



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA
E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS**

“ELABORACIÓN DE PROTOTIPO DE CELDA DE PUNTO DE CONGELACIÓN DEL AGUA”

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL**

P R E S E N T A

PRIMITIVO VILLEDA DANIEL ALBERTO

ASESOR:

JESÚS CARLOS SÁNCHEZ OCHOA

PROFESOR DE LA LÍNEA CURRICULAR

MÉXICO, D.F., A 5 DE OCTUBRE DE 2011.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por ser mi mejor amigo, mi fortaleza; por darme todo lo que tengo y permitirme ser todo lo que soy, así como por no dejarme caer nunca.

Al Doctor Jesús Carlos Sánchez Ochoa por asesorarme a lo largo de la tesis y acompañarme en este camino que hoy culmina en el presente proyecto, por compartir su conocimiento conmigo e inspirar en mí mucha admiración.

A mis padres y hermanos por ser los mejores y estar conmigo incondicionalmente, a mis grandes amigos y a todas esas personas importantes en mi vida les doy gracias porque sin ellos y sus enseñanzas y consejos no estaría aquí ni sería quien soy ahora; a ellos les dedico esta tesis.

CONTENIDO

I. LISTA DE TABLAS

II. LISTA DE FIGURAS

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

PÁGINA

CAPÍTULO 1 "METROLOGÍA"

1.1	CONCEPTO DE METROLOGÍA	1
1.2	DIVISIÓN DE LA METROLOGÍA	5
1.2.1	METROLOGÍA CIENTÍFICA	1
1.2.2	METROLOGÍA INDUSTRIAL	1
1.2.3	METROLOGIA LEGAL	1
1.3	IMPORTANCIA DE LA METROLOGÍA	3
1.4	HISTORIA DE LA METROLOGÍA	3
1.5	LA METROLOGÍA EN MÉXICO	5
1.6	DÍA INTERNACIONAL DE LA METROLOGÍA	5
1.7	CONVENCIÓN DEL METRO	6
1.8	SISTEMA DE UNIDADES	6
1.8.1	SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES	7
1.8.2	REGLAS DE ESCRITURA DE SÍMBOLOS DE UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL	9
1.8.3	SISTEMA INGLÉS DE UNIDADES	10
1.9	CENTROS DE METROLOGÍA	10
1.10	CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA (CENAM)	11
1.10.1	ÁREAS DEL CENAM	11
1.10.1.1	ÁREA DE METROLOGÍA ELÉCTRICA	11
1.10.1.2	ÁREA DE METROLOGÍA FÍSICA	12
1.10.1.3	ÁREA DE METROLOGÍA DE MATERIALES	13
1.10.1.3.1	DIVISIÓN DE MATERIALES METÁLICOS	13
1.10.1.3.2	DIVISIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS	14
1.10.1.3.3	ÁREA DE MATERIALES ORGÁNICOS	14
1.10.1.4	ÁREA DE METROLOGÍA MECÁNICA	14
1.10.1.4.1	DIVISIÓN DE METROLOGÍA DIMENSIONAL	15
1.10.1.4.2	DIVISIÓN DE METROLOGÍA DE MASA Y DENSIDAD	15
1.10.1.4.3	DIVISIÓN DE METROLOGÍA DE FUERZA Y PRESIÓN	16
1.10.1.4.4	DIVISIÓN DE METROLOGÍA DE FLUJO Y VOLUMEN	16

CAPÍTULO 2 “TEMPERATURA”

2.1 CONCEPTO DE TEMPERATURA	18
2.2 EQUILIBRIO TÉRMICO	19
2.3 LEY CERO DE LA TERMODINÁMICA	20
2.4 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA	21
2.5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA	21
2.5.1 TERMÓMETROS DE VIDRIO	21
2.5.2 TERMÓMETROS BIMETÁLICOS	22
2.5.3 TERMÓMETROS DE SISTEMAS LLENOS	23
2.5.4 TERMOPARES	25
2.5.4.1 CLASIFICACIÓN DE TERMOPARES SEGÚN EL TIPO DE JUNTA	28
2.5.5 PIRÓMETROS	29
2.5.6 TERMÓMETROS DE RESISTENCIA	29
2.5.6.1 PLATINO	30
2.5.6.2 COBRE	31
2.5.6.3 TUNGSTENO	31
2.6 ESCALAS DE TEMPERATURA	31
2.6.1 ESCALA CELSIUS	31
2.6.2 ESCALA FAHRENHEIT	32
2.6.3 ESCALA KELVIN	32
2.7 CONVERSIÓN DE ESCALAS DE TEMPERATURA	33

CAPITULO 3 “PUNTOS FIJOS”

3.1 PATRONES DE MEDICIÓN	34
3.1.1 PATRONES INTERNACIONALES	35
3.1.2 PATRONES PRIMARIOS	35
3.1.3 PATRONES SECUNDARIOS	35
3.1.4 PATRONES DE TRABAJO	35
3.2 PUNTOS FIJOS DE LA TEMPERATURA	35
3.3 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA	36
3.4 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1927	37
3.5 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1948	37
3.6 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1968	38
3.7 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1990	38

3.8 CELDA DE PUNTO TRIPLE DEL AGUA	41
CAPÍTULO 4 “ELABORACIÓN DE PROTOTIPO DE CELDA DE PUNTO DE CONGELACIÓN DEL AGUA”	
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA CELDA	42
4.2 PRUEBAS EN DIVERSOS MATERIALES	44
4.3 PREPARACIÓN DE LA CELDA	45
4.4 PRUEBAS Y ENSAYOS	48
4.5 PREPARACIÓN PARA LAS LECTURAS	50
4.6 MEDICIONES DE TEMPERATURA	53
4.7 RESULTADOS	55
CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71
GLOSARIO	72
ANEXOS	73
LISTA DE TABLAS	
TABLA1 UNIDADES BÁSICAS DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES	7
TABLA 2 UNIDADES DEL SISTEMA INGLÉS	10
TABLA 3 RANGO DE MEDICIÓN DEL TERMÓMETRO DE LÍQUIDO	21
TABLA 4 RELACIÓN ENTRE ESCALAS	33
TABLA 5 PUNTOS FIJOS FUNDAMENTALES EN ESCALA DE TEMPERATURA DE 1927	37
TABLA 6 PUNTOS FIJOS DE EPTI-68	38
TABLA 7 PUNTOS FIJOS UTILIZADOS EN LA ITS-90	39
TABLA 8 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN # 1 EN CELDA DE AGUA POTABLE	56
TABLA 9 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN # 2 EN CELDA DE AGUA POTABLE	58
TABLA 10 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN # 3 EN CELDA DE AGUA POTABLE	59
TABLA 11 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN # 4 EN CELDA DE AGUA POTABLE	61
TABLA 12 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN # 1 EN CELDA DE AGUA DESIONIZADA	63
TABLA 13 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN # 2 EN CELDA DE AGUA DESIONIZADA	65
TABLA 14 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN # 3 EN CELDA DE AGUA DESIONIZADA	66
TABLA 15 RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN # 4 EN CELDA DE AGUA DESIONIZADA	68

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA	11
FIGURA 2 EQUILIBRIO TÉRMICO	19
FIGURA 3 LEY CERO DE LA TERMODINÁMICA	20
FIGURA 4 TERMÓMETRO DE VIDRIO LLENO DE MERCURIO	22
FIGURA 5 ESQUEMA DE TERMÓMETRO BIMETÁLICO	22
FIGURA 6 TERMÓMETRO DE SISTEMA LLENO	23
FIGURA 7 SISTEMAS CLASE III (BULBO LLENO DE GAS)	25
FIGURA 8 SISTEMA CLASE IV	25
FIGURA 9 TERMOPAR	26
FIGURA 10 TERMOPAR TIPO E (CROMEL-CONSTANTAN)	26
FIGURA 11 TERMOPAR TIPO T (COBRE-CONSTANTAN)	27
FIGURA 12 TERMOPAR TIPO J (HIERRO-CONSTANTAN)	27
FIGURA 13 TERMOPAR TIPO K (CROMEL –ALUMEL)	27
FIGURA 14 JUNTA EXPUESTA	28
FIGURA 15 JUNTA SIN ATERRAR	28
FIGURA 16 JUNTA ATERRADA	29
FIGURA 17 TERMÓMETROS DE RESISTENCIA	30
FIGURA 18 TUBO SELECCIONADO Y TAPA DONDE SERÁ INSERTADO	43
FIGURA 19 APARIENCIA DEL FONDO DE LA BOTELLA TRAS CONGELACIÓN	44
NÚMERO 6	
FIGURA 20 LIMPIEZA DE TUBO PARA REDUCIR IMPUREZAS EN EL MISMO	46
FIGURA 21 LIENADO DE CELDA (AGUA DESIONIZADA)	46
FIGURA 22 LIMPIEZA DE TUBO CON AGUA EN EBULLICIÓN	47
FIGURA 23 DESPLAZAMIENTO PRESENTADO EN TUBO POR EFECTO DE EXPANSIÓN DEL HIELO	48
FIGURA 24 VOLUMEN SELECCIONADO PARA LLENADO DE CELDA	49
FIGURA 25 ELEMENTO EMPLEADO PARA SUJETAR A TUBO DURANTE CONGELACIÓN	50
FIGURA 26 CONGELADOR UTILIZADO EN ELABORACIÓN DE CELDA	50
FIGURA 27 FORMACIÓN DE LA INTERFASE	51
FIGURA 28 BAÑO DE HIELO APLICADO A LA CELDA	52
FIGURA 29 LLENADO DE POZO DE CELDA PARA LOGRAR EL EQUILIBRIO TÉRMICO	53
FIGURA 30 TERMÓMETRO DE RESISTENCIA F-100 UTILIZADO EN LA TOMA DE LECTURAS DE TEMPERATURA	53
FIGURA 31 TERMÓMETRO CONECTADO A PC PARA REGISTRO DE LECTURAS	55
FIGURA 32 CONSERVACIÓN DE FASE SÓLIDA POR BAÑO DE HIELO	56

FIGURA 33 GRÁFICA DE VALORES PRESENTADOS EN EXPERIMENTACIÓN # 1 EN CELDA DE AGUA POTABLE	57
FIGURA 34 GRÁFICA DE VALORES PRESENTADOS EN EXPERIMENTACIÓN # 2 EN CELDA DE AGUA POTABLE	58
FIGURA 35 GRÁFICA DE VALORES PRESENTADOS EN EXPERIMENTACIÓN # 3 EN CELDA DE AGUA POTABLE	60
FIGURA 36 GRÁFICA DE VALORES PRESENTADOS EN EXPERIMENTACIÓN # 4 EN CELDA DE AGUA POTABLE	62
FIGURA 37 GRÁFICA DE VALORES OBTENIDOS EN EXPERIMENTACIÓN # 1 EN CELDA DE AGUA DESIONIZADA	64
FIGURA 38 GRÁFICA DE VALORES OBTENIDOS EN EXPERIMENTACIÓN # 2 EN CELDA DE AGUA DESIONIZADA	65
FIGURA 39 GRÁFICA DE VALORES OBTENIDOS EN EXPERIMENTACIÓN # 3 EN CELDA DE AGUA DESIONIZADA	67
FIGURA 40 GRÁFICA DE VALORES OBTENIDOS EN EXPERIMENTACIÓN # 4 EN CELDA DE AGUA DESIONIZADA	68
FIGURA 41 BAÑO REFRIGERANTE HIELO-SAL	75
FIGURA 42 BAÑO REFRIGERANTE HIELO SECO	75
FIGURA 43 BAÑO REFRIGERANTE NITRÓGENO LÍQUIDO	76
FIGURA 44 BAÑO REFRIGERANTE MEZCLA HIELO-AGUA	76
FIGURA 45 TERMÓMETRO COLOCADO EN BAÑO REFRIGERANTE HIELO-AGUA	77

RESUMEN

La temperatura es una magnitud que resulta de gran interés en muchos procesos tanto científicos como industriales y tecnológicos.

Es por esto que las mediciones de temperatura así como de otras magnitudes, y en general todo aquello en lo que éstas tengan injerencia, requieren de un alto nivel de exactitud; en estas mediciones se exige el uso de patrones de alta calidad metrológica comúnmente conocidos como patrones nacionales de medición.

El Centro Nacional de Metrología (CENAM) es el organismo encargado de mantener los patrones nacionales de temperatura y de otras magnitudes de gran importancia tanto para el sector productivo como para el científico.

El CENAM mantiene el patrón nacional de temperatura de acuerdo con la Escala Internacional de Temperatura de 1990, con el fin de disminuir el grado de incertidumbre que presentan los instrumentos de medición de temperatura.

En la Escala Internacional de Temperatura establecida en 1990 están definidos 17 puntos fijos, de los cuales 14 se refieren al equilibrio de fases (puntos triples de fusión y de solidificación). Uno de los más utilizados para la calibración de termómetros de resistencia de platino es el punto triple del agua, el cual puede representarse mediante la fabricación de una celda de punto triple del agua. Sin embargo, los costos de fabricación de ésta resultan ser muy elevados.

Por tal motivo, se desarrolló un prototipo de celda de punto de congelación del agua, mismo que puede tomar la función de un medio de calibración como lo es una celda de punto triple pero con costos relativamente bajos.

En esta celda de punto de congelación del agua se realizaron pruebas de materiales para determinar el grado de resistencia de los mismos, además de procesos de experimentación empleando agua con distintos grados de pureza (agua potable y desionizada). Se determinó cuál de estos líquidos se aproximaba y mantenía una constante al punto de congelación del agua, el cual se encuentra a los 0.01°C y presentaba un menor número de variaciones respecto de este valor. Esto con el fin de determinar si el empleo y la reproducibilidad del prototipo de la celda seguiría siendo viable o no, y de determinar a su vez el tipo de agua con el cual se llenaría la celda.

INTRODUCCIÓN

Debido a la gran utilidad de la temperatura para el sector industrial y científico, se requiere de un alto nivel de precisión y exactitud en los instrumentos que son utilizados para su medición.

Por tal motivo, un instrumento de medición que no cuente con un certificado de calibración es poco confiable para los fines antes mencionados. Toda calibración requiere de una serie de operaciones mediante las cuales son comparados los valores indicados por el instrumento –o los valores representados por un material de referencia- y los valores conocidos correspondientes a una magnitud de medida o patrón. Ello asegurando la trazabilidad de las medidas a las correspondientes unidades a manejar.

Un ejemplo de lo anterior es la Escala Internacional de Temperatura establecida en 1990, misma que utiliza el punto triple del agua para la calibración de termómetros de resistencia de platino. Éstos son a su vez utilizados para calibrar otros instrumentos de medición de temperatura debido a su alta linealidad entre valores de resistencia con respecto de la temperatura. Con base en esto se establecen incertidumbres iguales o mayores respecto de los otros instrumentos, que deben ser indicadas en cada uno de éstos y avaladas mediante un certificado de calibración.

La celda de punto triple del agua es un elemento que permite reproducir este punto fijo; en ella se lleva a cabo la calibración del termómetro de resistencia de platino que servirá como patrón para la posterior calibración de otros elementos de medición de temperatura. Su elaboración requiere de procesos prolongados y conlleva costos demasiado elevados; por tal motivo se desarrolló un prototipo de celda de punto de congelación de agua mediante el cual se plantea alcanzar –o acercarse- al punto triple del agua. De ser esto posible, la celda ejercería la misma función que la celda de punto triple: la calibración de instrumentos de medición de temperatura.

Asimismo, el desarrollo de este prototipo de celda resulta ser más conveniente en otros aspectos, como los costos de elaboración y el tiempo de construcción.

El presente trabajo muestra de manera ordenada el diseño y la fabricación de las celdas de punto de congelación del agua, los materiales utilizados en su construcción y los resultados experimentales obtenidos en dichas celdas, con la pretensión de establecer un nuevo patrón de calibración para los instrumentos de medición de temperatura

CAPÍTULO 1

“METROLOGÍA”

Durante mucho tiempo, el hombre ha tenido la necesidad de cuantificar y de otorgarle un valor numérico a la realización de sus experimentos o a simples mediciones.

Representar mediciones en la actualidad, ya sean experimentales o propias de la vida cotidiana, sin asignarles un valor de acuerdo con el tipo de magnitud a medir resulta de poca utilidad. Es por este motivo que la metrología juega un valor importante en la vida del ser humano, ya que sin ésta no existiría un estudio serio ni una aplicación de las unidades de medición correspondientes a cada una de las magnitudes susceptibles de ser medidas. De este modo, es posible asignar a cada una su valor numérico y su unidad correspondiente.

La metrología ocupa un lugar importante dentro de la sociedad; cada persona, institución, empresa u organización requiere mediciones que resultan de gran relevancia para el desarrollo de sus sistemas de calidad.

Por tal motivo, el estudio y la aplicación de la metrología en cualquier país, ciudad o estado son necesarios para el progreso y desarrollo de las sociedades en el seno de un mundo globalizado.

1.1 CONCEPTO DE METROLOGÍA

Hoy día no se cuenta con una definición clara de la metrología. Considerando aspectos tanto teóricos como prácticos, así como los campos de aplicación de las mediciones, podemos definir a la metrología como la ciencia que tiene por objeto de estudio a todas las propiedades medibles así como a escalas, sistemas, métodos y técnicas de medición [2].

La metrología es considerada la ciencia de las mediciones, mismas que forman parte permanente de la vida cotidiana, al buscar nuevos patrones y nuevas formas de medir como parte del progreso y la evolución.

Las mediciones constituyen una parte importante de todos los procesos productivos, industriales y científicos. Cualquiera de los anteriores tiene necesidades metrológicas, por lo que la aplicación y el estudio de la metrología es muy conveniente para su correcto desempeño y aplicación. Por tal razón, la metrología está íntimamente ligada al desarrollo de la sociedad y de los individuos que la conforman.

1.2 DIVISIÓN DE LA METROLOGÍA

Actualmente, la metrología se encuentra dividida en 3 categorías, cada una de ellas con su respectivo nivel de complejidad y de exactitud. Estas categorías son:

- Metrología científica
- Metrología industrial
- Metrología legal

1.2.1 METROLOGÍA CIENTÍFICA

La metrología científica es la rama de la metrología encargada de la organización y el desarrollo de los patrones de medida. Se ocupa principalmente de los problemas teóricos y prácticos relacionados con las unidades de medida. La principal función de la metrología científica es el desarrollo de patrones primarios nacionales e internacionales, con los cuales se sostienen todas las actividades de la metrología.

La metrología científica es generalmente desarrollada en laboratorios e institutos oficiales de cada país, denominados institutos nacionales de metrología [2].

1.2.2 METROLOGÍA INDUSTRIAL

La metrología industrial se encarga de las medidas aplicadas en la producción y el control de calidad, como lo son procedimientos, control de procesos de medición y calibración de equipos de medición.

Sin el empleo de la metrología industrial, el sector productivo no podría desarrollar la producción en serie. Esto es debido a que no podría calibrar, controlar y mantener en óptimas condiciones los equipos de medición utilizados en los procesos de obtención de los productos; sin dichos equipos, no se podría asegurar que los productos están hechos conforme a normas establecidas [2].

1.2.3 METROLOGÍA LEGAL

La metrología legal contempla los procedimientos legislativos, administrativos y técnicos que permiten asegurar la calidad y credibilidad de las mediciones relacionadas con los patrones nacionales, el comercio, la seguridad y el ambiente.

Además, la metrología legal proporciona las herramientas necesarias para garantizar equidad en las relaciones comerciales, logrando que, cuando surjan conflictos de interés o se arrojen resultados incorrectos en mediciones, se garantice que se lleven a cabo las correcciones pertinentes en los resultados obtenidos [2].

1.3 IMPORTANCIA DE LA METROLOGÍA

Las mediciones tienen un valor importante en la vida diaria de las personas. Desde tomar una distancia hasta realizar procedimientos experimentales, resultan de gran relevancia para efectos de comprobación de resultados.

Asimismo, las mediciones son un medio para describir magnitudes de manera cuantitativa; por tal motivo, la metrología tiene un valor muy importante en el desarrollo de la sociedad.

Los avances científicos y tecnológicos están íntimamente vinculados al empleo de la metrología. Ésta ejerce un gran impacto sobre las actividades industriales, científicas y comerciales, puesto que todas ellas requieren de la aplicación de mediciones. En cada una de estas actividades se requiere de un cierto grado de exactitud que asegure la confiabilidad de resultados, valores y productos obtenidos.

Dentro del sector productivo, la metrología permite a las empresas cumplir con los requerimientos de calidad. Se trata de la única herramienta objetiva para medir la calidad de los productos, y que permite cumplir con la serie de estándares de calidad de los productos elaborados por las empresas. Esto a su vez permite a las empresas mantener la competitividad.

La búsqueda permanente de calidad ha impulsado a las empresas a buscar la mejora continua de sus actividades y procedimientos, razón por la cual éstas emplean parámetros de medición que permiten comparar lo que se llevaba a cabo con los cambios implementados.

