parte, los termistores, especialmente los de 20k Ω y 100k Ω dieron resultados para nada óptimos para su uso que compromete su uso en aplicaciones que requieren alta exactitud.

Por otra parte, se observó que el PT1000 y el PT100, en cuestión de estabilidad, mostraron una estabilidad ligeramente inferior que los termopares, aunque los termopares mantienen una respuesta estable incluso después de múltiples ciclos de calibración. Por otro lado, los termopares presentaron menor estabilidad lo cual influye negativamente en la calidad de la medición especialmente en condiciones extremas o durante periodos prolongados.

4.3 Deriva en el tiempo de la temperatura

El proceso de calibración de los sensores se repitió tres veces, adicionales al primer experimento, con un intervalo de reposo de un mes entre cada experimento. La Tabla 4.2 muestra los resultados de la calibración para diferentes tipos de sensores de temperatura, incluyendo PT1000, PT100, y los Termistores de 2 k Ω , 20 k Ω y 100 k Ω obtenidos mediante el procesamiento en un código desarrollado en Octave. En la tabla se muestran, las ecuaciones de trabajo, los errores medios cuadráticos, su factor de cobertura ($k=2$) y la deriva en tiempo de la calibración (D). Por otra parte, en la Tabla 4.3 y 4.4 se presentan los resultados de la calibración para los Termopares Tipo T y Tipo K, mostrando las ecuaciones de trabajo y sus coeficientes, el error medio cuadrático y su factor de cobertura ($k=2$).

Tabla 4.2 Resultados de la calibración para termistores de los PT 1000, PT100y los termistores 2, 20 y 100 kΩ.

PT1000

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2)$$

	R_0	σ_{R_0}	α	EMC	k	D
Exp. 1	1005.748932	0.422560375	0.003822445	0.1265	0.2531	
Exp. 2	1005.748932	0.422560375	0.00382535	0.2242	0.4484	0.2270
Exp. 3	1004.375168	0.015878782	0.003842422	0.2126	0.4251	0.2548
Exp. 4	1004.375168	0.015878782	0.003853912	0.2406	0.4812	0.3340

PT100

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2)$$

	R_0	σ_{R_0}	α	EMC	k	D
Exp. 1	100.981519	0.036226629	0.003773477	0.3025	0.6049	
Exp. 2	100.981519	0.036226629	0.003762326	0.2619	0.5238	0.3061
Exp. 3	101.163689	0.010537843	0.003725025	0.5472	1.0945	0.4427
Exp. 4	101.163689	0.010537843	0.003692083	0.4242	0.8484	0.7497

Termistor 2kΩ

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

	A	B	C	EMC	K	D
Exp. 1	0.001478245	0.000218441	4.93212E-07	0.1291	0.2583	
Exp. 2	0.001195647	0.000197247	2.14636E-07	0.1911	0.3822	0.2603
Exp. 3	0.001454968	0.000223181	4.6274E-07	0.1635	0.3269	0.2510
Exp. 4	0.001161952	0.000202275	2.0318E-07	0.2863	0.5725	0.2175

Termistor 20kΩ

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

	A	B	C	EMC	K	D
Exp. 1	0.001161952	0.000202275	2.0318E-07	0.2863	0.5725	
Exp. 2	0.001195647	0.000197247	2.14636E-07	0.1911	0.3822	0.4035
Exp. 3	0.001197114	0.000196581	2.21132E-07	0.2256	0.4512	0.3345
Exp. 4	0.001213617	0.000193982	2.30129E-07	0.2235	0.4470	0.3487

Termistor 100kΩ

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

	A	B	C	emc	K	D
Exp. 1	0.000749665	0.00021056	1.21293E-07	0.0428	0.0857	
Exp. 2	0.000960186	0.000182977	1.88963E-07	0.0964	0.1927	0.7822

Exp. 3	0.000440594	0.000257673	-2.88553E-08	0.403	0.805	112.09
Exp. 4	0.006510193	-0.00025504	2.90665E-08	7.124	14.248	136.15

α es el coeficiente de temperatura lineal; R_0 es la resistencia medida en Ω a 0°C ; T es la temperatura en $^\circ\text{C}$ o K ; β es el coeficiente de temperatura cuadrática; R es la resistencia medida en Ω ; A , B , C son constantes de Steinhart-hart; R_t es la resistencia en Ω ; α , β y δ son constantes definidos por la norma (IEC- 60751 para platino); k es el factor de cobertura, $k=2$; D es la deriva en el tiempo $\text{K o } ^\circ\text{C}$.