Como resultado de la mejora continua de sus actividades, las empresas amplían sus facilidades de producción, lo cual brinda la oportunidad de crecer y de ampliar el mercado para sus productos. De este modo, la población puede consumir productos que cumplan con las normas y especificaciones oficiales de salud, calidad y seguridad.

Por tal razón, la ciencia de la metrología resulta de gran importancia para el desarrollo del ser humano y de las actividades que éste realiza.

1.4 HISTORIA DE LA METROLOGÍA

Desde sus inicios, el hombre ha sentido la necesidad de medir. Muchas de las unidades de medición antiguas derivan de las partes del cuerpo humano; un ejemplo de ello es el empleo del pie para medir longitudes.

Sin embargo, estos métodos de medición se toparon con un problema: los cuerpos de las personas tienen dimensiones diferentes. Por tal motivo, el hombre tuvo que buscar una manera más precisa y concreta de medir las distintas magnitudes que existen, buscando instrumentos adecuados para llevar a cabo dichas mediciones.

El primer patrón de medida del que se tiene constancia es el pie del príncipe de Gudea de Lagash. La medida consiste en una regla colocada sobre el regazo de la estatua del príncipe, la cual data del año 2050 a.C. y mide alrededor de 26.5 cm.

El patrón de longitud utilizado en algunos reinos de Europa occidental se basaba en la dimensión del pie del rey en turno. El problema que presentaba dicho patrón era que, si el rey fallecía y era sustituido por otro, el patrón tenía que ser cambiado.

Con el progreso de la agricultura y el comercio fue preciso realizar mediciones más exactas; para ello se establecieron procedimientos que permitían realizarlas de un modo más confiable. Estudios arqueológicos encontraron que civilizaciones muy antiguas tenían presentes los conceptos de pesar y medir, y debido a esto se hizo necesario disponer de medidas uniformes que permitieran el intercambio comercial.

En el año 1300, la realeza británica ordenó que las pesas y medidas tuvieran un gran número de definiciones de medición para ser utilizadas en el reino. Ésta resultó una tentativa para regularizar o estandarizar el uso de dichas medidas; tomando en cuenta los buenos resultados obtenidos con esta acción, la misma fue aplicada por más de 600 años.

En el año 1790, la asamblea francesa encargó a la academia de ciencias el desarrollo de un sistema de unidades decimal simple. Una comisión designada por la academia creó un sistema sencillo y científico cuya unidad de longitud era una porción de la circunferencia de la tierra y a la que se confirió el término de metro. Este nombre fue derivado del *metrón* griego, mismo que significa “una medida”. El metro debía igualar a la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre. Las medidas para volumen y masa debían derivarse de la unidad de longitud.

Este proceso culminó, el 22 de junio de 1799, en la proclamación del sistema métrico con la entrega de los patrones del metro y kilogramo a los archivos de la república. Tal acontecimiento fue presenciado por funcionarios del gobierno francés y de varios países invitados, además de por muchos sabios de la época.

Dicho sistema métrico entró en vigor durante la Revolución Francesa, para la cual se requería la normalización de piezas mecánicas como tornillos, tuercas y otra más de gran importancia para el desarrollo industrial. Estas piezas dependían de mediciones más precisas, por lo cual fue necesario el empleo del sistema métrico decimal.

En 1875, Francia dio a conocer de manera oficial el sistema métrico decimal con la celebración de la Convención del Metro. Los países que firmaron el tratado se comprometieron a sostener gastos comunes así como una estructura científica, técnica y administrativa que implicaba el establecimiento, mejoramiento y difusión de las unidades adoptadas por este sistema. Con ello se creó la Conferencia General de Pesas y Medidas junto con la Oficina Internacional de Pesas y Medidas. De esta manera, se dio comienzo al estudio a profundidad de la metrología [2].

1.5 LA METROLOGÍA EN MÉXICO

A pesar de que la metrología es considerada en el mundo la ciencia de las mediciones, en México no es reconocida como tal por el sector productivo industrial – aun cuando México forma parte de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas desde 1890-.

Sin embargo, en México como en cualquier parte del mundo, un gran número de mediciones son aplicadas en el sector productivo, y un mal manejo de las mismas podría causar un grave impacto económico y social en el país.

Únicamente una pequeña parte de las industrias mexicanas ha podido entender la importancia que ejerce la metrología en el desarrollo de la industria, al ser ésta aplicada en el empleo de instrumentos adecuados en la medición del control de la calidad.

De esta manera, al reconocerse la metrología como parte importante de la industria nacional e integrarla a la misma, tanto el control de procesos como el de productos cumplen con las expectativas y requerimientos del cliente, garantizando transacciones futuras y nuevos clientes y, por último, participando en el desarrollo económico y comercial del país.

Por el contrario: si se genera incumplimiento en la calidad de los productos, se conseguirá rechazo por parte de los clientes. La propaganda negativa de la industria afectaría así el desarrollo económico del país, provocando a su vez consecuencias en otras esferas.

Resulta evidente el trabajo que es preciso desarrollar en el campo de la metrología en México, con el fin de lograr el bienestar económico y social. Es necesario trabajar en el desarrollo y la difusión de una cultura metrológica nacional.

1.6 DÍA INTERNACIONAL DE LA METROLOGÍA

El 20 de mayo de cada año, más de ochenta naciones celebran el Día Internacional de la Metrología, conmemorando con ello la firma de la Convención Internacional del Metro.

El Día Internacional de la Metrología fue instituido en 1999 por el Comité Internacional de Pesas y Medidas. Con este día se reconoce la importancia ejercida por la metrología en la vida diaria de las personas así como en el progreso de la humanidad, siendo uno de los pilares esenciales en el desarrollo social y tecnológico de la civilización moderna.

1.7 CONVENCION DEL METRO

En 1875 en Francia se dio a conocer oficialmente el sistema métrico decimal con la celebración de la llamada Convención del Metro. La Convención del Metro fue un acuerdo diplomático firmado por varios países el 20 de mayo de 1875. En él, 17 países, como resultado de las inquietudes científicas y comerciales y de la necesidad de unificar los sistemas de pesas y medidas, optaron por la aplicación internacional del sistema métrico. Francia se convirtió así en el foco de una intensa actividad dirigida a la generalización de este sistema.

Los países que firmaron el tratado se comprometieron a sostener gastos comunes así como a invertir en estructura científica, técnica y administrativa, lo que implicaba el establecimiento, mejoramiento y la difusión de las unidades de este sistema.

Otra aportación muy importante de la Convención del Metro fue la creación de la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) y de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM).

La primera disposición de carácter oficial relativa al uso del sistema métrico decimal con la que contó México se presentó en la circular N° 94 del Fomento, Colonización, Industria y Comercio. Esto sucedió el 20 de febrero de 1856, año en el que México se sujetó a dicho sistema.

El 9 de julio de 1883, durante el gobierno del General Gonzalez, se dio inicio a las gestiones pertinentes para que México se adhiriese a la Convención del Metro.

Gustavo Baz, ministro de México en París, anunció el 4 de agosto de 1890 la incorporación de México a la Convención Internacional del Metro. Ese mismo año, el Comité Internacional de Pesas y Medidas reconoció que desde el 15 de marzo de 1857, el sistema métrico decimal había entrado legalmente en vigor en el país. México fue integrado a la Convención del Metro el 30 de diciembre de 1890.

1.8 SISTEMA DE UNIDADES

Para medir una magnitud física suele ser necesaria la definición de una unidad de medición. Estas unidades pueden ser definidas de modo directo con respecto de patrones.

Los sistemas de unidades son conjuntos de unidades utilizados en la medición de diversas magnitudes.

Existen diferentes sistemas de unidades; la elección de ellos depende en gran medida de factores como el origen histórico, la posición geográfica y la precisión.

1.8.1 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Todas las ciencias, como es el caso de la química y la física, se basan en observaciones cuantitativas de magnitudes, mismas que reciben el nombre de medidas. La medida de cualquier magnitud queda expresada por un número que va acompañado de una unidad, la cual proporciona un significado específico a dicho número.

La medida queda definida entonces como la comparación de la cantidad de una magnitud determinada con otra cantidad de la misma magnitud que se toma como unidad.

El Sistema Internacional de Unidades, también conocido como Sistema Internacional de Medidas, es el sistema de unidades ampliamente usado a nivel mundial. Fue creado en el año de 1960 por la Conferencia Nacional de Pesas y Medidas, en la cual inicialmente se definieron seis unidades físicas básicas, y siendo hasta 1971 cuando fue añadida una séptima unidad básica, el mol.

Tabla 1. Unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades

Magnitud física básica	Unidad básica	Símbolo
Longitud	Metro	m
Tiempo	Segundo	s
Masa	Kilogramo	Kg
Intensidad de corriente eléctrica	Amperio	A
Temperatura	Kelvin	K
Cantidad de sustancia	Mol	mol
Intensidad luminosa	Candela	cd

Las definiciones adoptadas por la Conferencia General de Pesas y Medidas para cada una de las unidades son las siguientes:

- El metro: se define como la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío en un lapso de $1/299792458$ de segundo (17ª Conferencia General de Pesas y Medidas, llevada a cabo en 1983).
- El kilogramo: se define como la masa igual a la del prototipo internacional del kilogramo (1ª y 3ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1889 y 1901).
- El segundo: se define como la duración de 9,192,631,770 periodos de la radiación correspondientes a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133 (12ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967).
- El kelvin: se define como la fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (13ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967).

- El ampere: se define como la intensidad de una corriente constante que, mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y colocados a un metro de distancia entre sí en el vacío, produciría entre dichos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud (9ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1948).
- El mol: se define como la cantidad de materia que contiene tantas unidades elementales como átomos existen en 0.012 kilogramos de carbono 12 (14ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1971).
- La candela: se define como la intensidad luminosa en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz, y cuya intensidad energética en esa dirección es de 1/683 watt por estereorradián.

Las unidades del sistema internacional están basadas en fenómenos físicos fundamentales, exceptuando la unidad de la magnitud masa, pues el kilogramo es definido por la masa del prototipo internacional del kilogramo.

El Sistema Internacional de Unidades (SI) se ha convertido en la base fundamental de las medidas científicas de todo el mundo. Se utiliza de igual forma para el comercio en casi todos los países del mundo, excepto en los Estados Unidos.

El SI es el único sistema de medición reconocido internacionalmente. Por tal motivo, las unidades del SI son la referencia internacional de los instrumentos de medida, con los cuales se pueden realizar comparaciones y calibraciones de los instrumentos de medición de cada una de estas magnitudes [1].

1.8.2 REGLAS DE ESCRITURA DE SÍMBOLOS DE UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL.

El Sistema Internacional cuenta con reglas propias para la escritura de los símbolos representativos de sus unidades fundamentales, evitando con ello confusiones y facilitando la comunicación [2].

El reglamento para la escritura de símbolos representativos de las unidades fundamentales del Sistema Internacional es muy amplio, por lo que éste se simplificará dando referencia a las reglas más importantes del mismo. Éstas quedan descritas a continuación:

1. El uso de unidades que no pertenecen al Sistema Internacional debe quedar limitado sólo a las unidades que han sido aprobadas por la Conferencia General de Pesas y Medidas.
2. Los símbolos representativos de cada una de las unidades deben escribirse con minúscula, a excepción de las que se derivan de nombres propios. No deben utilizarse abreviaturas en los mismos.
3. No deben sustituirse minúsculas por mayúsculas, ya que de hacerlo podría alterarse el significado.
4. Los símbolos de las unidades se escriben después del valor numérico, dejando un espacio entre éste y el símbolo. Se hace una excepción en el uso de los símbolos de grado, minuto y segundo; en éstos no se dejará espacio alguno.
5. Cuando exista confusión entre el símbolo l de litro y la cifra 1, se puede escribir el símbolo L, aceptado por la Conferencia General de Pesas y Medidas.

1.8.3 SISTEMA INGLÉS DE UNIDADES

El sistema inglés de unidades, también conocido como sistema imperial, es un sistema de unidades ampliamente usado en Estados Unidos e Inglaterra, así como en algunos países del Caribe y de Sudamérica con tradiciones británicas.

El sistema inglés deriva de la evolución a través de los años de las unidades locales y de los intentos de estandarización en Inglaterra.

Los siguientes son ejemplos de las unidades usadas para diferentes magnitudes:

TABLA 2. Unidades del sistema inglés

MAGNITUD	UNIDAD
Longitud	Pulgada, Pie, Yarda, Milla
Masa	Slug, libra
Tiempo	Segundo, Minuto, Hora
Fuerza	Libra fuerza, Kilopound
Presión	psi
Temperatura	°F

Debido a la estrecha relación comercial que existe entre México y Estados Unidos, muchos de los productos producidos en el país cuentan con especificaciones en las que son utilizadas unidades de este sistema.

1.9 CENTROS DE METROLOGÍA

Los centros de metrología son organismos encargados del estudio y la aplicación de los sistemas de medidas en varios campos de la ciencia. Además de todas estas actividades, son los encargados de mantener los patrones de medida, de certificar y desarrollar materiales de referencia.

Debido a la globalización comercial, científica y tecnológica, los requisitos de calidad impuestos a nivel mundial –principalmente en el sector industrial- han propiciado que los centros de metrología adopten una actividad de gran importancia: la calibración de los instrumentos de medición. Algunas de las principales áreas de calibración son temperatura, fuerza, masa, presión, acústica y electricidad.

La calibración requiere la elaboración y aplicación de planes de calibración, redacción de instructivos, evaluación de resultados y asesoramiento técnico por parte de los centros de metrología a las empresas que requieran este servicio, certificando y acreditando a su vez a aquellas empresas que deseen brindar el servicio de calibración dentro del sector industrial y científico. Para ello, dichas empresas deberán cumplir previamente con los requerimientos establecidos por cada centro de metrología.

1.10 CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

El Centro Nacional de Metrología (CENAM) es el laboratorio nacional en materia de medidas en México, dependiente de la Secretaría de Economía. El CENAM es el encargado de establecer y mantener los patrones de medida en México, además de ofrecer otros servicios metroológicos como la calibración de instrumentos y patrones, la certificación y el desarrollo de materiales de referencia, así como cursos especializados de metrología.

El CENAM mantiene un estrecho contacto con otros laboratorios nacionales y organismos internacionales relacionados con la metrología, ello con el fin de asegurar el reconocimiento internacional de los patrones nacionales empleados en México y de promover la aceptación de los productos y servicios ofrecidos por este país.



Figura I. Centro Nacional de Metrología

1.10.1 ÁREAS DEL CENAM

1.10.1.1 ÁREA DE METROLOGÍA ELÉCTRICA

El área de metrología eléctrica está constituida por tres divisiones: tiempo y frecuencia, mediciones electromagnéticas y termometría.

La primera actividad de esta área está orientada al desarrollo de patrones nacionales de mediciones eléctricas, mismas que son una garantía de la confiabilidad metroológica de los servicios de medición y calibración que ofrece esta área.

En la división de termometría se han desarrollado celdas de agua que permiten la materialización del kelvin, además de contar con la reproducción de 9 de los 17 puntos de la Escala Internacional de Temperatura de 1990.

Por otro lado, en la división de tiempo y frecuencia se ha logrado la caracterización del reloj atómico de bombeo óptico, que permite la reproducción del segundo con una incertidumbre mejor que algunas partes en 10^{14} .

En la división de mediciones electromagnéticas se ha conseguido desarrollar la reproducción del volt y del ohm mediante los efectos cuánticos Josephson y Hall, respectivamente. A la fecha se cuenta con 11 patrones nacionales de mediciones eléctricas.

La segunda actividad desarrollada es la transferencia de conocimientos en metrología mediante servicios especializados de medición y la calibración de instrumentos y patrones de medición.

El avance de las tecnologías de medición en electromagnetismo, termometría y tiempo y frecuencia son una evidencia de la necesidad de asegurar el conocimiento sobre lo que se desea medir y sobre los métodos de medición más adecuados para ello.

El área de metrología eléctrica está constituida actualmente por 40 personas, de las cuales 12 cuentan con un doctorado en Ciencias, 5 con un grado de maestría y 18 con licenciatura en Física e Ingeniería. El resto de las personas cuenta con un grado técnico [1].

1.10.1.2 ÁREA DE METROLOGÍA FÍSICA

Esta área tiene como principal objetivo establecer patrones de medida para fenómenos relacionados con la generación y propagación de formas de energía ondulatoria.

Dentro del área de metrología física se encuentran 2 grandes divisiones: la de óptica y radiometría y la de vibraciones y acústica.

La división de óptica y radiometría tiene a su cargo el establecimiento y mantenimiento de los patrones nacionales en los campos de fotometría, radiometría, espectrofotometría, polarimetría, refractometría, optoelectrónica y fibras ópticas. Entre los sectores beneficiados por estos patrones se encuentran; salud, farmacéutico, petroquímico, textil, pinturas, iluminación y telecomunicaciones, entre otros.

La infraestructura empleada para el mantenimiento de los patrones y su disseminación consta de fuentes de emisión altamente estables, detectores ópticos de diversos tipos, sistemas de caracterización, transferencia automatizada y materiales de referencia para espectrofotometría, polarimetría y refractometría, con los cuales se proporcionan los diferentes servicios de calibración.

La división de vibraciones y acústica tiene a su cargo patrones nacionales de aceleración y de acústica, los cuales ejercen un gran impacto en mediciones que repercuten en la productividad de la planta industrial y en otros campos de actividad como el comercio, la salud, la seguridad y la higiene en la sociedad.

El patrón nacional de acústica está constituido por 3 micrófonos de condensador de las más altas cualidades metrológicas, calibrados por el método absoluto de reciprocidad, el cual ha sido comparado con los patrones nacionales de Estados Unidos y Canadá. Este patrón sirve como soporte a los demás sistemas de calibración en acústica, tales como los sonómetros, calibradores acústicos, micrófonos, analizadores de audio y señal, así como otros equipos de uso común en el campo de la acústica.

En la actualidad, los servicios de calibración acústica más demandados satisfacen las principales necesidades de la industria y el sector laboral en cuanto a la determinación de los niveles de ruido en lugares de trabajo se refiere.

El Patrón Nacional de Vibraciones está constituido por un conjunto de acelerómetros calibrados por el método absoluto de interferometría laser, y es comparado con los patrones nacionales de Estados Unidos, Alemania y varios países de la Unión Europea. Este patrón sirve como soporte en los sistemas de calibración de acelerómetros, sensores de velocidad y desplazamiento; en analizadores de vibraciones y equipos de ultrasonido tanto de uso médico como industrial [1].

1.10.1.3 ÁREA DE METROLOGÍA DE MATERIALES

El área de metrología de materiales es la encargada de certificar materiales de referencia requeridos por las industrias para cumplir con requisitos internacionales y competir en los mercados globales.

Debido a la necesidad creciente de materiales de referencia certificados, el área de metrología de materiales se encuentra integrada por tres divisiones: materiales metálicos, materiales cerámicos y materiales orgánicos.

1.10.1.3.1 DIVISIÓN DE MATERIALES METÁLICOS

La división de materiales metálicos tiene entre sus principales actividades el desarrollo, establecimiento y mantenimiento de los sistemas primarios para la certificación de materiales de referencia primarios, que apoyen el establecimiento de la trazabilidad de las mediciones involucradas en el área de la química analítica inorgánica en el país.

Actualmente, esta área cuenta con un sistema primario de titulación coulombimétrica a corriente constante, el cual permite la certificación de pureza en sales de alta pureza. Asimismo, hoy día se encuentran en desarrollo sistemas primarios de dilución isotópica para la certificación elemental a niveles de concentración bajos, así como gravimetría para la certificación elemental de niveles de concentración intermedia.

Además, esta división cuenta con un programa de desarrollo de materiales de referencia para las diversas mediciones analíticas. Su finalidad es producir y certificar materiales de referencia que apoyen el establecimiento del SI en las mediciones elementales llevadas a cabo por los laboratorios analíticos en cualquier tipo de muestra, como materiales ferrosos y no ferrosos, materiales de alta pureza, vidrios y cerámicos; minerales y materiales geológicos, materiales de matriz inorgánica y orgánica de interés ambiental, salud e higiene industrial y materiales de interés para la industria de los alimentos.

Para cubrir sus actividades, esta área cuenta con los siguientes sistemas de medición: espectrometría de masas de alta resolución con plasma acoplado inductivamente, espectrómetro de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente, espectrofotómetro de absorción atómica con flama, con horno de grafito y con sistema de inyección en flujo con generador de vapor frío, espectrofotómetro de ultra violeta – visible-infrarrojo cercano, determinadores de oxígeno-nitrógeno y carbono-azufre y sistemas de titulación potenciométrica gravimétrica [1].

1.10.1.3.2 DIVISIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS

En las últimas dos décadas se han dado grandes avances en la tecnología de materiales duros no metálicos, por medio del refinamiento de productos existentes y de la invención de otros.

La aplicación de estos materiales en ingeniería ha guiado las actividades de la división de materiales cerámicos a la asistencia de la industria nacional. Esto mediante el desarrollo de bases propias para la determinación de propiedades y comportamiento de este tipo de materiales y con el fin de mejorar las bases de diseño, su especificación y caracterización.

El programa de materiales de referencia de esta división se integra por el desarrollo de cementos, vidrios y cerámicos, materiales que permiten certificar propiedades físicas por medio de difracción de rayos X, microscopía de barrido de electrones y Raman, así como por el tamaño de partícula.

La división de materiales cerámicos cuenta con sistemas analíticos como el sistema integral de microanálisis, el difractómetro de rayos X, espectrómetro de fluorescencia de rayos X, analizador de tamaño de partícula, sistema de análisis metalográfico cerámico, sistema petrográfico, porosímetro y espectrómetro Raman.

1.10.1.3.3 ÁREA DE MATERIALES ORGÁNICOS

Esta área construye y certifica materiales de referencia con aplicaciones en la salud e higiene industrial, ambiente, alimentos, agricultura, materias primas, combustibles, gases y productos industriales, así como materiales de referencia para propiedades físicas como actividad iónica y propiedades poliméricas.

El área proporciona servicios de calibración de analizadores de gases y estudios comparativos de mediciones analíticas.

Para llevar a cabo dichas actividades, esta área cuenta con diversas técnicas analíticas, así como con sistemas específicos desarrollados dentro del área. Entre estas actividades se encuentran la cromatografía de gases, de líquidos y de fluidos supercríticos, la cromatografía de gases aplicada a la espectrometría de masas, la extracción por fluidos supercríticos, calorimetría diferencial de barrido, viscosimetría capilar de vidrio, el espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier, la microscopía óptica, polarimetría, densidad y los sistemas primarios y secundarios para pH [1].

1.10.1.4 ÁREA DE METROLOGÍA MECÁNICA

El área de metrología mecánica establece, conserva, desarrolla y disemina los patrones nacionales de las magnitudes mecánicas. La medición de estas magnitudes (masa, fuerza, presión, flujo, longitud, ángulo plano, volumen y magnitudes afines) es indispensable para el desarrollo industrial del país en todos sus sectores productivos, especialmente en las industrias de fabricación de productos metálicos, maquinarias y equipos, productos alimenticios, industria química e industria petroquímica.

Estas y otras industrias de manufactura requieren mediciones mecánicas precisas para la obtención de incertidumbres adecuadas en el control de los procesos productivos, ello con el fin de competir en el mercado nacional e internacional.

Para el óptimo desempeño de sus funciones, esta dirección se encuentra integrada por las siguientes divisiones: metrología dimensional, metrología de masa y densidad, metrología de fuerza y presión y metrología de flujo y volumen [1].

1.10.1.4.1 DIVISIÓN DE METROLOGÍA DIMENSIONAL

La metrología dimensional es muy importante en la producción en serie y el intercambio de partes. Con este propósito, esta división tiene a su cargo los Patrones Nacionales de Longitud y Ángulo Plano.

La unidad de longitud es diseminada mediante la calibración interferométrica de bloques patrón de alto grado de exactitud. Éstos calibran a su vez a otros de menor exactitud, estableciendo la cadena de trazabilidad que llega hasta las mediciones de los instrumentos de uso industrial común.

De esta forma se da trazabilidad, a partir del patrón nacional, a instrumentos y patrones dimensionales de gran importancia industrial como anillos y tampones patrón, patrones de roscas, galgas de espesores, patrones de forma y posición, artefactos para la calibración de máquinas de medición por coordenadas y mesas de planitud. Asimismo, se posibilita la verificación de máquinas y herramientas, entre otros artefactos.[1].

1.10.1.4.2 DIVISIÓN DE METROLOGÍA DE MASA Y DENSIDAD

Esta división mantiene los patrones nacionales correspondientes a las magnitudes de masa y densidad. Para el desempeño de sus actividades opera ocho laboratorios: patrón nacional de masa, patrón nacional de densidad, patrones de referencia, pequeñas masas, grandes masas, instrumentos para pesar, densidad de sólidos y densidad de líquidos.

Las actividades de cada uno de los laboratorios que conforman esta división proporcionan la trazabilidad de estas magnitudes o los resultados de las mediciones realizadas por los laboratorios de calibración y pruebas, centros de investigación, empresas industriales y comerciales.

La diseminación de la exactitud de la medición de masa se lleva a cabo por la transferencia del patrón nacional de masa hacia patrones de referencia de acero inoxidable, con los cuales son calibrados juegos de pesas de las clases E1 y E2. Éstas a su vez son tomadas como patrones para calibrar otras pesas de menor exactitud, estableciéndose de esta manera los eslabones de la cadena de trazabilidad y los resultados de las mediciones de esta magnitud que se realizan en territorio nacional.

En los laboratorios de esta división se han diseñado sistemas basados en proyectos propios de innovación tecnológica. Tal es el caso de la campana de acero inoxidable antimagnética para mantener la presión constante dentro de la balanza, la automatización de las pesadas hidrostáticas, la automatización de los sistemas de

pesaje y la toma de datos, entre otros, resultado de la constante búsqueda para reducir las incertidumbres en las mediciones proporcionadas.

La diseminación de la exactitud del patrón sólido de densidad es realizada por medio de pesadas hidrostáticas. Con el volumen conocido del patrón sólido se puede determinar la densidad de sólidos y líquidos, mismos que son utilizados como patrones de densidad para la calibración de instrumentos y la determinación de volumen de sólidos.

La división de masa y densidad también ofrece materiales de referencia para la determinación de densidad de líquidos así como para la calibración de instrumentos que cuantifican esta magnitud.

Las mediciones relacionadas con la masa y densidad son de gran importancia no solamente para la cuantificación de transacciones comerciales, de la producción industrial y el control de calidad de los productos, sino también para el sostenimiento de los niveles de exactitud requeridos en otras magnitudes que dependen de ellas. Tal es el caso de las magnitudes de fuerza, presión, flujo, volumen y mediciones analíticas, entre otras. [1].

1.10.1.4.3 DIVISIÓN DE METROLOGÍA DE FUERZA Y PRESIÓN

Esta división es la responsable de los patrones de las magnitudes de fuerza, par torsional, dureza, tenacidad, presión absoluta, presión relativa y vacío.

Estas magnitudes son de gran importancia en una gran variedad de industrias, como la automotriz, metal- mecánica, la petroquímica, petrolera y eléctrica.

La división mantiene tres patrones primarios en la magnitud de fuerza. La exactitud se disemina en anillos y celdas de carga por medio de los cuales los laboratorios secundarios y la industria reciben niveles adecuados de exactitud en sus mediciones. Entre los principales servicios de calibración que se llevan a cabo se encuentran los anillos, las celdas de carga, cápsulas de mercurio, los dinamómetros y transductores de par torsional.

Para realizar la diseminación de la magnitud de par torsional se cuenta con un patrón de transferencia, el cual cuenta a su vez con trazabilidad al patrón primario del laboratorio de metrología de Alemania.

Por otro lado, para la magnitud de presión (absoluta y relativa), la división cuenta con balanzas de pesos muertos (máquinas de pistón giratorio basadas en el principio de equilibrio de fuerzas). Estas balanzas permiten ofrecer servicios de calibración de balanzas de presión, columnas de líquido, barómetros, manómetros y otros [1].

1.10.1.4.4 DIVISIÓN DE METROLOGÍA DE FLUJO Y VOLUMEN

El flujo de fluidos es un fenómeno que se encuentra en una gran variedad de procesos industriales, y su correcta medición repercute en la economía de numerosas empresas. Por esta razón, la calibración de medidores y la caracterización de los sistemas de medición de fluidos tienen importantes consecuencias económicas en muchos sectores de la sociedad. Para satisfacer las necesidades y los requerimientos

de exactitud de esta magnitud física, en la división de metrología de flujo y volumen del CENAM se mantienen los patrones nacionales de flujo de gas, flujo de líquidos, volumen y viscosidad.

En la medición de flujo de gases, la diseminación se realiza a través de los servicios de calibración de medidores tipo diafragma, de cámara húmeda, burbuja y área variable en un alcance de medición desde 0.05 L/min hasta 2,800 L/min. Por su parte, la calibración de medidores tipo turbina de desplazamiento positivo de tipo electromagnético, vortex, ultrasónicos, coriolis y presión diferencial representa la forma de diseminar las cualidades metrológicas del patrón nacional de flujo de líquidos, mismo que tiene un alcance de medición desde 25 L/min hasta 12000 L/min.

Desde 1996, la división de flujo y volumen mantiene relaciones de trabajo con Pemex refinación para la calibración de los sistemas de medición empleados para la transferencia de custodia de los hidrocarburos refinados. Para cumplir con este propósito se cuenta con patrones viajeros que son transportados a las instalaciones del cliente para la ejecución de los servicios de calibración. Con los equipos mencionados se cubre un alcance de medición desde 40 L/min hasta 5600 L/min [1].

CAPÍTULO 2

“TEMPERATURA”

La temperatura juega un papel fundamental en la vida diaria, pues resulta una de las magnitudes físicas más utilizadas en los diferentes campos de estudio. Estos campos son, entre otros, la biología, medicina e ingeniería, así como el sector industrial, por ejemplo, la industria química, metalúrgica y alimenticia.

Es por este motivo que en la actualidad el control de la temperatura es requerido en muchos procesos industriales y científicos, normalmente con un alto grado de exactitud, proporcionando así las bases para la realización de cálculos termodinámicos en muchos sectores de la industria química y petroquímica, entre otras.

Por tal motivo, el estudio y la aplicación de la temperatura es de gran importancia. La medición y el manejo de los instrumentos de medición de temperatura deben apegarse a lineamientos que permitan una mejor aplicación y funcionamiento. El empleo de estas mediciones repercute en cada uno de los sectores mencionados con anterioridad.

2.1 CONCEPTO DE TEMPERATURA

A lo largo de la historia, la temperatura ha sido ligada a conceptos indefinidos como el calor y el frío. Aunque su concepto se deriva de medir el calor o la frialdad que presenta un cuerpo, la temperatura no debe ser confundida con el calor.

Por lo tanto, los términos de temperatura y calor, aunque relacionados entre sí, se refieren a conceptos diferentes: la temperatura es la propiedad que presenta cualquier cuerpo, mientras que el calor es un flujo de energía entre dos cuerpos que se encuentran a diferente temperatura. La temperatura que presenta un cuerpo nos indica en qué dirección se desplazará el calor.

Entonces se puede decir que la temperatura es una variable que, junto con otros parámetros, describe la energía contenida en un cuerpo.

Otra definición de la temperatura puede obtenerse a partir de la Ley Cero de la Termodinámica, pero antes de enunciarla es necesario entender qué es el equilibrio térmico.

2.2 EQUILIBRIO TÉRMICO

La medición de la temperatura como magnitud física adquiere sentido a partir del concepto de equilibrio térmico.

Un sistema se encuentra en equilibrio térmico con el sistema que lo rodea si ambos sistemas no intercambian energía entre sí. Esto significa que dicho sistema y el ambiente que lo rodea se encuentran a la misma temperatura. Si estos sistemas no se encuentran a la misma temperatura, es debido a que la interacción o el contacto entre ambos toma menos tiempo del necesario para que se dé el equilibrio térmico, pero si el tiempo es el suficiente, terminarán por alcanzar la misma temperatura –la llamada temperatura de equilibrio.

El estado de equilibrio de un sistema puede verse alterado por la interacción con otros sistemas, influyendo en esta alteración la proximidad de dichos sistemas así como las paredes de separación existentes.

Las paredes de separación entre sistemas pueden clasificarse en dos tipos básicos: paredes adiabáticas y paredes diatérmicas.

Una pared diatérmica es aquella que permite la interacción térmica del sistema con sus alrededores. Una pared adiabática, por el contrario, no permite que exista interacción térmica alguna del sistema con los alrededores.

Para explicar de manera más clara el proceso de alteración en el estado de equilibrio que puede presentarse por las paredes mencionadas anteriormente, se dará el siguiente ejemplo:

Se toman dos sistemas cerrados A y B de paredes adiabáticas, definidos respectivamente por sus variables de equilibrio $x_1^A, y_1^A, x_1^B, y_1^B$, ambos independientes entre sí.

Si la pared adiabática que los separa es sustituida por otra diatérmica, se observa que se rompe el equilibrio existente y que cada sistema varía su estado hasta alcanzar nuevos estados de equilibrio, que se denominarán equilibrio térmico (ver figura 2). Los nuevos valores adquiridos por las variables de estado que definen dicho equilibrio dejan de ser independientes como lo eran antes, y se encuentran ahora ligados por una relación llamada ecuación de equilibrio térmico.

$$F(x_2^A, y_2^A, x_2^B, y_2^B) = 0$$

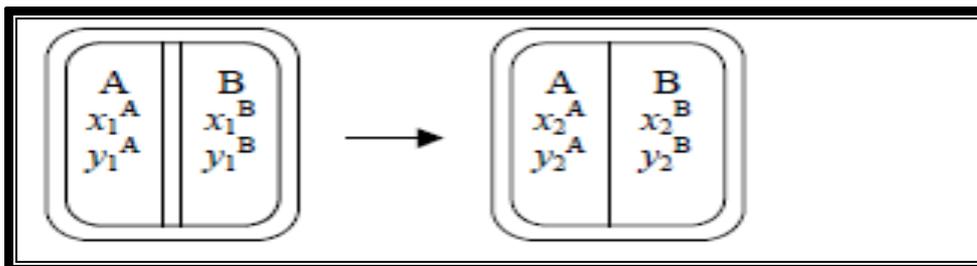


Figura 2. Equilibrio térmico

2.3 LEY CERO DE LA TERMODINÁMICA

La termodinámica basa sus análisis en ciertas leyes, por ejemplo, la Ley Cero de la Termodinámica, referente al concepto de temperatura.

La Ley Cero de la Termodinámica establece que si se tienen dos cuerpos llamados A y B con diferente temperatura uno respecto del otro y se ponen en contacto entre sí durante un tiempo determinado, éstos alcanzarán la misma temperatura.

Si un tercer cuerpo al que se llamará C es puesto en contacto con A y B, éste también alcanzará la misma temperatura y por lo tanto A, B y C tendrán la misma temperatura mientras permanezcan en contacto (ver figura 3).

De este principio se puede inducir que la temperatura es una condición propia de cada cuerpo, y que el ser humano ha aprendido a medirla mediante sistemas y escalas de referencia.

Otra interpretación de la ley cero establece lo siguiente:

Si dos sistemas A y B se encuentran en equilibrio termodinámico, y B está en equilibrio termodinámico con un tercer sistema C, entonces A y C están a su vez en equilibrio termodinámico. Este principio ampliamente aceptado resulta fundamental, por lo que recibe el nombre de ley cero.

El estado termodinámico se define en función de las variables que no dependen del tiempo: temperatura, presión, volumen, magnetización, tensión superficial, etc.

Así es como funcionan los termómetros. La temperatura es una propiedad que depende de la energía cinética de las moléculas, pero esto no es medible, por lo cual se aprovechan otras propiedades. En un sentido práctico, si se tiene un sistema A y se le acerca a un termómetro, en un tiempo determinado ambos sistemas llegarán a un equilibrio térmico, es decir, la temperatura del termómetro será la misma que la del sistema A.

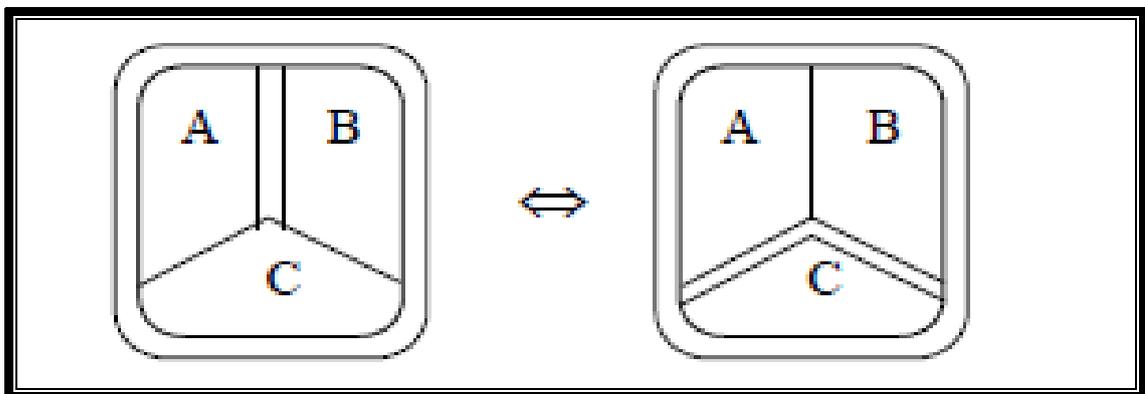


Figura 3. Ley cero de la termodinámica

2.4 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

La temperatura es probablemente una de las magnitudes más medidas en los procesos industriales, además de ser una de las que predominan como magnitud dependiente en la mayoría de los procesos. Por mencionar algunas, las siguientes magnitudes dependen considerablemente de la temperatura: la viscosidad, el volumen y la densidad.

En la actualidad, realizar mediciones de temperatura resulta sumamente fácil debido a la gran diversidad de instrumentos de medición de temperatura que se encuentran disponibles. La selección de los instrumentos para realizar estas mediciones depende de la aplicación y de dónde serán utilizados, así como de las tolerancias y la exactitud con las que deben contar tales mediciones.

2.5 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

La medición de la temperatura constituye una de las más comunes e importantes que se efectúan en los procesos industriales. Para medir la temperatura, existen diferentes instrumentos y sensores que se utilizan en la industria y en la vida diaria.

Sin embargo, la selección y especificación de un instrumento de medición de temperatura depende en gran medida del conocimiento de los diferentes instrumentos y sensores que existen, de sus limitaciones y de sus consideraciones prácticas.

Existen distintos tipos de instrumentos que permiten realizar mediciones de temperatura, entre los que destacan los termómetros, termopares y pirómetros.

2.5.1 TERMÓMETROS DE VIDRIO

Este instrumento es uno de los más conocidos y utilizados para llevar a cabo mediciones de temperatura. El termómetro de vidrio está constituido por un depósito de vidrio que puede contener pentano, alcohol, tolueno o mercurio, este último el más empleado.

El principio de funcionamiento de un termómetro de mercurio es el siguiente: al calentarse, el mercurio se expande y sube a través de un tubo capilar. La altura alcanzada por el mercurio es proporcional a la temperatura a la que el termómetro fue expuesto; dicha temperatura es interpretada mediante una escala incluida en el artefacto [4].

Los márgenes de trabajo de un termómetro dependen en gran medida del líquido con que se ha rellenado el mismo:

Tabla 3. Rango de medición del termómetro según el líquido de relleno

FLUIDO	RANGO DE OPERACIÓN
Mercurio	-35 hasta 280 °C
Mercurio (tubo capilar lleno de gas)	-35 hasta 450 °C
Pentano	-200 hasta 20 °C
Alcohol	-110 hasta 50 °C
Tolueno	-70 hasta 100 °C

La principal limitante que presenta un termómetro es que no resulta de utilidad para medir rangos de temperatura elevados, ya que el vidrio del que está constituido puede romperse con facilidad.

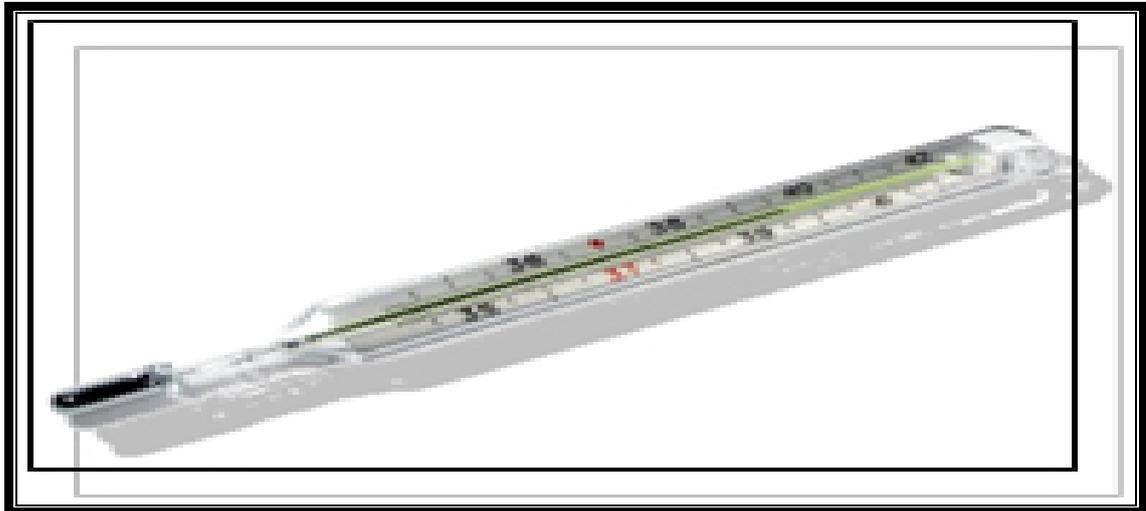


Figura 4 .Termómetro de vidrio lleno de mercurio

2.5.2 TERMÓMETROS BIMETÁLICOS

Son los instrumentos de medición de temperatura más utilizados debido a su bajo costo y al grado de precisión que presentan.