Estas tablas muestran los resultados de la calibración, y se pudo analizar el comportamiento de diferentes sensores de temperatura a lo largo del tiempo, con mayor atención, en la calibración inicial (Exp. 1) y la evolución de su deriva durante un período de tres meses (Exp. 2, Exp. 3 y Exp. 4). A partir de los resultados anteriores se puede observar que la deriva en el tiempo (D) máxima se obtuvo para el PT100 (0.7497) y los termistores presentaron las menores derivas en el tiempo (0.2603, termistor 2k Ω). La deriva en el tiempo es un indicador clave de la estabilidad de los sensores.

Tabla 4.3 Resultados de la calibración del Termopar tipo T.

	$E = C_0 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3 + \dots + C_nT^n$			
Coeficiente	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
C_0	0	0	0	0
C_1	-10.2221008	-13.8354688	-13.1064787	-18.1621729
C_2	341.124141	467.581697	371.088262	526.180693
C_3	-1028.21263	-1581.80623	-1055.71073	-1793.96852
C_4	1255.980599	2153.639797	1121.484134	2449.322502
C_5	-757.519955	-1451.4629	-549.084912	-1652.63871
C_6	240.000454	514.998587	128.145756	586.538195
C_7	-38.3347093	-92.0210057	-12.5492978	-104.740584
C_8	2.43660212	6.51890975	0.26861965	7.40881783
EMC	0.00943	0.01192	0.05852	0.02098
k	0.01887	0.02384	0.11705	0.04197
D ($^\circ\text{C}$)	-	0.4272	0.4086	0.5005

E es la FEM (mV); T es la temperatura en $^\circ\text{C}$; C_1 , C_2 , C_3 ... C_n son los coeficientes polinomiales proporcionados en las tablas para cada tipo de termopar (ASTM E230-17); k es el factor de cobertura, $k=2$; D es la deriva en el tiempo.

Tabla 4.4 Resultados de la calibración del Termopar tipo K.

	$E = C_0 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3 + \dots + C_nT^n$			
Coefficiente	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
C ₀	0.02134085	0.02657139	0.02651001	0.01583695
C ₁	5.37468245	6.66429177	-9.21828325	-6.15621301
C ₂	307.893224	379.009587	705.929637	503.955506
C ₃	-1102.25359	-1518.95371	-3380.06787	-1932.23266
C ₄	1465.24322	2287.610976	6520.306423	2873.723434
C ₅	-938.661358	-1668.77582	-5788.19792	-2088.16711
C ₆	313.213964	634.331884	2550.07417	793.251175
C ₇	-52.5154994	-120.673088	-541.773558	-151.001635
C ₈	3.49894952	9.06306838	44.2390356	11.3525818
EMC	0.00404	0.00388	0.06029	0.00889
k	0.00808	0.00777	0.12059	0.01778
D (°C)	-	0.4293	0.4118	0.4317

E es la FEM (mV); T es la temperatura en °C; C₁, C₂, C₃ ... C_n son los coeficientes polinomiales proporcionados en las tablas para cada tipo de termopar (ASTM E230-17); k es el factor de cobertura, k=2; D es la deriva en el tiempo.

Los PT1000 y PT100 mostraron una precisión aceptable en las condiciones iniciales del experimento 1, con valores de EMC moderados. No obstante, se observó un aumento progresivo en la deriva a lo largo de los experimentos, siendo más elevado en el caso del PT100. Esto propone que, aunque ambos sensores son adecuados para aplicaciones generales su estabilidad a largo plazo puede verse comprometida si no se realiza una recalibración en un tiempo considerado. Los termistores, por otro lado, mostraron un comportamiento más inconsistente. El Termistor de 2kΩ evidenció una deriva que fue relativamente estable y en descenso, lo que sugiere un rendimiento confiable para ciertas aplicaciones. En contraste, el Termistor de 20 kΩ mostró una deriva que era moderadamente alta, pero se mantuvo constante.