Estos termómetros están conformados por un elemento bimetalico, un eje, un cojinete, el puntero, la escala y una cubierta de protección. El elemento bimetalico puede tener cualquiera de las siguientes formas: recto, curvo, en forma helicoidal o espiral.

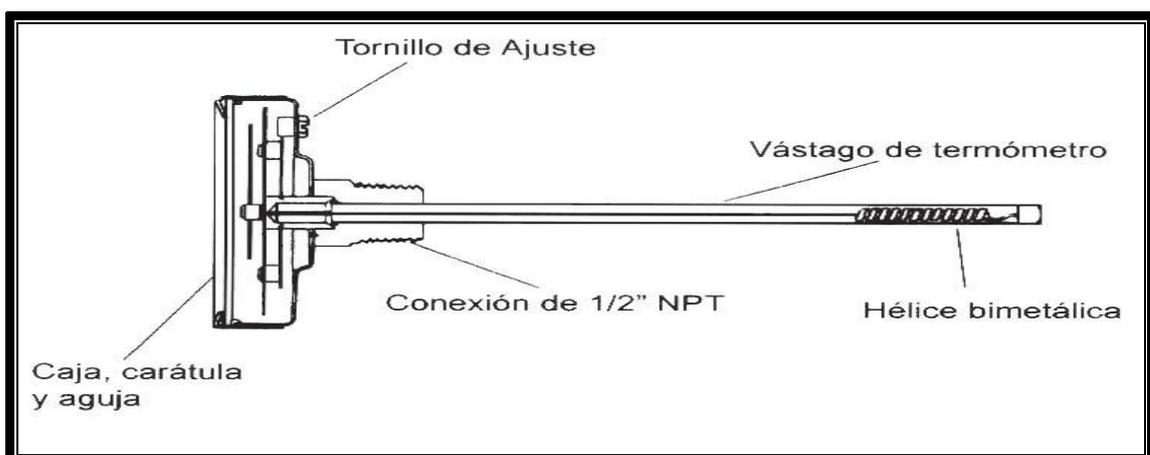


Figura 5. Esquema de termómetro bimetalico

El principio de funcionamiento de este termómetro se basa en la expansión desigual que sufren los metales al aplicárseles calor. Es decir, al exponer la tira bimetálica a una temperatura determinada, uno de los metales se expandirá más que el otro; debido a que un extremo del elemento se encuentra fijo, el otro se moverá y transmitirá este movimiento a un eje, el cual a su vez lo transmitirá a un puntero que indicará sobre una escala graduada el valor de la temperatura a la cual fue expuesto el artefacto.

Este instrumento contiene muy pocas partes móviles y no existen mecanismos con engranajes que exijan mantenimiento. La precisión con la que cuenta es de +/- 1% y tiene un rango de medición que va desde los -200 hasta los 500 °C.

2.5.3 TERMÓMETROS DE SISTEMAS LLENOS

Estos termómetros son empleados cuando es necesario indicar el valor de la temperatura a una cierta distancia del punto donde se encuentra el elemento de medición.

El sistema generalmente está conformado por un elemento sensible a los cambios de temperatura (bulbo), un elemento sensible a los cambios de presión y volumen (Bourdon, fuelle, diafragma), un medio para conectar estos elementos (tubo capilar) y un mecanismo para indicar, registrar o transmitir la señal relacionada con la temperatura.

Su principio de funcionamiento es el siguiente: cuando aumenta la temperatura en el bulbo, el líquido, vapor o gas contenido en él se expande; al ser constante el volumen del sistema, la presión aumenta, lo cual causa que el resorte o bourdon que en él se encuentra tienda a desenrollarse moviendo el puntero sobre la escala graduada e indicando en ésta la temperatura a la cual se encuentra el bulbo.

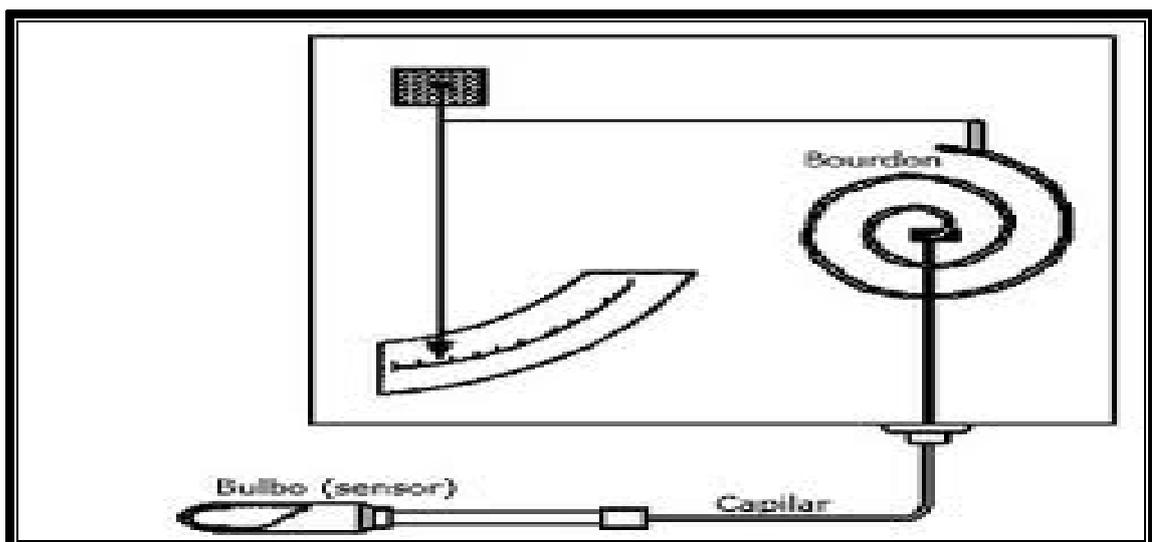


Figura 6. Termómetro de sistema lleno

Dependiendo del tipo de fluido con el que se encuentra lleno el bulbo, los termómetros de sistema lleno se clasifican de la siguiente forma:

- Sistema clase I. Termómetros actuados por líquido: operan bajo el principio de expansión del líquido con la temperatura y dan una respuesta aproximadamente lineal frente a los cambios de temperatura. Puesto que la dilatación del líquido es proporcional a la temperatura, la escala de medición resulta uniforme. Los termómetros actuados por líquido se clasifican a su vez en sistemas de clase IA, los cuales presentan un tubo capilar largo mayor a 5m y los sistemas de clase IB, los cuales se caracterizan por usar tubos capilares menores a los 5m. Cuando se emplean termómetros de clase IB, resulta necesario compensar el elemento de medición para evitar errores debido a las variaciones de la temperatura en el ambiente, mientras que para la clase IA es necesario compensar el elemento de medición y el tubo capilar. El rango de medición oscila entre los -75 y 650 °C y los fluidos de trabajo que se utilizan son el éter y el xileno.
- Sistema clase II (Bulbo lleno de vapor). Opera bajo el principio de cambio en la presión del vapor de un líquido volátil con la temperatura. Al subir la temperatura, aumenta la presión de vapor del líquido. La relación de variación de la presión del vapor con la temperatura no es lineal y depende del fluido utilizado. La presión del sistema depende únicamente de la temperatura en la parte donde se encuentra el líquido en equilibrio con su vapor básicamente en el bulbo. Por esta razón, no hay necesidad de compensar.

Estos sistemas se subclasifican de la siguiente manera:

- Clase IIA: Están diseñados para operar con la temperatura medida (bulbo) superior a la del sistema térmico (ambiente). El capilar y el elemento de medición están llenos de líquido.
- Clase IIB: Diseñados para operar con la temperatura medida menor que la del resto del sistema térmico. El sistema está lleno de vapor.
- Clase IIC: Diseñados para operar a una temperatura mayor o menor que la del resto del sistema térmico. Es una combinación de los sistemas IIA y IIB.
- Clase IID: Diseñados para operar a una temperatura mayor, menor o igual que la del resto del sistema térmico. Esta clase emplea otro líquido no volátil, el cual llena el capilar y el bourdon para transmitir la presión de vapor.

El sistema puede contener en su interior alcohol, éter y tolueno, y el rango de medición oscila entre los -30 y los 35° C con una longitud del capilar de hasta 9 m.

- Sistema Clase III (Bulbo lleno de gas). Opera bajo el principio de cambio en la presión del gas con la temperatura. Tiene una relación lineal, ya que puede aplicársele la ley de los gases ideales para relacionar la temperatura con la presión. El rango de medición depende del gas utilizado y va desde los -270° C hasta los 760° C. Generalmente es empleado como gas el nitrógeno y su campo de medición es de -140 °C a 450 °C. Los tubos pueden tener una longitud de hasta 70 m.

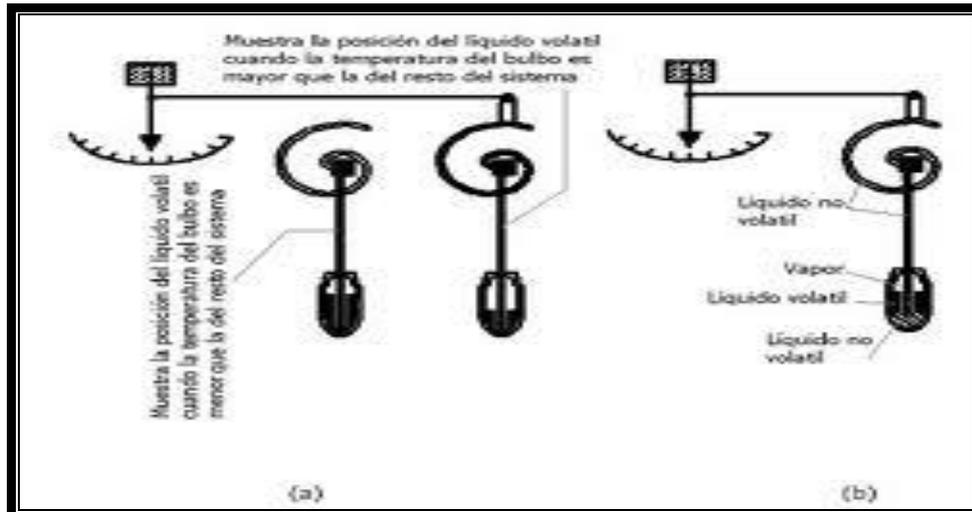


Figura 7. Sistemas clase III (bulbo lleno de gas)

- Sistemas Clase IV. Son similares a los actuados por líquido; pueden tener compensación en la caja y compensación total.

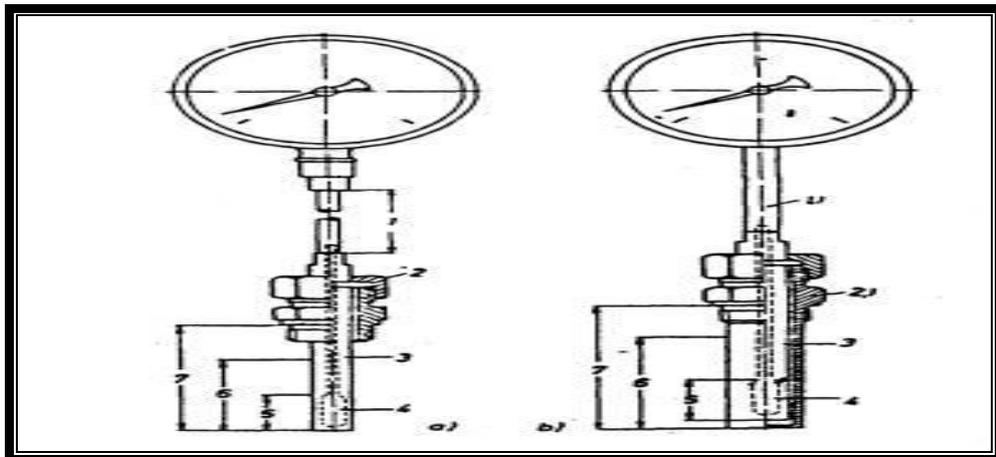


Figura 8. Sistema Clase IV

2.5.4 TERMOPARES

Son los instrumentos de medición de temperatura más importantes y los más utilizados debido al buen rendimiento que presentan al usarse tanto para medir temperaturas bajas como altas. Estos instrumentos son empleados cuando es necesario enviar a un sitio lejano la información de la medición realizada.

Constan principalmente de dos metales distintos, unidos en un extremo, un voltímetro y una escala graduada.

Funcionan de la siguiente manera: al poner en contacto los metales distintos y ser calentada la junta de unión, se origina una diferencia de potencial entre los extremos libres, proporcional a la temperatura existente en la punta, y la cual se convierte en unidades de temperatura por medio del voltímetro.

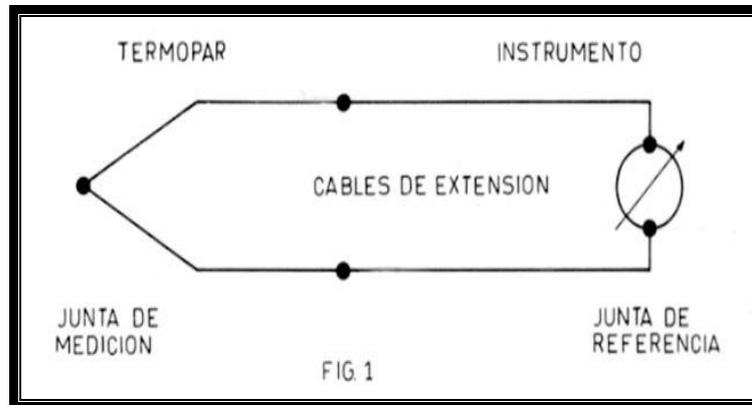


Figura 9. Termopar

Existen diferentes tipos de termopares que dependen de la clase de metal utilizado así como del intervalo de temperatura que se desea medir. A menudo los termopares son utilizados según sus características de la siguiente manera:

- Termopar tipo E (cromel-constantan). Este instrumento puede ser utilizado en vacío o en una atmósfera inerte o medianamente oxidante o reductora. Este tipo de termopar posee la f.e.m más alta por variación de temperatura y puede ser empleado en rangos de temperatura que van desde los -200 hasta los 900 °C.



Figura 10. Termopar tipo E (cromel-constantan)

- Termopar tipo T (cobre-constatan). Este tipo de termopar presenta una elevada resistencia a la corrosión por humedad atmosférica o a la condensación; también puede ser utilizado en atmósferas oxidantes. Su uso está restringido a bajas temperaturas. Por lo general, sus rangos de medida se encuentran entre los -200 y los 260 °C.

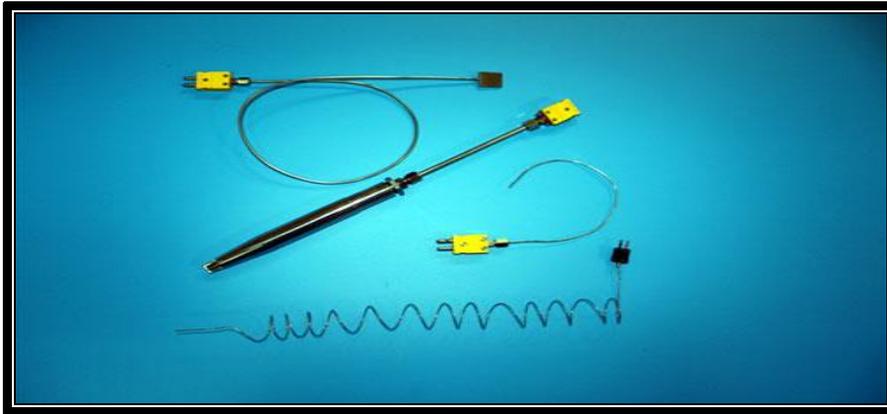


Figura 11. Termopar tipo T (Cobre-Constantan)

- Termopar tipo J (hierro-constantan). El uso de este tipo de termopares es recomendado en atmósferas donde el oxígeno libre es escaso.



Figura 12. Termopar tipo J (Hierro-Constantan)

- Termopar tipo K (cromel-alumel). Su uso es recomendado en atmósferas de oxidantes y sus rangos de temperatura oscilan entre los 50 y 1500 °C. No debe ser usado en atmósferas reductoras o sulfurosas.

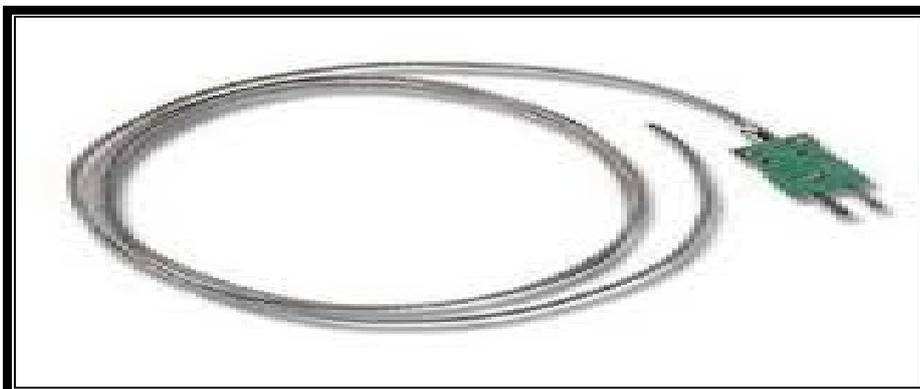


Figura 13. Termopar tipo k (Cromel –alumel)

2.5.4.1 CLASIFICACIÓN DE TERMOPARES SEGÚN EL TIPO DE JUNTA

Los tipos de junta que pueden presentar los termopares son los siguientes:

- **Junta expuesta.** Un termopar con junta expuesta es aquél en el cual la junta de medición se encuentra expuesta al medio cuya temperatura se requiere medir. Es recomendado para medir temperaturas de gases no corrosivos, donde una respuesta rápida es requerida. Este tipo de junta se extiende fuera de la protección metálica para dar una respuesta rápida. La protección metálica es sellada en el punto donde se extiende la junta, evitando con ello la penetración de humedad o gas que puedan producir un error.

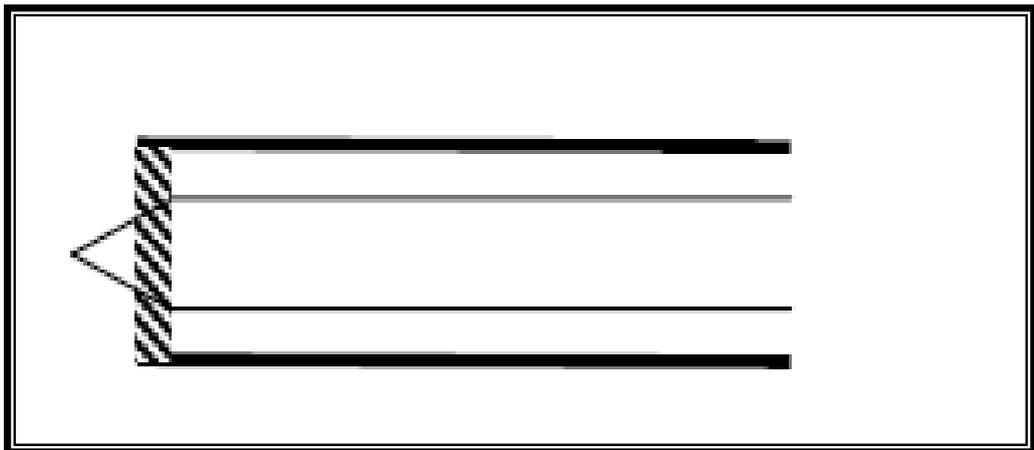


Figura 14. Junta Expuesta

- **Junta sin aterrar.** Es aquél en el cual la junta de medición está aislada eléctricamente de la protección metálica. Esto es recomendable cuando se requiere medir temperaturas en áreas donde existe ruido eléctrico. El protector metálico debe estar aterrado eléctricamente.

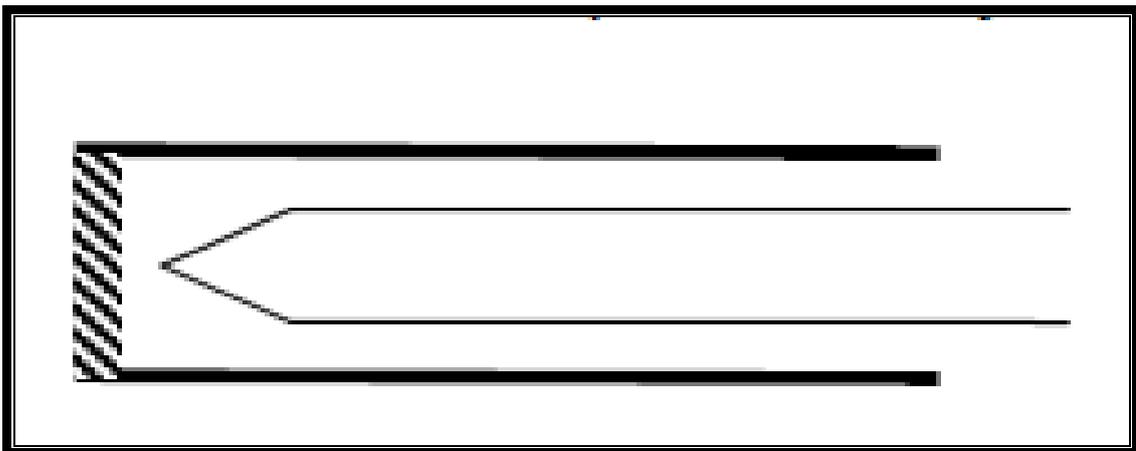


Figura 15. Junta sin aterrarse

- **Junta aterrada.** El empleo de la junta aterrada combina las ventajas de un tiempo de respuesta excelente con la protección que brinda el protector sellado. Este tipo de junta es recomendado para la medición de temperatura de gases y líquidos; su empleo puede realizarse a alta presión. La junta aterrada en un termopar está soldada a un protector metálico, permitiendo una respuesta más rápida que en el caso de una junta sin aterrada.

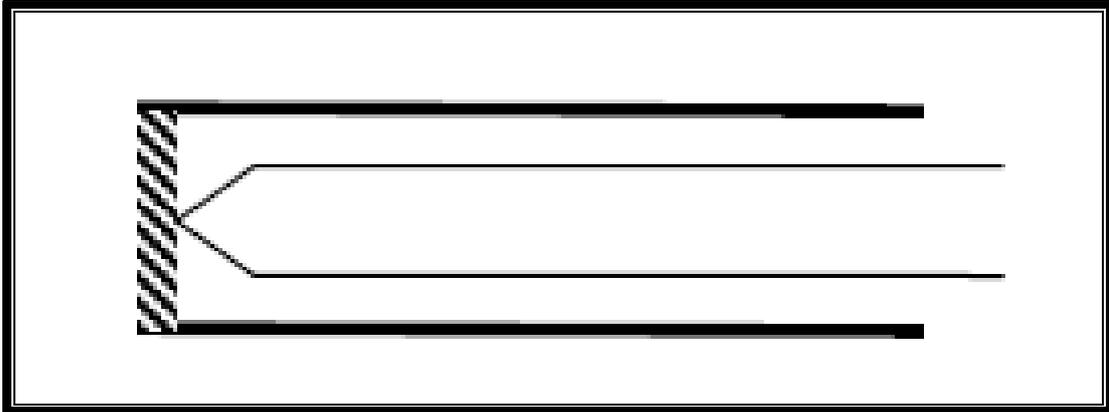


Figura 16. Junta aterrada

2.5.5 PIRÓMETROS

El pirómetro es un instrumento utilizado para medir, por medios eléctricos, elevadas temperaturas que se encuentran fuera del alcance de un termómetro convencional.

Entre los principales tipos de pirómetros se encuentra el siguiente:

Pirómetro óptico. El pirómetro óptico es un instrumento que se emplea para medir la temperatura de un cuerpo. Este tipo de pirómetro mide temperaturas que alcanzan los 2,400 °F, pero existen pirómetros más complejos que llegan a medir hasta 10,000 °F o incluso más. Su funcionamiento se basa en comparar el brillo de la luz emitida por la fuente de calor con el de una fuente estándar. El pirómetro consta de dos partes básicas: un telescopio y una caja de control. El telescopio contiene una lámpara con un filamento calibrado sobre el cual la lente del objetivo enfoca una imagen del cuerpo cuya temperatura va a ser medida. También contiene un interruptor para cerrar el circuito eléctrico de la lámpara, una pantalla de absorción para cambiar el intervalo del pirómetro y un filtro para color rojo.

2.5.6 TERMÓMETROS DE RESISTENCIA

Los termómetros de resistencia son transductores de temperatura. Su principio de operación se basa en la dependencia que presenta la resistencia eléctrica de un material hacia la temperatura; en otras palabras, estos instrumentos son capaces de transformar la variación de temperatura en una variación en el valor de la resistencia eléctrica del material del que esté constituido el termómetro.

Al cambio de resistencia que presenta un material en respuesta a una variación en la temperatura se le conoce generalmente como coeficiente de resistencia.

Dicho coeficiente queda expresado como un cambio de la resistencia en Ohms y por Ohm por grado de temperatura a una temperatura determinada [5].

Entre los materiales más utilizados por este tipo de termómetros se encuentran el platino, cobre y tungsteno.



Figura 17. Termómetros de resistencia

2.5.6.1 PLATINO

El platino es uno de los materiales más convenientes debido a la exactitud y estabilidad que presenta. Los termómetros de resistencia de platino comúnmente usados a nivel industrial cuentan con una resistencia de 100 ohmios a 0 °C [5].

Además, el platino presenta las siguientes características, que lo convierten en el mejor elemento sensor en la termometría:

- Es un elemento químicamente inerte al ser expuesto a altas temperaturas.
- Tiene un punto de fusión elevado (1772 °C).
- Tiene una gran resistencia a la oxidación a altas temperaturas.
- Presenta una relación altamente lineal entre los valores de resistencia y los de temperatura.

Con este tipo de termómetro pueden llevarse a cabo mediciones de temperatura con una exactitud de 0.01 °C, así como también pueden percibirse cambios de temperatura de hasta 0.001 °C.

Por tal motivo, el termómetro de resistencia de platino es el instrumento indicado por la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS90) como un patrón para la calibración de otros termómetros de menor exactitud.

Estos termómetros se componen de un alambre fino del metal que es empleado como sensor, enrollado sobre una armadura de mica, cubierto por un tubo de paredes delgadas que sirve de protección y equipado con un elemento para medir la resistencia.

Los termómetros de resistencia de platino se dividen en tres grupos, los cuales dependen del montaje del sensor:

- **Termómetros de resistencia de platino criogénicos (cápsula).** Su intervalo de operación va de los $-259.3467\text{ }^{\circ}\text{C}$ (PT-H) hasta los $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ (PT-H₂O), presentando una sensibilidad de $0.1\ \Omega/^{\circ}\text{C}$.
- **Termómetros de resistencia de platino de tallo largo.** Sus rangos de operación van desde los $-189.3442\text{ }^{\circ}\text{C}$, punto triple del Argón, hasta los 660°C , punto de solidificación del aluminio.
- **Termómetros de resistencia de platino de alta temperatura.** Sus rangos de operación varían desde los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $961.78\text{ }^{\circ}\text{C}$, punto de solidificación de la plata. Presentan una sensibilidad de $0.01\ \Omega/^{\circ}\text{C}$.

2.5.6.2 COBRE

El cobre presenta una resistencia uniforme en el rango de temperaturas cercanas a la ambiente, siendo un material estable y de costos relativamente bajos. Presenta una baja resistividad, ya que las variaciones relativas de resistencia son menores que las de cualquier otro metal. Es inestable por encima de los $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5].

2.5.6.3 TUNGSTENO

Este metal tiene una sensibilidad térmica superior a la del platino, misma que va por encima de los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ e incluso a temperaturas más altas. Presenta una linealidad superior a la del platino, pero debido a sus propiedades mecánicas resulta ser más inestable que éste [5].

2.6 ESCALAS DE TEMPERATURA

Todo instrumento de medición de temperatura será capaz de mostrar variaciones en los valores de la misma, siempre y cuando cuente con una escala que permita representar dichas variaciones de acuerdo con el sistema de unidades establecido [6].

Actualmente se utilizan tres escalas para medir la temperatura:

- Escala Celsius
- Escala Fahrenheit
- Escala Kelvin

2.6.1 ESCALA CELSIUS

El físico y astrónomo Anders Celsius nació en Uppsala, Suecia, en noviembre de 1701. Sus investigaciones en el campo de la metrología fueron –y siguen siendo- muy relevantes. Sin duda, una de sus aportaciones más importantes es la escala Celsius, conocida originalmente como centígrada, hasta el año 1948 cuando recibió el nombre de escala Celsius en honor a su creador.

En 1742, Celsius inventó un termómetro de mercurio calibrado utilizando la escala Celsius. Utilizó el punto de fusión del hielo y el de ebullición del agua como dos temperaturas de referencia para desarrollar un método simple para la realización de un

termómetro de calibración. Dividió la diferencia entre el punto de congelamiento y el de ebullición del agua, dando como resultado 100 grados; de ahí que reciba el nombre de centígrados.

Asimismo, estableció el punto de congelación del agua en 0 °C y su punto de ebullición en 100 °C.

La escala Celsius toma la delantera en la investigación científica por ser el más compatible con los formatos basados en los decimales del Sistema Internacional (SI) y del Sistema Métrico. La escala Celsius es la preferida en la mayoría de los países del mundo, excepto en algunos pocos como es el caso de Estados Unidos [6].

2.6.2 ESCALA FAHRENHEIT

Daniel Gabriel Fahrenheit fue un físico alemán nacido en Gdansk el 24 de mayo de 1686. Creó el termómetro de alcohol en 1709 y el termómetro de mercurio en 1714.

Estableció también una escala de temperatura en la que fijó como primera referencia la temperatura de una mezcla anticongelante de agua-hielo-sal a los 0°C. Como segunda referencia, eligió la temperatura del cuerpo humano a 96 ° C, sin considerar el punto de ebullición del agua por sufrir variaciones debido al cambio de presión.

Una vez tomados estos dos puntos de referencia, dividió la diferencia existente entre ellos en 96 partes, notando que en esta escala el punto de congelación del agua se encontraba a los 32° F y su punto de ebullición a los 212 °F. Determinó entre estos puntos un intervalo de 180 grados [6].

2.6.3 ESCALA KELVIN

El físico William Thompson Kelvin, conocido como Lord Kelvin, nació en Belfast, Irlanda el 26 de junio de 1824. Entre sus aportaciones científicas más pronunciadas se encuentra la escala Kelvin, inventada en 1854.

La escala Kelvin se basa en la idea del cero absoluto; esta es la temperatura teórica en la cual el movimiento molecular se detiene y resulta imposible detectar cualquier tipo de energía.

El punto cero de la escala Kelvin es la temperatura más baja del universo: -273.15 °C. Es así que el punto de congelamiento del agua ocurre a 273.15 K y su punto de ebullición a 373.15 K.

La escala Kelvin, al igual que la Celsius, es una unidad de medida estándar del Sistema Internacional (SI), utilizada comúnmente en medidas científicas. Debido a que no existe nada más frío que el cero absoluto de la escala Kelvin, es conveniente utilizar dicha escala en la investigación científica cuando se requieran mediciones de temperaturas extremadamente bajas [6].

2.7 CONVERSIÓN DE ESCALAS DE TEMPERATURA

Las diferentes escalas de temperatura, a pesar de contar con distintos puntos de referencia, se encuentran relacionadas entre sí.

La diferencia entre el punto de congelación y de ebullición del agua en la escala Celsius es de 100 grados, mientras que en la escala Fahrenheit es de 180. Entonces, la proporción entre las dos escalas es de 180/100 y, de manera simplificada, de 9/5 [6].

La conversión de grados Celsius a Fahrenheit se da utilizando la siguiente fórmula:

$$^{\circ}\text{F} = \left(\frac{9}{5}\right) * ^{\circ}\text{C} + 32 \dots\dots\dots (1)$$

Para convertir de Fahrenheit a Celsius se emplea la siguiente:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{(^{\circ}\text{F}-32)}{\left(\frac{9}{5}\right)} \dots\dots\dots (2)$$

Ya que los intervalos de temperatura tienen el mismo valor, la conversión de Kelvin a $^{\circ}\text{C}$ se expresa en la siguiente fórmula:

$$^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{K} - 273.15 \dots\dots\dots (3)$$

Por el contrario, la fórmula de conversión de Kelvin a $^{\circ}\text{C}$ es la siguiente:

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15 \dots\dots\dots (4)$$

La relación entre las escalas queda expresada en la siguiente tabla:

Tabla 4. Relación entre escalas

DE	A	FÓRMULA
$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{(^{\circ}\text{F} - 32)}{\left(\frac{9}{5}\right)}$
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	$\left(\frac{9}{5}\right) * ^{\circ}\text{C} + 32$
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{K}$	$^{\circ}\text{C} + 273.15$
$^{\circ}\text{K}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{K} - 273.15$
$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{K}$	$\frac{(^{\circ}\text{F} + 459.67)}{1.8}$
$^{\circ}\text{K}$	$^{\circ}\text{F}$	$\frac{9}{5} * ^{\circ}\text{K} - 459.67$

CAPÍTULO 3

“PUNTOS FIJOS”

Para fijar los valores de temperatura se utilizan los llamados puntos fijos, mismos que corresponden a fenómenos que siempre tienen lugar para un mismo valor de la temperatura.

Definir una escala de temperatura requiere en primera instancia asignar la temperatura de dos puntos fijos. Para el desarrollo de las distintas escalas de temperatura fue necesario por parte de sus creadores el empleo de distintos puntos fijos de los cuales partía la medición de temperatura.

A su vez, la construcción de termómetros en los cuales se utiliza cada una de estas escalas implica el empleo de dichos puntos fijos. De estos puntos se derivan cada una de las escalas de temperatura.

En la gran mayoría de trabajos técnicos y científicos resulta necesario el empleo de termómetros que proporcionen la confiabilidad y exactitud necesarias para obtener mediciones de temperatura que serán empleadas en cálculos o procesos de gran importancia.

Para lograr que los termómetros cumplan con dichos requerimientos, es necesario el empleo de patrones; éstos son termómetros calibrados de acuerdo con los puntos fijos empleados por los termómetros a utilizar. De este modo se verifica el rango de exactitud y confiabilidad de los mismos.

Es por eso que el manejo y conocimiento de los distintos puntos fijos utilizados para la realización de los patrones es de gran relevancia. Por esta razón, a continuación se ahondará en el empleo de los mismos.

3.1 PATRONES DE MEDICIÓN

El desarrollo de una escala de temperatura constituye un patrón para la unidad de temperatura.

Un patrón de medición se define como la representación física de una unidad de medición. Toda unidad se realiza tomando como referencia a un patrón físico arbitrario o bien a un fenómeno natural que incluya constantes físicas y atómicas [1].

Existen diferentes tipos de patrones de medición clasificados de acuerdo con su función y aplicación:

- Patrones Internacionales
- Patrones Primarios
- Patrones Secundarios
- Patrones de Trabajo

3.1.1 PATRONES INTERNACIONALES

Los patrones internacionales son definidos mediante acuerdos internacionales; representan ciertas unidades de medida, manejando el mayor grado de exactitud posible que permite la tecnología de producción y medición. Los patrones internacionales se verifican y evalúan periódicamente con mediciones absolutas en términos de unidades fundamentales.

3.1.2 PATRONES PRIMARIOS

Estos patrones se localizan en los laboratorios de patrones nacionales, en diferentes partes del mundo. Los patrones primarios representan a las unidades fundamentales y algunas unidades eléctricas y mecánicas derivadas, calibradas de manera independiente por medio de mediciones absolutas en cada uno de los laboratorios nacionales [1].

3.1.3 PATRONES SECUNDARIOS

Los patrones secundarios son considerados patrones básicos de referencia y son utilizados en laboratorios industriales de medición. Los patrones secundarios son conservados en la industria particular interesada y verificados localmente con patrones de referencia en el área. El mantenimiento y calibración de los patrones secundarios depende del mismo laboratorio industrial [1].

3.1.4 PATRONES DE TRABAJO

Los patrones de trabajo son las herramientas principales en un laboratorio de mediciones. Son utilizados principalmente para verificar la exactitud y el comportamiento de las mediciones realizadas en las aplicaciones industriales [1].

3.2 PUNTOS FIJOS DE LA TEMPERATURA

Existe en la naturaleza un conjunto de escalares denominado “puntos fijos termométricos”.

Toda la materia existe en diferentes estados de agregación; éstos pueden ser líquido, sólido o gaseoso. La temperatura es un factor que determina el estado de agregación, mejor llamado fase, en el cual la materia se encuentra en un momento determinado.

Los puntos fijos termométricos son estados físicos en los cuales la materia coexiste con dos o tres estados físicos a una temperatura constante.

A lo largo de la historia, las diversas escalas internacionales han empleado distintos cambios de fase como puntos fijos. Entre ellos se pueden encontrar los siguientes:

- Punto triple: se presenta mediante una combinación de presión y temperatura, en la cual coexisten las tres fases de una sustancia pura (sólida, líquida y gaseosa).
- Punto de congelación: se presenta a una cierta temperatura en la cual comienza a formarse la fase sólida a partir del líquido a 1 atmósfera de presión.
- Punto de fusión: se presenta a una temperatura en la cual se funde un sólido a la presión de 1 atmósfera.

- Punto de ebullición: se da a una temperatura en la cual la presión de vapor es 1 atmósfera.

Dos o tres fases pueden existir simultáneamente a determinadas temperaturas. Un ejemplo de esto es el agua, la cual puede presentarse en estado líquido y sólido a 0 °C o en sus tres fases. La coexistencia entre estas tres fases es conocida como punto triple del agua, mismo que se alcanza a una temperatura de 0.01 °C. En la gran mayoría de las demás sustancias, solamente pueden existir dos fases de modo simultáneo.

Otro tipo de punto fijo es la solidificación de metales puros. Al ser enfriado, un metal fundido comienza a solidificarse a cierta temperatura. La conversión que se lleva a cabo de líquido a sólido transcurre a una temperatura que permanece constante hasta que el metal se haya solidificado. Esta temperatura es conocida como temperatura de solidificación; el valor de ésta depende únicamente del grado de pureza del metal, de manera que este método permite de manera simple y exacta reproducir ciertas temperaturas.

3.3 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA

Como resultado de la necesidad de obtener una mejora en la exactitud de la medición de la temperatura, a finales del siglo XIX se creó la Escala Internacional de Temperatura.

Una razón fundamental para la creación de dicha escala fue la necesidad de definir procedimientos a través de los cuales determinados termómetros prácticos de la calidad requerida por cualquier sector o uso pudieran ser calibrados de manera que los valores de temperatura obtenidos mediante su uso fueran precisos y reproducibles.

En la primera reunión tras la Convención del Metro, la Conferencia General de Pesas y Medidas de 1887 estableció la Escala Normal de Hidrógeno. Para el año de 1927, la Conferencia General de Pesas y Medidas estableció la primer Escala Internacional de Temperatura.

En 1937, el Comité Internacional de Pesas y Medidas creó el Comité Consultivo de Termometría, el cual sería el encargado de preparar borradores de las revisiones de las escalas de temperatura que adoptaría la Conferencia General de Pesas y Medidas.

En 1948 tuvo lugar la primera revisión de la EIT de 1927; en ésta se adoptó la Escala Internacional de Temperatura. Para dicha escala se decide abandonar el nombre de grado centígrado como unidad de temperatura y reemplazarlo por el de grado Celsius (°C).

En 1968 se llevó a cabo la segunda revisión de la Escala Internacional de Temperatura, en la que se adoptó la Escala Internacional Práctica de Temperatura. En la EIPT-68, las unidades de temperatura termodinámicas y prácticas fueron definidas como idénticas e iguales a $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. A esta unidad se le asignó el nombre de Kelvin, cuyo símbolo es °K.

El 1 de enero de 1990 entró en vigor la EIT-90 en reemplazo de la EIPT-68; se trata de la escala que se encuentra actualmente en vigor. En ella, el punto fijo utilizado deja de

ser el punto de solidificación del agua, y se utiliza el punto triple del agua como punto fijo actual (273.16 °K).

3.4 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1927

Como ya se ha mencionado en este trabajo, existen varias escalas de temperatura conocidas a nivel internacional. En la séptima edición de la Conferencia General de Pesas y Medidas se adoptó una Escala Internacional de Temperaturas. Su objetivo fue proporcionar una escala práctica de temperaturas, sencilla y exactamente reproducible, ofreciendo con ello una máxima aproximación a las temperaturas termodinámicas [7].

En la escala de 1927 se estableció una relación de 6 puntos fijos básicos convencionales, los cuales comprendían rangos de temperatura entre los -183 y los 1,063 °C. El punto de fusión de hielo fue el punto fijo más utilizado en esta escala de temperaturas.

Tabla 5. Puntos fijos fundamentales en la escala de temperatura de 1927

PUNTOS FIJOS FUNDAMENTALES	°C
Punto de fusión del hielo	0.01
Punto de ebullición del agua	100
PUNTOS FIJOS PRIMARIOS	
Punto de ebullición del oxígeno	-182.97
Punto de ebullición del azufre	444.6
Punto de fusión de la plata	960.8
Punto de fusión del oro	1063

Esta escala fue revisada en tres ocasiones: en 1948, 1960 y 1968. En 1948, el punto de fusión del hielo fue sustituido por el punto triple del agua como punto fijo a utilizar.

3.5 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1948

En 1948 se llevó a cabo una revisión de la Escala Internacional de Temperatura de 1927 y se estableció la Escala Internacional de Temperatura de 1948. Uno de los aportes fundamentales de esta nueva escala fue el establecimiento del límite más bajo del rango del termómetro de resistencia de platino en 182.97 °C [7].