Es importante resaltar que el Termistor de 100 kΩ presentó un cambio drástico a partir del segundo mes (Exp. 2) llegando a cifras elevadas (112.09 y 136.15). Esto indica una pérdida grave en el rendimiento del sensor o fallas en las uniones en los conductores, que podría estar relacionada con variaciones de temperatura, un

envejecimiento rápido o fallos internos. Su funcionamiento lo convierte en una opción inapropiada para usos que necesiten precisión o estabilidad a lo largo del tiempo.

En caso de los termopares T y K ofrecieron el rendimiento destacado en general. Los dos mostraron valores de EMC bajos a comparación del resto de sensores, lo cual señala una elevada exactitud en la calibración inicial. Aunque su deriva a lo largo del tiempo fue menor se mantuvo en niveles estables con poca fluctuación en los tres meses. Específicamente, el termopar K presentó la menor deriva acumulada y la mejor estabilidad en general.

Los resultados mostraron diferencias notables entre los tipos de sensores de temperatura evaluados. Estos resultados, muestran que el EMC, obtenido de la calibración, sufre variaciones con el uso en el tiempo. Por lo que, es importante que se realicen periódicamente las calibraciones de los sensores para contar con precisión en las mediciones.

CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

Este estudio presenta el desarrollo de una metodología para la calibración de sensores mediante el desarrollo de un sistema experimental basado en la Norma ASTM E220-19 para disminuir la incertidumbre de medición de diferentes sensores (PT1000, PT100, Termistores y Termopares) empleados en estudios energéticos en viviendas. Se verificó la validez de la propuesta mediante ensayos experimentales controlados, utilizando un baño térmico recirculante y un baño de hielo como puntos de referencia para garantizar condiciones estables y repetibles durante el procedimiento de calibración. A partir del análisis de los resultados obtenidos, se destacan los siguientes hallazgos:

- El sensor PT100 mostró una precisión y estabilidad destacadas a lo largo de todas las pruebas, con ligeras desviaciones con respecto a la temperatura de referencia. Por lo tanto, es especialmente recomendable para aplicaciones industriales exigentes por su confiabilidad en rangos amplios de temperatura.
- Los Termopares Tipo T y K presentaron los menores errores medios cuadráticos y una deriva en el tiempo mínima, lo cual confirma su alta exactitud, incluso tras varios ciclos de calibración. Lo anterior, indica poca deriva en el tiempo y los convierte en sensores ideales para condiciones variables y a largo plazo.
- Los termistores de alta resistencia (20 k Ω y 100 k Ω) mostraron un comportamiento inestable y una deriva considerable, con mayor deriva en el caso del termistor de 100 k Ω . Este mostró una pérdida drástica de confiabilidad a partir del segundo mes (Exp. 2), lo cual, evidencia que no es apto para aplicaciones críticas que exigen estabilidad.

- Con la repetibilidad se observó que incluso en sensores precisos como el PT1000 se tiende a perder exactitud con el tiempo, subrayando la importancia de establecer ciclos regulares de recalibración periódica para mantener la confiabilidad en las mediciones de la temperatura.

La implementación del método de calibración experimental desarrollado ha mostrado ser efectiva para incrementar la exactitud, estabilidad y fiabilidad en la medición de la temperatura de diversos tipos de sensores. Esta técnica no solo posibilita disminuir la incertidumbre, sino también normalizar procedimientos en contextos donde las decisiones operativas se fundamentan en datos térmicos fiables, como en el sector industrial, la investigación científica y la vigilancia del medio ambiente.

5.2 Recomendaciones para trabajos futuros

Como recomendaciones de trabajos a futuro se propone lo siguiente:

- Realizar el análisis del comportamiento de los sensores en condiciones extremas o con interferencias electromagnéticas.
- Evaluar el ciclo de vida útil de los sensores calibrados con esta metodología.
- Desarrollar una plataforma digital de monitoreo remoto que permita el seguimiento continuo de la deriva térmica y emita alertas preventivas de recalibración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alava Zavala B. F., & Villao Alejandro C. J. (2017). Diseño de equipo para calibrar termómetros. (Trabajo de Licenciatura en Ingeniería Mecánica). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. Recuperado de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/41578/1/D-CD88564.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2019). Standard test method for calibration of thermocouples by comparison techniques (ASTM E 220-19).
- ASTM International. (2019). ASTM E220-19: Standard test method for calibration of thermocouples by comparison techniques. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/104214/b16518827d2d4caf8e4e6e30f0b4c7d3/ASTM-E220-19.pdf>
- ASTM International. (2020). *ASTM E1159-15(2020)e1: Standard specification for thermocouple materials, platinum-rhodium alloys, and platinum*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1159-15R20E01>
- ASTM International. (2002). Standard test method for calibration of thermocouples by comparison techniques (Designation E 220 – 02). <https://www.astm.org/>
- Bravo Chavez, L. F., & Peralta Morocho, V. D. (2017). Diseño del control de temperatura en cámaras de refrigeración para almacenamiento de banano (Bachelor's thesis, Espol).
- Chapon P. A., Gauthier A., Bulla J. & Moussay S.(2012). Calibration and performance assessment of a temperature sensor prototype using a 1-point. calibration procedure review of scientific instruments. 83 (114907).(9). Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23206089/>
- Centro Nacional de Metrología. (2013). Guía técnica de trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida en metrología dimensional (Revisión 02). <https://www.cenam.mx/>