Mediante un acuerdo internacional realizado en 1954 se adoptó el punto triple del agua como único punto fijo de referencia. Se instituyó el kelvin (unidad de temperatura termodinámica) como referencia para la temperatura de 273.16 °K .

En 1960 fue aprobada una enmienda a la Escala Internacional de Temperatura de 1948, por medio de la cual se adoptó el nombre de Escala Práctica Internacional de Temperatura de 1948 (EPIT-48). El punto triple del agua (0.01 °C) reemplazó al punto de fusión del hielo como punto de calibración.

3.6 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1968

En 1968 se promulgó la Escala Práctica Internacional de Temperatura. En ella se incorporaron varias modificaciones respecto a la EPTI-48, a través de las cuales se incluyeron cambios numéricos y de diseño, posibilitando con esto una mayor cercanía con las temperaturas termodinámicas [7].

La escala EPTI-68 está basada en los valores asignados a las temperaturas de cierto número de estados de equilibrio reproducibles (puntos fijos) y en instrumentos patrones calibrados a dichas temperaturas.

Tabla 6. Puntos fijos de EPTI-68

PUNTO FIJO	°k	°C
Punto triple del hidrógeno	13.81	-259.34
Punto de ebullición del neón	27.102	-246..048
Punto triple del oxígeno	54.361	-218.789
Punto triple del agua	273.16	0.01
Punto de ebullición del agua	373.15	100
Punto de fusión del cinc	692.73	419.58
Punto de fusión de la plata	1235.08	961.93
Punto de fusión del oro	1337.58	1064.43

Es necesario el empleo de fórmulas adecuadas para interpolar en las temperaturas de los puntos fijos, que establezcan relaciones entre las indicaciones de los instrumentos patrones y los valores de la temperatura práctica internacional. En la EPTI-68 se continúa utilizando el punto triple del agua como punto de calibración.

3.7 ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1990

En 1989, a petición de la 18ª Conferencia General de Pesas y Medidas de 1987, fue adoptada la Escala Internacional de Temperatura de 1990, la cual dejó sin efecto a la EPTI-68 y a todas las anteriores. La ITS-90 es una representación práctica de la escala termodinámica de temperatura propuesta por Kelvin en el sentido de que permitió mediciones más precisas [7].

La ITS-90 es la escala internacionalmente aceptada y utilizada por todos los laboratorios de termometría del mundo.

La creación de la ITS-90 fue necesaria dadas las numerosas mediciones en los diferentes laboratorios alrededor del mundo, que demostraron inexactitudes en las determinaciones previas de los puntos fijos de temperatura [7].

La Escala Internacional de Temperatura (ITS-90) utiliza como unidad de medida de la temperatura absoluta el kelvin (°K). El uso del kelvin como unidad de temperatura está basado en la unidad de medida del grado Celsius. La diferencia entre éstas radica en que en la ITS-90 está relacionada con los puntos de fusión y ebullición del agua.

Los elementos fundamentales de la escala son los puntos fijos de definición, estados de equilibrio termodinámico de sustancias puras, puntos triples, puntos de solidificación y fusión.

En la ITS-90 se encuentran definidos 17 puntos fijos para rangos de temperatura desde los 13.8 °K hasta los 1357.77 ° K.

Tabla 7. Puntos fijos utilizados en la ITS-90

SUSTANCIA Y ESTADO	PUNTO FIJO O INTERVALO (°K)	PUNTO FIJO O INTERVALO (°C)
Relación presión de vapor/temperatura del helio - 3 (*)	0.65 a 3.2	-272.5 a -269.95
Relación presión de vapor/temperatura del helio-4 por debajo del punto lambda (*)	1.25 a 2.1768	-271.9 a -270.9732
Relación presión de vapor/temperatura del helio-4 por encima de su punto lambda (*)	2.1768 a 5	-270.9732 a -268.15
Relación presión de vapor/temperatura del helio (*)	3 a 5	-270.15 a -268.15
Punto triple del hidrógeno	13.8033	-259.3467
Punto triple del neón	24.5561	-248.5939
Punto triple del oxígeno	54.3584	-218.7916
Punto triple del argón	83.8058	-189.3442
Punto triple del mercurio	234.3156	-38.8344
Punto triple del agua	273.16	0.01
Punto de fusión del galio	302.9146	29.7646
Punto de solidificación del indio	429.7485	156.5985
Punto de solidificación del estaño	505.078	231.928
Punto de solidificación del cinc	692.677	419.527
Punto de solidificación del aluminio	933.473	660.323
Punto de solidificación de la plata	1234.93	961.78
Punto de solidificación del oro	1337.33	1064.18
Punto de solidificación del cobre	1357.77	1084.62

(*) Mediante el empleo de ecuación

Debido a que la escala IPTS-68 no se encontraba definida por debajo de una temperatura de 13.8 °K, el Comité Internacional de Pesas y Medidas dividió la ITS-90 en cuatro intervalos, fijando los siguientes estándares para temperaturas por debajo de la anterior:

- Entre los 0.65 °K y los 5 °K, la temperatura se definió en términos de la presión de vapor (relación de temperatura del isótopo de Helio).
- Entre 3 °K y el punto de ebullición del Neón (27.102 °K), la temperatura se definió por medio de un termómetro de gas (Helio).

- Para temperaturas por encima de los 13.8 °K, los estándares de temperatura son los siguientes (7):
 - Entre el punto triple del Hidrógeno (13.81 °K) y el punto de fusión de la plata (961.93 °C), la temperatura es determinada con ayuda de termómetros de resistencia de platino. Se utilizan fórmulas específicas para el cálculo de la temperatura práctica internacional a partir de los valores medidos de la resistencia del termómetro dentro de este intervalo; las constantes de dichas fórmulas se determinan midiendo la resistencia en los puntos fijos específicos entre el punto triple del hidrógeno y el punto de fusión del Cinc (419.58 °C).
 - En el intervalo de temperaturas de 630.74 °C (punto de fusión del Antimonio) a 1064.43 °C (punto de fusión del oro), el instrumento patrón es la termocupla de Platino, una aleación de Platino y 10% de Rodio.
 - Cuando las temperaturas son superiores al punto de fusión del oro (1064.43 °C), éstas se determinan midiendo el poder emisor de un cuerpo negro y calculando la temperatura a partir de la ley de radiación de Planck.

La realización de la ITS-90 requiere la medición del instrumento de interpolación apropiado en los puntos fijos correspondientes al rango de calibración. Para llevar a cabo el proceso de calibración se relacionan varios puntos termodinámicos, entre ellos el punto triple del agua (273.16 °K) y el punto de fusión de la misma (273.15 °K). Se utiliza un termómetro para interpolar la temperatura entre los puntos fijos de acuerdo con las ecuaciones definidas por la escala, misma que podrá servir como patrón de referencia en calibraciones por comparación de otros termómetros [7].

La calibración por comparación es un procedimiento mediante el cual se realiza la comparación directa de la respuesta de un termómetro calibrado previamente con la de aquéllos en proceso de calibración a varias temperaturas.

Entre los principales termómetros calibrados empleados como patrones secundarios se encuentran los termómetros de resistencia de platino industrial, los cuales utilizan como punto de calibración común el punto triple del agua [7].

El punto triple del agua es la combinación de temperatura y presión en el agua, misma que coexiste en sus tres fases (sólida, líquida y gaseosa) en un estado de equilibrio. El punto triple del agua ocurre a una temperatura de 0.01 °C (273.16°K) y a una presión de 4.58 mm de Hg [7].

Uno de los métodos para medir y observar el punto triple del agua es la celda de punto triple del agua.

3.8 CELDA DE PUNTO TRIPLE DEL AGUA

La celda de punto triple es un cilindro sellado de doble pared. En su interior contiene un volumen de agua pura y un espacio determinado para la succión del aire, con el fin de conseguir un vacío.

El agua utilizada para llenar la celda debe de ser pura, es decir, un agua libre de cualquier clase de impurezas (aunque en la práctica es difícil que esto se logre).

Para tener un alto grado de pureza, el agua requiere de un proceso de destilación. Es preferible realizar este proceso hasta 3 veces para eliminar al máximo las impurezas que llegaran a estar presentes en este líquido.

El agua contiene gases, mismos que deben ser evacuados con la utilización de un método adecuado de desgasificación al momento de llenar la celda.

Existe una relación directa entre la desgasificación del agua y la exactitud de la celda en la medición del punto triple del agua. Entre mayor sea la cantidad de gas contenido en el agua, mayor será la desviación en la medición respecto del punto fijo.

La celda debe estar elaborada con un material inerte para que no contamine el agua, ya que la presencia de contaminantes en la misma no permiten alcanzar las condiciones necesarias para el desarrollo del punto triple.

Asimismo, el material con que se construya la celda debe ser resistente: al generarse al interior de la misma un vacío, ésta queda expuesta a la presión atmosférica, la cual tiende a producir fuerzas hacia su interior.

En la actualidad, el material mayormente utilizado es el vidrio pyrex, el cual permite apreciar la formación de la capa de hielo en la celda además de asegurar la limpieza del recipiente y del agua.

El diseño de la celda permite la inserción de un termómetro de alta exactitud, como es el termómetro de resistencia de platino, el cual tiene un mayor rango de precisión que cualquier otro tipo de termómetro y es por tanto utilizado para comparar celdas de punto triple de agua.

CAPÍTULO 4

“ELABORACIÓN DE PROTOTIPOS DE CELDA DE PUNTO DE CONGELACIÓN DEL AGUA”

Entre los puntos fijos más importantes y que cuentan con un menor grado de incertidumbre dentro de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS 90), se encuentra el punto triple del agua.

Se ha comprobado que el punto triple del agua es un punto de referencia preciso, que se puede reproducir y observar fácilmente. Se trata de un punto fijo que se ha usado para la calibración básica de termómetros y otros sensores de temperatura.

Este punto fijo puede ser reproducible en cualquier parte del mundo. Una forma sencilla de lograrlo es fabricar una celda de punto triple del agua. Sin embargo, los costos de elaboración de la misma son elevados debido al tipo de material y al proceso que requiere.

Por tal motivo se ha desarrollado un prototipo de celda en el cual se reproducirá el punto de congelación del agua, utilizando materiales de fácil adquisición y de muy bajo costo. En dicha celda se realizarán tomas de mediciones de temperatura mediante el empleo de un termómetro de resistencia de platino, cuya referencia de calibración es el punto triple del agua; ésta deberá encontrarse a 0.01 °C. Con base en los datos y la proximidad de éstos al punto de congelación del agua, se busca comprobar la funcionalidad de la celda para su posterior utilización.

Asimismo, se llevará a cabo en el llenado de la celda una comparación entre dos tipos de agua (potable y desionizada), en las cuales el grado de pureza determinará la aproximación y exactitud a los 0.01 °C. Se determinará con cuál de ellas conviene llenar dicha celda. La toma de mediciones de temperatura se realizará con ayuda de un termómetro de resistencia de platino, con el cual se pretenderá resaltar la factibilidad y reproducibilidad de este punto fijo con ayuda del prototipo de celda para ser posteriormente utilizado como un elemento de calibración.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA CELDA

Este prototipo de celda fue diseñado para contar con un elemento que permitiera brindar un sistema de calibración sencillo, y en cuyo proceso de construcción no sea necesario el empleo de materiales de alto costo [8].

El prototipo de celda consiste en una botella de plástico de 1/2 litro de capacidad, la cual resiste una presión máxima de 5 bares. Preferentemente, la botella debe componerse de un material transparente, mismo que permita observar la formación de la capa de hielo así como la coexistencia de la fase líquida con la sólida en el interior.

Dicho material transparente también servirá para asegurar la limpieza de la botella y del agua que contenga [8].

El agua utilizada para llenar la celda debe ser pura. El agua pura es aquella que se encuentra libre de sales o de cualquier otro tipo de impureza, aunque en la práctica resulta imposible obtener agua de estas características.

Para obtener un alto grado de pureza en el agua, ésta deberá ser bidestilada o tridestilada. Con fines prácticos se emplea agua desionizada, cuyo grado de pureza es elevado, siendo ésta la indicada para el llenado de la celda.

Existe una relación directa entre la pureza del agua y la exactitud que presentan las mediciones de temperatura. Un ejemplo de esto es el gas contenido en el agua: si este líquido cuenta con una cantidad grande de gas, mayor será la desviación de la medición con respecto del punto fijo a utilizar.

Por esta razón, se ha optado por comprobar lo anterior mediante la observación de la desviación presentada en la lectura de valores de temperatura tomados de la celda al ser llenada con agua desionizada. De igual manera se fabrica una celda con agua de un grado de pureza menor al de la desionizada, el agua potable; al final de la experimentación y en base a las mediciones de temperatura, se realizará una comparación entre los resultados obtenidos, los cuales a su vez permitirán obtener las conclusiones de la experimentación.

Al igual que una celda de punto triple cuyo diseño permite la inserción en su centro de un termómetro de alta exactitud –como es el caso del termómetro de resistencia de platino-, el prototipo de celda deberá contener un pozo en su centro en el cual pueda ser introducido el termómetro de resistencia de platino. Para ello se empleará un tubo que realizará la función de pozo en la celda; éste será insertado en la tapa de la botella para posteriormente efectuar la toma de mediciones de temperatura.

Para la fabricación de dicho pozo se efectuaron varias pruebas con distintos materiales. Con base en la resistencia mostrada por cada uno de ellos al ser expuestos a condiciones análogas a las que será expuesta la celda, se seleccionará el adecuado para construir la celda.

Es así que con la selección del material con que se elaborará este último elemento quedan confeccionadas por completo todas las partes que conforman el diseño de la celda de punto de congelación.



Figura 18. Tubo y tapa seleccionados

4.2 PRUEBAS EN MATERIALES DIVERSOS

Para que la celda pueda ser empleada como un patrón de referencia, debe ser fabricada para ser utilizada durante mucho tiempo, ofreciendo medidas confiables y niveles de exactitud adecuados. Por ello es necesario realizar una serie de pruebas de resistencia en cada uno de los materiales que conformarán la celda, exponiendo cada uno de ellos al ambiente y demás condiciones de operación a las cuales será expuesta la celda.

La elaboración de la celda requirió la realización previa de ciertas pruebas de resistencia a la botella de plástico, misma que fue sometida a una serie de procesos de congelación similares a los que existirán en condiciones normales de operación. Ya que ésta es la estructura principal de la celda, debió ser expuesta a condiciones extremas, llenándose por completo de agua.

Una masa sólida de agua ocupa un volumen mayor que en estado líquido; el aumento de volumen del agua y de tensiones en la superficie de las paredes puede generar que la botella se deforme o que existan rupturas en las paredes o el fondo de la misma. Por esta razón fue necesario realizar alrededor de 16 pruebas de congelación, verificando al término de cada una de ellas la ausencia de deformaciones o fracturas en las paredes y el fondo de la botella. Así se dio final a todas las pruebas y, después de probar la resistencia de las botellas, se determinó si su empleo en el diseño y fabricación de la celda era el idóneo.



Figura 19. Apariencia del fondo de botella tras congelación número 6

Una vez que se llevó a cabo el proceso de inspección y se observó la ausencia de deformaciones y fracturas en la superficie y el fondo de la botella, se optó por el empleo de la botella de plástico como estructura principal de la celda.

Después de elegir dicha botella como parte estructural de la celda, se procedió a la búsqueda y fabricación del pozo donde sería insertado el termómetro de resistencia de platino.

Se dio inicio a una serie de pruebas con tubos de diferentes tipos de materiales, exponiendo cada uno de ellos a las mismas condiciones a las que fue expuesta la botella. Se comenzó con un tubo de vidrio, el cual al momento de ser introducido en la botella y sometido al proceso de congelación no resistió la fuerza de expansión del hielo, misma que generó fracturas. Tomando como base lo anterior, se concluyó que este tipo de material no es el adecuado para el diseño de la celda.

Posteriormente, se efectuaron las mismas pruebas con un tubo de acero, el cual fue sellado en uno de sus extremos con soldadura. Al ser expuesto a varios procesos de congelación junto con la celda se desprendió la soldadura, provocando que el agua entrara a causa de la expansión del hielo, aunque sin presentar daños de ningún tipo en las paredes del mismo. Por esta razón se procedió a buscar una solución para el problema relacionado con la soldadura.

Una de las primeras opciones considerada para corregir este problema fue el empleo de soldadura a alta temperatura. Una vez que se aplicó este tipo de soldadura al tubo y se le expuso de nueva cuenta al proceso, no presentó desprendimiento ni daño alguno en la estructura, impidiendo la entrada del hielo al interior del tubo y logrando darle solución al problema presentado.

Una vez seleccionado el material con el cual se fabricaría el tubo que ejercería la función de pozo en la celda, quedaron concluidas todas las pruebas de los materiales que formarían parte del diseño de la celda. Entonces se procedió a la preparación de ésta.

4.3 PREPARACIÓN DE LA CELDA

La primera etapa de la preparación de la celda consistió en el lavado por separado de cada una de las partes que la conforman. Estas son la botella, el tubo y la tapa, que posteriormente fueron unidos y formaron el prototipo de celda. Con esto se redujo la presencia de impurezas en la celda al momento de ser llenada, evitando así cualquier interferencia que pudiera causar variaciones en los valores obtenidos al realizar la toma de mediciones de temperatura con ayuda del termómetro de resistencia de platino .

En la limpieza efectuada en la botella y el tubo se realizó un lavado con detergente y posteriormente una serie de enjuagues con agua para eliminar cualquier residuo.



Figura 20. Limpieza de tubo para reducir impurezas en el mismo

Una vez lavada la botella, se procedió al llenado de la misma, considerando el tipo de agua con que se realizaría la primera parte de la experimentación y la toma de lecturas de temperatura.



Figura 21. Llenado de celda (agua desionizada)

En el caso de la celda de agua desionizada, fue necesario realizar una limpieza adicional al tubo para evitar su contaminación. Se le sometió a una serie de lavados con agua en ebullición con el fin de obtener un mayor grado de limpieza en su superficie.



Figura 22. Limpieza de tubo con agua en ebullición

Una vez llenada la botella, ésta fue cerrada con ayuda de la tapa en la cual se encontraba insertado el tubo de acero, procurando en gran medida que el tubo estuviera lo más ajustado posible a la tapa y evitando con esto la entrada de aire y la salida del agua. Esto ya que, como se ha mencionado anteriormente, la presencia de una gran cantidad de aire u otro tipo de impureza puede causar variaciones en los valores de temperatura obtenidos con ayuda del termómetro de resistencia de platino.

Ya elaborada y armada en su totalidad, la celda se encontró lista para ser expuesta a la serie de pruebas y ensayos correspondientes a la parte experimental, con el fin de comprobar su funcionalidad.

Con esta última parte se dio fin a la preparación de la celda para continuar con la secuencia de pruebas y ensayos correspondientes a la parte experimental.

4.4 PRUEBAS Y ENSAYOS

Una vez concluida la preparación de la celda, se dio inicio al desarrollo de la secuencia de pasos con los que se llevaría a cabo la fase experimental, relacionada con la toma de lectura de valores de temperatura presentes en este artefacto.

Se procedió al enfriamiento y congelación de la celda, acción que fue llevada a cabo mediante el empleo de un refrigerador convencional. Con dicho refrigerador se seguiría desarrollando el proceso de congelación en las posteriores fases experimentales de la celda, en la toma de mediciones de temperatura.

Una desventaja presentada en el proceso de formación de la fase sólida fue el tiempo prolongado que tomó la congelación de la celda.

El proceso de congelación de la celda en su totalidad se realizó en un lapso de tiempo aproximado de 7 horas a potencia media del congelador. El empleo de tiempos prolongados en cada una de estas fases experimentales podría resultar un inconveniente en la secuencia de las mismas.

Unos de los problemas presentados durante el proceso de congelación de la celda fue el desplazamiento en el tubo provocado por la fuerza de expansión del agua al pasar de la fase líquida a la sólida, así como la salida de una cierta cantidad de líquido provocada por el mismo efecto de expansión del hielo.



Figura 23. Desplazamiento presentado en el tubo por efecto de expansión del hielo

Para dar solución a la salida de líquido en la celda por el efecto de expansión del agua, se llenó ésta a diferente capacidad de volumen.

Un primer intento por determinar la capacidad de llenado de la celda consistió en llenar ésta a una distancia de 1 cm con respecto de la boca de la botella; sin embargo, al momento de efectuar la congelación de la celda, el problema de la salida de una cierta cantidad de agua se continuó presentando.

Entonces se llenó la celda hasta una distancia de 2 cm con respecto de la boca de la botella, pero se siguió presentando el mismo problema, aunque en una menor cantidad que en las ocasiones anteriores. Por esta razón se realizó una siguiente prueba con el fin de reducir al máximo o de eliminar la salida de líquido de la celda.

En un último intento por encontrar el volumen óptimo de llenado de la celda, se llenó ésta a 3 cm de la boca de la botella y se encontró que esta distancia es la más adecuada para evitar la fuga de líquido en las pruebas de congelación así como para posteriores pruebas concernientes a la duración de la fase experimental de la celda.