- Curro, E. A. V. (2018). Estimación de la incertidumbre y variables de temperatura en la calibración de un medio isoterma (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Mayor de San Marcos)
- Chi Deng, Yun Sheng, Shengyang Wang, Wei Hu, ShengxiDiao & Dahong Qian. 2015 .Un sensor de temperatura inteligente CMOS con Método de calibración de un solo punto para uso clínico. (5).DOI: 10.1109/TCSII.2015.2483419
- Martina gañova, xinlu Wang, zinqian yan, haoqing Zhang, tomas lednický, marie korabecná & pavel neuzil. (2022). Detección de no uniformidad de temperatura en dPCR Calibración de chips y sensores de temperatura. (). 1.(1-8). doi: 10.1039/d1ra08138a
- MetAs & Metrólogos Asociados. (2009). La Guía MetAs: Callendar - Van Dusen. MetAs & Metrólogos Asociados.
- Núñez, C. E. (2008). Termómetros de Mercurio.
- Samuk, D. C., & Çakir, O. New Circuit Design and Implementation for Temperature Measurement based on PT100 Sensor.
- Salomón, Susana E.; Miatello, Roberto (2010) "El termómetro: historia de uno de los instrumentos básicos de la práctica médica cotidiana". En: Revista Médica Universitaria, Vol. 6, no. 1, [8] p.. Dirección URL del artículo: <https://bdigital.uncu.edu.ar/3195>. Fecha de consulta del artículo: 22/01/25.
- Sawan S. G.(2018). Análisis, caracterización y calibración de sensores de bajo coste para Arduino. (trabajo de licenciatura en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática). Universidad de La Laguna. España, san Cristóbal. Recuperado de:<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/10280/Analisis%2C%20caracterizacion%20y%20calibracion%20de%20sensores%20de%20bajo%20coste%20para%20Arduino.pdf>

- Paseltiner D., Payagal S. & Jarrett D. (2017). Diseño, construcción y calibración de un Sistema de monitoreo de temperatura para Estándares de resistencia. *Revista de Investigación del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología*. 122 (45). 9.
- Jhovanny A., Garzón B., Carvajal Perdomo S. A., & Sánchez Morales C. A. (2019). Guía para la calibración de termómetros digitales con sensor tipo prt, termistor y termopar en baños líquidos y hornos de bloque metálico-Revisión (1), (4-34), Recuperado de: https://www.inm.gov.co/web/wp-content/uploads/2019/12/Guia_de-calibracion_de_termometros_digitales2019.pdf?msckid=ccbbe2cda6cf11ec9a2a07f5b098f997
- Septiana r., roihan i., artono koester r. (2020). Prueba de un método de calibración para sensores de temperatura en Diferentes fluidos de trabajo.69(2).(2-9). doi: rg/10.37934/arfmts.68.2.8493
- Koestoer R. A. , saleh Y.A., Roihan I., harinaldi. (2019). Un método sencillo para calibrar el sensor de emperatura DS18B20 resistente al agua en baño de aceite según datos de Arduino Sistema de Adquisición.(1). (2-9) doi: <https://doi.org/10.1063/1.5086553>
- Preston-Thomas, H. (1990). The International Temperature Scale of 1990(ITS-90). *metrologia*, 27(1), 3-10.
- Zepeda Solís, R. E. (s.f.). Control de temperatura en procesos industriales por medio de puerto RS-232 e interfaz LabView (Tesis de licenciatura). Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de :<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/104/1/Tesiszepedasolis.pdf>
- Schmid, W. A., & Lazos, R. J. (2000). Guía para estimar la incertidumbre de la medición. Centro Nacional de Metrología. <https://www.cenam.mx/>
- Fernandois, J. (2000). Spokesman for Democracy. Claude G. Bowers 1878-1958. *Academia Chilena de la Historia. Boletín*, 67(110), 405.
- Zepeda Solís, R. E. Control de temperatura en procesos industriales por medio de puerto RS-232 e interfaz Labview (Doctoral dissertation)