Figura 24. Volumen seleccionado para llenado de celda

Una vez solucionado el primer inconveniente presentado durante la congelación de la celda, se buscó dar solución al siguiente problema surgido durante el mismo proceso: el desplazamiento del tubo por efecto de la expansión del hielo.

Una de las acciones planteadas para resolver dicho problema fue la colocación en la parte superior de la botella de un elemento que sujetaría al tubo para así evitar el desplazamiento del mismo. Al colocar tal elemento y realizar pruebas posteriores, se logró evitar el desplazamiento. De este modo se eliminaron todos los inconvenientes y problemas presentados durante el proceso de congelación de la celda.

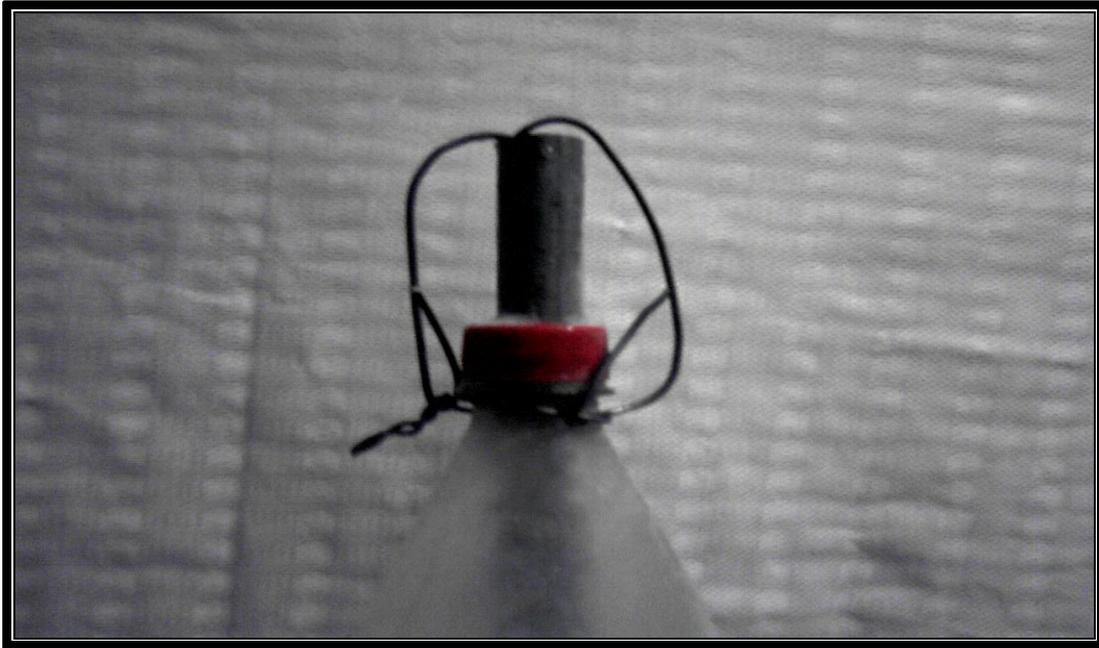


Figura 25. Elemento empleado para sujetar al tubo durante congelación

Una vez solucionados los problemas presentados durante el proceso de pruebas, se prosiguió a la preparación para la toma de lecturas de temperatura.

4.5 PREPARACIÓN PARA LAS LECTURAS

Como ya se mencionó en este trabajo, para la formación de la fase sólida dentro de la celda fue necesario el empleo de un refrigerador convencional.

El tiempo promedio para la formación de la fase sólida en su totalidad fue de 7 horas.



Figura 26. Congelador utilizado en elaboración de celda

Después de congelar la celda en su totalidad, ésta fue retirada del refrigerador por un lapso de tiempo de alrededor de 2 horas 40 minutos para que se formará la fase líquida y sólida dentro de la celda. Esto debido a que el sólido debe estar libre para girar alrededor del pozo antes de tomar cualquier lectura, pues la formación de la interfase entre el pozo y el sólido es necesaria.



Figura 27. Formación de la interfase

Ya lograda la formación de la interfase dentro de la celda, la misma fue sumergida por completo en un recipiente que contenía hielo triturado. Éste permitiría la conservación de ambas fases durante un tiempo prolongado, necesario para la toma de lecturas de temperatura.

A continuación se describe la manera en que fue aplicado este baño refrigerante así como cada una de las variables a controlar para una correcta aplicación del mismo.

El objetivo de describir el proceso de conservación de la interfase sólido-líquido es indicar algunos de los cuidados, precauciones, técnicas y elementos a utilizar para garantizar la precisión en los valores de temperatura obtenidos en cada una de las fases experimentales.

Asimismo, en cada uno de los resultados obtenidos en la comparación de las celdas de agua se debe tener en cuenta la formación de la interfase sólido-líquido, misma que se encuentra en contacto con el pozo, y las variaciones o incertidumbres en los valores de temperatura generadas por el tamaño del manto de hielo que cubre la celda.

La toma de lecturas de temperatura debe iniciarse cuando se alcance un valor de temperatura estable en el termómetro de resistencia de platino.

Ya que se logró el equilibrio en la temperatura de la celda, cercano al punto de congelación del agua indicado en el termómetro de resistencia, es necesario que ésta se mantenga estable, por lo que debe conservarse la interfase sólido-líquido dentro de la misma mediante el empleo de un baño refrigerante de hielo.

El baño refrigerante de hielo no debe contener espacios en los cuales pueda quedar atrapado el aire, mismo que podría generar alguna variación en la temperatura. Esto se logró mediante el machacado del hielo en trozos pequeños.

Una vez transcurridas las fases experimentales y transcurriendo el tiempo en el que se realiza cada una, comenzó a apreciarse el aumento en la cantidad de agua dentro del baño refrigerante; entonces fue preciso disminuir la cantidad de agua y reponer ésta por hielo machacado dentro del baño refrigerante, con el fin de evitar la interferencia de la temperatura ambiente en la celda. Esta acción debe repetirse cuantas veces sean necesarias hasta el término de la fase experimental. La temperatura puede valorarse a través de los registros de temperatura obtenidos con ayuda del termómetro de resistencia de platino.

Para la realización de la toma de mediciones no fue necesaria la colocación de ningún tipo de protección contra la radiación del ambiente, como es el caso de un paño negro, el cual no permite que la radiación del entorno cause alteración alguna en la toma de mediciones de temperatura.



Figura 28. Baño de hielo aplicado a la celda

Una vez que fue introducida la celda y cubierta por completo de hielo, se buscó una forma eficiente de lograr el equilibrio de temperaturas entre la celda y el termómetro en un lapso de tiempo menos prolongado. Para ello se llenó el pozo de cada celda con el tipo de agua con la que se encuentra llena ésta; después de que se logró el equilibrio térmico, se introdujo el termómetro de resistencia de platino para efectuar la lectura de temperaturas.

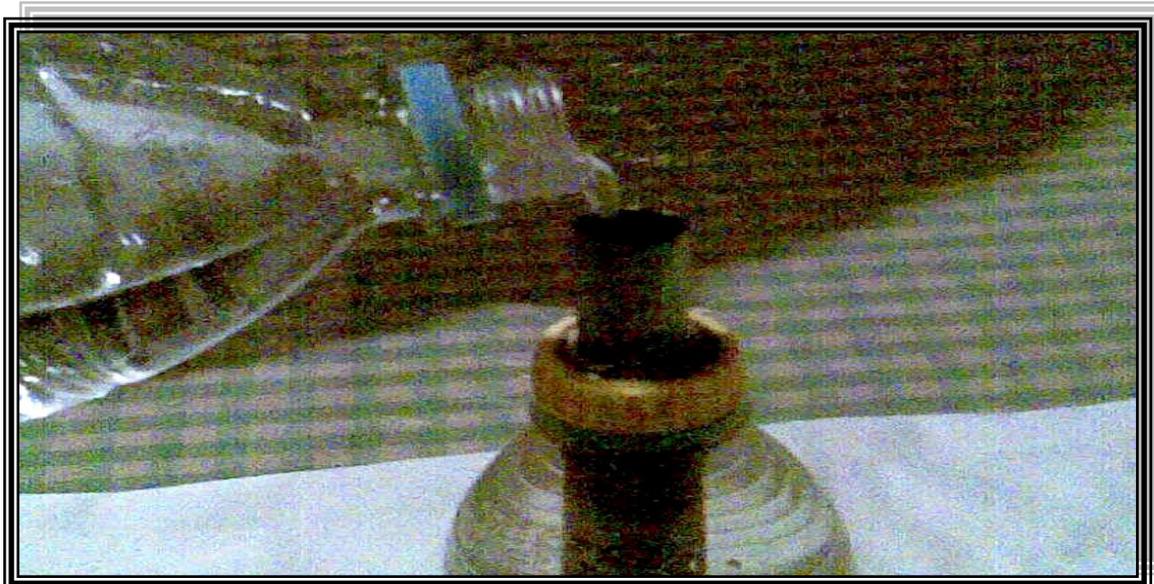


Figura 29. Llenado de pozo de celda para lograr el equilibrio térmico

4.6 MEDICIONES DE TEMPERATURA

En seguida de que se logró el equilibrio térmico y la estabilización de la temperatura, con ayuda del termómetro de resistencia de platino se procedió a la medición de la temperatura.

Las tomas de lectura de la temperatura fueron hechas con un termómetro de resistencia de platino F-100, el cual cuenta con una precisión de $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una resolución de $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 30. Termómetro de resistencia F-100, utilizado en tomas de lectura de temperatura

Antes de introducir en el pozo de la celda el termómetro de resistencia de platino F-100, se debe cuidar que éste no entre en contacto con las paredes del tubo, ya que podría sufrir algún tipo de descalibración o presentar errores en las lecturas de la temperatura.

Por este motivo se tomaron las medidas necesarias para evitar que esto sucediera, lo que precisó dejar una distancia entre las paredes del pozo y el termómetro para evitar el mínimo contacto entre ambos. Con todas la precauciones necesarias bajo control, se procedió a la lectura de la temperatura.

La secuencia del tiempo en que se realizó el registro de los valores de temperatura obtenidos con ayuda del termómetro de resistencia de platino fue programada con ayuda de una PC. Con ésta se determinó el lapso de tiempo que debe transcurrir entre cada una de las lecturas de temperatura. Dichas lecturas permiten observar el comportamiento de cada una de las celdas con respecto de los valores de temperatura en el tiempo transcurrido en cada una de las fases experimentales.

4.7 RESULTADOS

CELDA DE AGUA POTABLE

En este apartado se presentan uno a uno los resultados obtenidos en cada una de las fases experimentales a las que fue sometida la celda de agua potable.

Los valores obtenidos mediante las lecturas de temperatura llevadas a cabo en las celdas durante las fases experimentales fueron registrados en la PC. Posteriormente se efectuó la comparación entre la celda de agua potable y la de agua desionizada. Se seleccionó la celda que ofreció mejores resultados en aproximación y constancia de valores de temperatura cercanos al punto de congelación del agua.

La primera celda sometida a las fases experimentales fue la celda llena con agua potable. A continuación se presentan los resultados obtenidos en dichas fases.

EXPERIMENTACIÓN # 1 CELDA DE AGUA POTABLE

En el experimento número uno, realizado con la celda de agua potable, las lecturas de temperatura fueron programadas para ser registradas en un intervalo de tiempo de 15 segundos. Esto fue posible gracias a las características del termómetro de resistencia de platino F-100, el cual permite medir y registrar cada uno de los valores obtenidos durante la toma de lecturas de temperatura con ayuda de una PC.

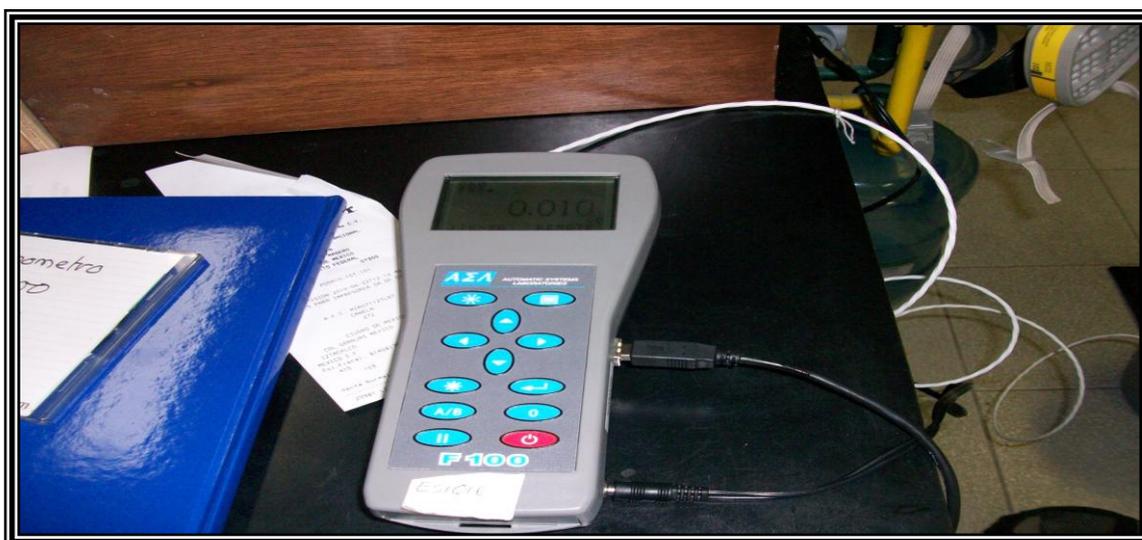


Figura 31. Termómetro conectado a PC para registro de lecturas

En esta fase, mantener la celda cubierta por hielo propicia que la fase sólida se conserve durante un periodo de tiempo mucho mayor, lo que a su vez permite que la parte experimental sea de mayor duración; esto evita la variación gradual de los valores de temperatura obtenidos debido al descongelamiento o pérdida de la fase sólida dentro de la celda.

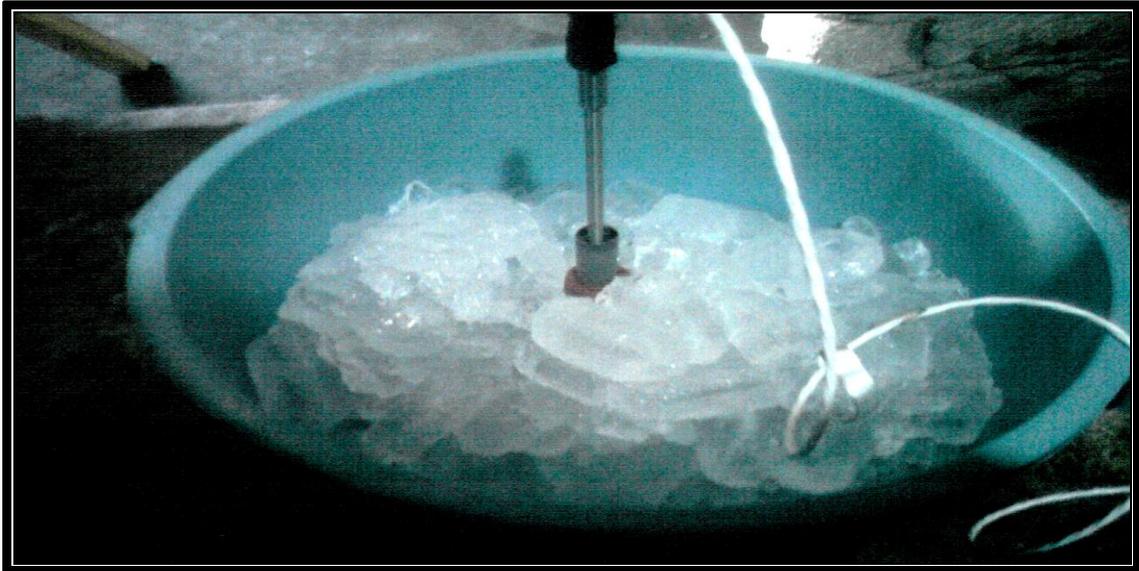


Figura 32. Conservación de fase sólida en celda por baño de hielo

Los valores obtenidos en este primer experimento se mantuvieron constantes durante un rango de tiempo aproximado de 1 hora 20 minutos, en el cual la constante de dichos valores se mantuvo en los 0.01 °C con una desviación de +/- 0.002 °C. Cada uno de los valores obtenidos durante esta experimentación se muestra en la siguiente tabla. Debido a la gran cantidad de valores obtenidos, se estableció un rango de tiempo de 3 minutos para la representación de cada uno de los valores de temperatura registrados en la tabla.

Tabla 8. Valores obtenidos durante la experimentación # 1

MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)	MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)
1	1:36:49 p.m.	0,024	15	2:18:00 p.m.	0,01
2	1:39:10 p.m.	0,012	16	2:21:04 p.m.	0,011
3	1:42:13 p.m.	0,01	17	2:24:08 p.m.	0,011
4	1:45:02 p.m.	0,01	18	2:27:27 p.m.	0,01
5	1:48:05 p.m.	0,01	19	2:30:16 p.m.	0,01
6	1:51:09 p.m.	0,01	20	2:33:06 p.m.	0,01
7	1:54:13 p.m.	0,01	21	2:36:10 p.m.	0,011
8	1:57:02 p.m.	0,011	22	2:39:14 p.m.	0,011
9	2:00:06 p.m.	0,01	23	2:42:03 p.m.	0,011
10	2:03:09 p.m.	0,01	24	2:45:07 p.m.	0,01
11	2:06:13 p.m.	0,01	25	2:48:10 p.m.	0,01
12	2:09:03 p.m.	0,01	26	2:51:00 p.m.	0,011
13	2:12:06 p.m.	0,01	27	2:54:04 p.m.	0,009
14	2:15:11 p.m.	0,011	28	2:57:06 p.m.	0,01

El comportamiento de los valores de temperatura obtenidos durante la primera fase experimental de la celda de agua potable, registrados en la tabla anterior, puede ser observado en la siguiente gráfica:

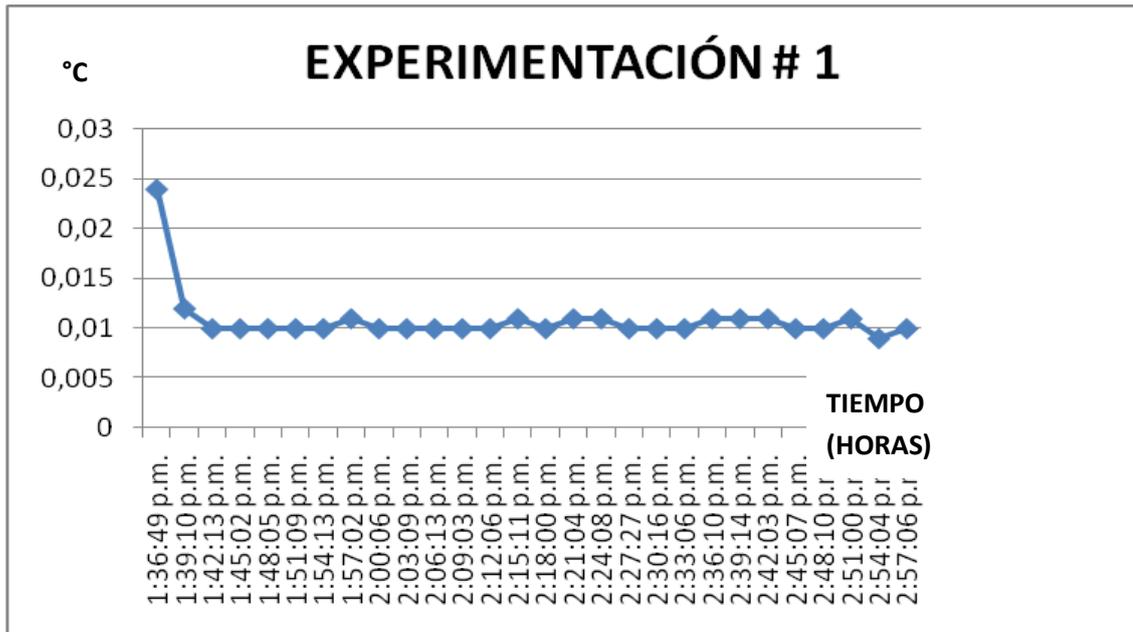


Figura 33. Gráfica de valores presentados en experimentación #1 en la celda de agua potable

En ella pueden apreciarse las variaciones de temperatura que se van presentando en el tiempo transcurrido durante esta fase experimental. La disminución de la temperatura en la celda puede ser apreciada dentro de la gráfica hasta alcanzar una constante dentro de la secuencia de los valores obtenidos durante el tiempo en que se efectuó la parte experimental. Es por este motivo que la celda debe mantenerse cubierta por completo de hielo para mantener dicha constante de valores durante un lapso de tiempo más prolongado, y el hielo debe sustituirse cuantas veces sea necesario para lograr este fin.

EXPERIMENTACIÓN # 2 CELDA DE AGUA POTABLE

Para poder llevar a cabo la experimentación número dos en la celda de agua potable, se cuidaron los mismos detalles de la experimentación número uno. Se conservó la fase sólida dentro de la celda por un tiempo más prolongado mediante la aplicación de baños de hielo y se evitó el contacto del termómetro con el tubo de la celda para evitar la descalibración del mismo.