ANEXO

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA BASADO EN LA NORMA ASTM E-220
Autor de la Tesis:	GIULIANI EMMANUEL CRUZ PASCUAL
ORCID:	0009-0000-4516-447X
Resumen de la Tesis:	<p>El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar una metodología de calibración de sensores de temperatura, basada en la norma ASTM E220-19, con el propósito de reducir la incertidumbre de medición en aplicaciones energéticas dentro de edificaciones. Para ello, se implementó un sistema experimental que incluyó un baño térmico recirculante y un baño de hielo, utilizados como puntos de referencia para establecer condiciones controladas durante los ensayos de calibración. La metodología permitió evaluar el comportamiento térmico de distintos sensores, incluyendo PT1000, PT100, termistores de 2 kΩ, 20 kΩ, 100 kΩ y termopares tipo T y K. Las mediciones se realizaron en cuatro intervalos de temperatura (0 °C, 10 °C, 50 °C y 90 °C), repetidas en ciclos mensuales durante un periodo de tres meses. Los resultados mostraron que los sensores PT1000 y PT100 exhibieron buen desempeño en términos de precisión y estabilidad, aunque presentaron cierta deriva con el paso del tiempo. Los termopares tipo T y K registraron los errores medios cuadráticos más bajos y la menor deriva, posicionándose como los más confiables para aplicaciones de largo plazo. En contraste, los termistores de alta resistencia (20 kΩ y 100 kΩ) presentaron un comportamiento inestable, con el termistor de 100 kΩ mostrando una pérdida crítica de confiabilidad a partir del segundo mes. Estos resultados resaltan la importancia de establecer ciclos periódicos de recalibración, incluso en sensores de alta precisión, para asegurar la fiabilidad continua de las mediciones térmicas. En conclusión, la metodología propuesta demostró ser efectiva para incrementar la exactitud y confiabilidad de diferentes tipos de sensores de temperatura. Este enfoque puede ser implementado como una herramienta estandarizada para reducir la incertidumbre de medición en aplicaciones de estudios energéticos en viviendas, así como, en aplicaciones industriales, científicas y de monitoreo ambiental. Se recomienda su implementación con ciclos regulares de recalibración y la exploración futura de su desempeño bajo otros intervalos de temperatura y considerar su automatización vía remota.</p>
Palabras claves de la Tesis:	Calibración, termopar, ASTM, temperatura

Referencias citadas:

- ASTM International. (2019). ASTM E220-19: Standard test method for calibration of thermocouples by comparison techniques. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/104214/b16518827d2d4caf8e4e6e30f0b4c7d3/ASTM-E220-19.pdf>
- ASTM International. (2020). *ASTM E1159-15 (2020) e1: Standard specification for thermocouple materials, platinum-rhodium alloys, and platinum*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1159-15R20E01>
- Centro Nacional de Metrología. (2013). Guía técnica de trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida en metrología dimensional (Revisión 02). <https://www.cenam.mx/>
- Curro, E. A. V. (2018). Estimación de la incertidumbre y variables de temperatura en la calibración de un medio isoterma (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Mayor de San Marcos)
- Martina gañova, xinlu Wang, zinqian yan, haoqing Zhang, tomas lednický, marie korabecná & pavel neuzil. (2022). Detección de no uniformidad de temperatura en dPCR Calibración de chips y sensores de temperatura. (). 1.(1-8). doi: 10.1039/d1ra08138a
- MetAs & Metrólogos Asociados. (2009). La Guía MetAs: Callendar - Van Dusen. MetAs & Metrólogos Asociados.
- Septiana r., roihan i., artono koester r. (2020). Prueba de un método de calibración para sensores de temperatura en Diferentes fluidos de trabajo.69(2).(2-9). doi: rg/10.37934/arfmts.68.2.8493