Los valores obtenidos en esta fase experimental pueden ser apreciados como en la fase experimental anterior, manteniendo de igual forma un valor constante de 0.01°C en un lapso de tiempo de 1 hora y 15 minutos, con una desviación de ± 0.002 °C en algunas mediciones. Cada uno de los valores se registró en la tabla siguiente:

Tabla 9. Resultados de experimentación # 2 en celda de agua potable

MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)	MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)
1	20:38:41p.m.	0.013	15	21:23:02p.m.	0.01
2	20:41:02p.m.	0.014	16	21:26:02p.m.	0.01
3	20:47:03p.m.	0.009	17	21:29:02p.m.	0.01
4	20:50:03p.m.	0.011	18	21:32:02p.m.	0.01
5	20:53:03p.m.	0.01	19	21:35:05p.m.	0.01
6	20:56:02p.m.	0.01	20	21:38:05p.m.	0.009
7	20:59:03p.m.	0.01	21	21:41:05p.m.	0.01
8	21:02:02p.m.	0.011	22	21:44:20p.m.	0.01
9	21:05:03p.m.	0.01	23	21:47:05p.m.	0.01
10	21:08:03p.m.	0.011	24	21:50:20p.m.	0.009
11	21:11:02p.m.	0.011	25	21:53:05p.m.	0.012
12	21:14:02p.m.	0.01	26	21:56:20p.m.	0.014
13	21:17:03p.m.	0.01			
14	21:20:02p.m.	0.011			

Los valores de temperatura en la celda llena de agua potable presentados en la tabla anterior pueden ser observados igualmente en la siguiente gráfica.

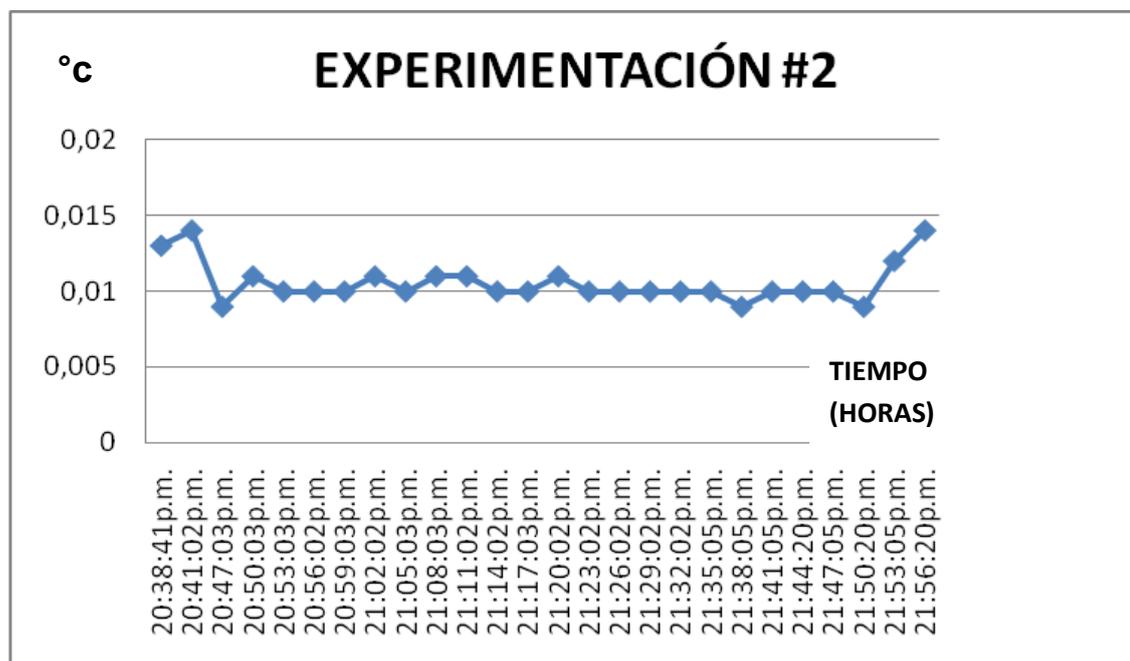


Figura 34. Gráfica de valores presentados en experimentación # 2 en celda de agua potable

Aquí puede apreciarse la disminución de la temperatura dentro de la celda al comienzo de la experimentación hasta alcanzar un equilibrio, para posteriormente mantenerse una constante en los valores de temperatura durante un periodo relativamente largo con una desviación mínima entre algunos de ellos. Finalmente se presentó un aumento gradual de temperatura debido al derretimiento del hielo que cubría la celda durante la experimentación.

EXPERIMENTACIÓN # 3 CELDA DE AGUA POTABLE

Para mantener la continuidad de la fase experimental de la celda de agua potable, al igual que en las fases experimentales anteriores se debe tener sumo cuidado en mantener controladas cada una de las variables que pueden influir en el desarrollo de la experimentación. El no controlarlas puede causar una desviación, la cual puede ser poco apreciable o muy pronunciada dependiendo del nivel de control que se haya mantenido de las variables durante el experimento.

Los valores obtenidos durante esta experimentación permanecieron constantes durante un lapso de tiempo aproximado de 1 hora y 50 minutos; de igual manera, el valor 0.01 °C permaneció casi constante durante las lecturas, manteniéndose una variación aproximada de +/- 0.002 °C.

Cada uno de los valores obtenidos durante el tiempo que duró dicha experimentación pueden ser apreciados en la siguiente tabla:

Tabla 10. Resultados de experimentación # 3 en celda de agua potable

MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)	MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)
1	18:00:19p.m.	0.021	15	18:42:24p.m.	0.01
2	18:03:09p.m.	0.011	16	18:45:09p.m.	0.01
3	18:06:24p.m.	0.01	17	18:48:24p.m.	0.011
4	18:09:09p.m.	0.011	18	18:51:09p.m.	0.01
5	18:12:24p.m.	0.009	19	18:54:24p.m.	0.011
6	18:15:09p.m.	0.01	20	18:57:09p.m.	0.01
7	18:18:24p.m.	0.09	21	19:00:24p.m.	0.011
8	18:21:09p.m.	0.01	22	19:03:09p.m.	0.011
9	18:24:24p.m.	0.011	23	19:06:24p.m.	0.012
10	18:27:09p.m.	0.011	24	19:09:09p.m.	0.01
11	18:30:24p.m.	0.01	25	19:12:24p.m.	0.011
12	18:33:09p.m.	0.01	26	19:15:09p.m.	0.009
13	18:36:24p.m.	0.01	27	19:48:39p.m.	0.015
14	18:39:09p.m.	0.01	28	19:49:24p.m.	0.014

En la siguiente gráfica se expone cada uno de los valores de temperatura mostrados en la tabla anterior.

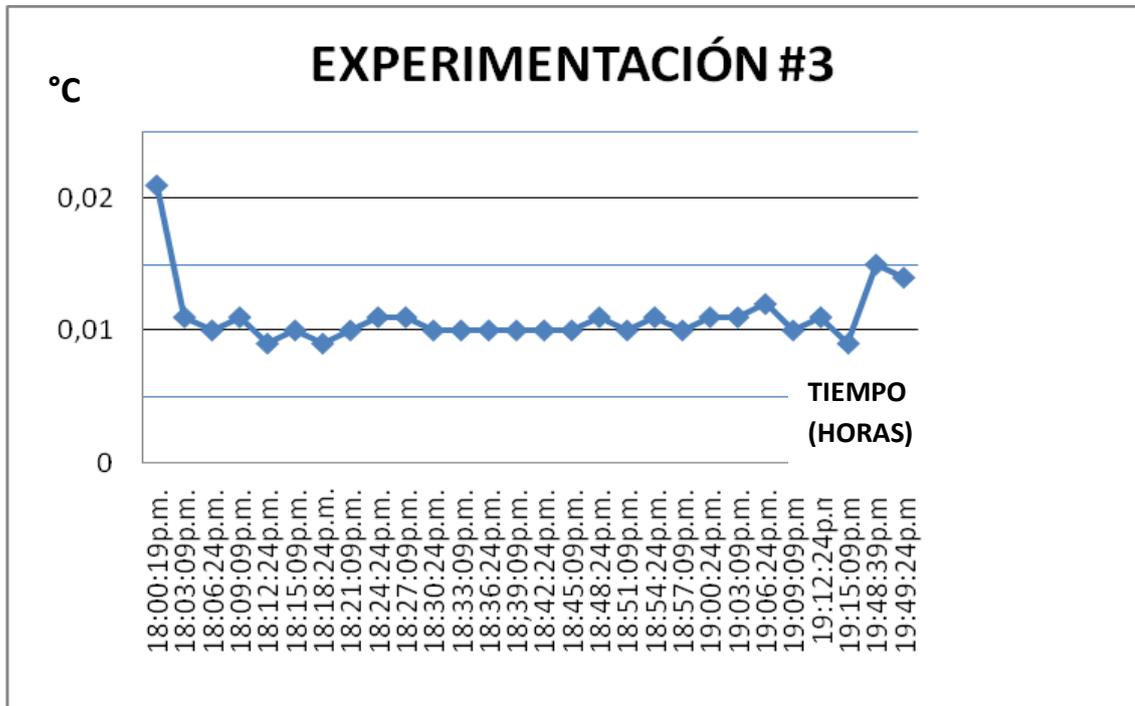


Figura 35. Gráfica de valores presentados en experimentación # 3 en celda de agua potable

En dicha gráfica se puede apreciar el comportamiento presentado en la celda a partir de los valores obtenidos en las lecturas de temperatura con ayuda del termómetro de resistencia de platino. Se percibe una disminución en la temperatura hasta lograrse un equilibrio debido a la acción de un baño de hielo que cubre a la celda por completo. Posteriormente, se percibe un aumento gradual en la temperatura debido al derretimiento de este hielo.

EXPERIMENTACIÓN # 4 CELDA DE AGUA POTABLE

Esta última fase experimental, en conjunto con las tres fases experimentales anteriores, brindó una aportación importante a la comprobación de la reproducibilidad de los valores obtenidos en cada una de las tomas de lectura de temperatura.

Los valores obtenidos en esta fase experimental –al igual que en las otras fases- permanecieron constantes durante un lapso de tiempo aproximado de 1 hora y 15 minutos; siendo el valor 0.01°C permaneció casi constante durante las lecturas, manteniendo una variación aproximada de +/- 0.002 °C.

Cada uno de los valores obtenidos durante el tiempo en que transcurrió la experimentación se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 11. Resultados de experimentación # 4 en celda de agua potable

MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)	MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)
1	18:09:21p.m.	0.021	15	18:51:11p.m.	0.011
2	18:12:12p.m.	0.011	16	18:54:11p.m.	0.01
3	18:15:11p.m.	0.01	17	18:57:11p.m.	0.011
4	18:18:11p.m.	0.01	18	19:00:11p.m.	0.01
5	18:21:11p.m.	0.01	19	19:03:11p.m.	0.01
6	18:24:11p.m.	0.01	20	19:06:11p.m.	0.01
7	18:27:11p.m.	0.011	21	19:09:11p.m.	0.011
8	18:30:11p.m.	0.01	22	19:12:11p.m.	0.011
9	18:33:11p.m.	0.011	23	19:15:11p.m.	0.011
10	18:36:12p.m.	0.011	24	19:18:11p.m.	0.011
11	19:39:11p.m.	0.011	25	19:21:11p.m.	0.01
12	18:42:11p.m.	0.01	26	19:24:11p.m.	0.009
13	18:45:26.p.m.	0.01	27	19:27:26p.m.	0.011
14	18:48:11p.m.	0.01	28	19:30:11p.m.	0.01

Los valores de temperatura mostrados en la tabla anterior quedan representados uno a uno en la siguiente gráfica, la cual muestra su comportamiento en el transcurso de dicha experimentación.

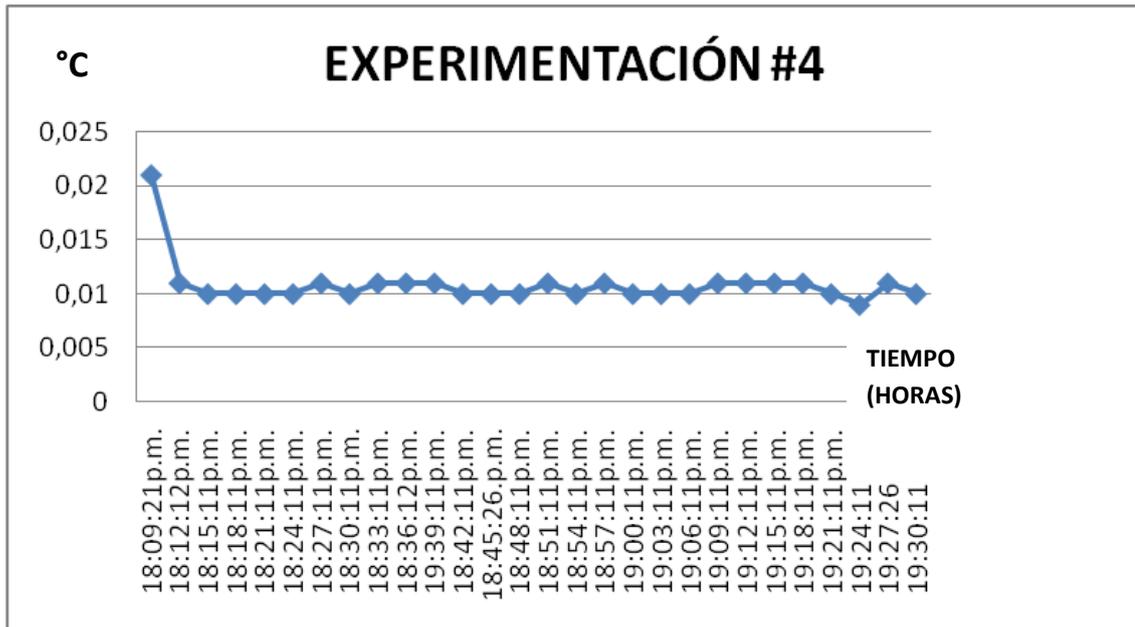


Figura 36. Gráfica de valores presentados en experimentación # 4 en celda de agua potable

Con base en los valores obtenidos mediante las tomas de lectura de temperatura en las cuatro fases experimentales, se logró determinar que la celda llena de agua potable puede ser utilizada como patrón de calibración. Esta conclusión se deriva de la reproducibilidad mostrada en cada una de las fases experimentales con valores cercanos al del punto triple del agua, mismo que se sitúa a los 0.01 °C. Además, la celda llena de agua potable presenta un rango de desviación relativamente bajo.

CELDA DE AGUA DESIONIZADA

Las tomas de lectura de temperatura en esta celda se realizaron de la misma manera que en la celda de agua potable, mediante el empleo del termómetro de resistencia de platino. Se procuró asimismo la conservación de la fase sólida dentro de la celda empleando baños de hielo. Una vez que la celda se cubrió de hielo en su totalidad, se dio comienzo a cada una de las fases experimentales.

EXPERIMENTACIÓN #1 CELDA DE AGUA DESIONIZADA

En el desarrollo de esta primera fase experimental realizada en la celda de agua desionizada, se obtuvo una serie de lecturas de temperatura, mismas que mantenían una constante en sus valores similar a la de la celda de agua potable. Se presentó un valor constante de temperatura de 0.01°C durante un lapso de tiempo aproximado de 1 hora y 20 minutos, mostrándose una desviación poco pronunciada de $\pm 0.002^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, dicho valor se presentó en menor medida que en la celda de agua potable.

Los valores obtenidos en esta fase experimental se exhiben en la siguiente tabla con un lapso de tiempo de tres minutos entre cada uno de ellos.

Tabla 12. Resultados de experimentación #1 en celda de agua desionizada

MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)	MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)
1	20:04:58p.m.	0.016	15	20:46:11p.m.	0.01
2	20:07:11p.m.	0.011	16	20:49:10p.m.	0.01
3	20:10:10p.m.	0.01	17	20:52:11p.m.	0.01
4	20:13:11p.m.	0.009	18	20:55:10p.m.	0.009
5	20:16:10p.m.	0.01	19	20:58:11p.m.	0.01
6	20:19:11p.m.	0.01	20	21:01:10p.m.	0.01
7	20:22:10p.m.	0.01	21	21:04:10p.m.	0.01
8	20:25:10p.m.	0.01	22	21:07:11p.m.	0.01
9	20:28:11p.m.	0.01	23	21:10:11p.m.	0.01
10	20:31:11p.m.	0.01	24	21:13:11p.m.	0.01
11	20:34:11p.m.	0.01	25	21:14:11p.m.	0.01
12	20:37:11p.m.	0.01	26	21:17:10p.m.	0.01
13	20:40:10p.m.	0.01	27	21:20:11p.m.	0.011
14	20:43:11p.m.	0.01	28	21:23:10p.m.	0.014

Los valores de temperatura obtenidos en esta celda y registrados en la tabla anterior quedan asimismo representados en la siguiente gráfica.

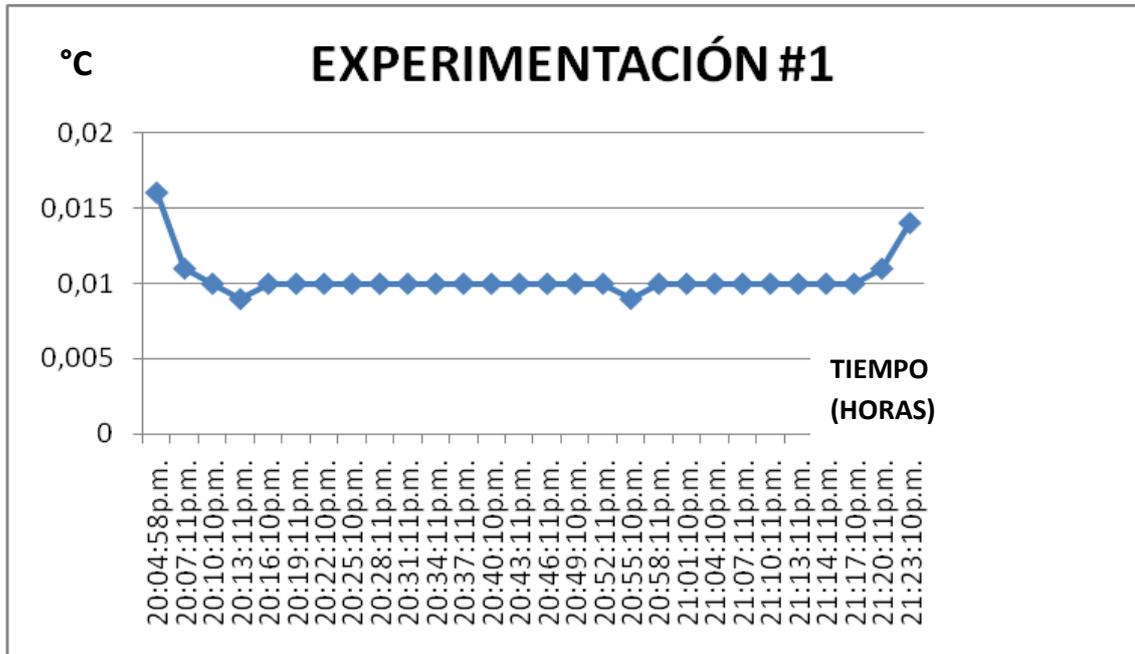


Figura 37. Gráfica de valores obtenidos en experimentación #1 en celda de agua desionizada

En esta gráfica es posible visualizar la constante en los valores de temperatura que se presentaron durante la fase experimental en la celda de agua desionizada. Puede apreciarse al comienzo de dicha fase la disminución de temperatura en la celda hasta alcanzar el equilibrio, así como el incremento gradual de la misma debido a la pérdida del hielo que cubría la celda.

EXPERIMENTACIÓN # 2: CELDA DE AGUA DESIONIZADA

Al realizar una segunda fase experimental en la celda de agua desionizada, los valores obtenidos mediante la toma de mediciones resultaron ser muy similares a los obtenidos durante la primer experimentación. Se obtuvo el mismo valor de 0.01 °C, mismo que permaneció constante por un periodo de tiempo aproximado de 1 hora y 20 minutos, con una desviación poco pronunciada de +/- 0.002 °C que se presentó sólo en algunas mediciones.

Tabla 13. Resultados de experimentación # 2 en celda de agua desionizada

MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)	MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)
1	18:03:26p.m.	0.020	15	18:45:03p.m.	0.01
2	18:06:05p.m.	0.012	16	18:48:05p.m.	0.01
3	18:09:07p.m.	0.01	17	18:51:07p.m.	0.01
4	18:12:09p.m.	0.01	18	18:54:09p.m.	0.01
5	18:15:11p.m.	0.01	19	18:57:11p.m.	0.009
6	18:18:13p.m.	0.01	20	19:00:13p.m.	0.01
7	18:21:01p.m.	0.01	21	19:03:01p.m.	0.01
8	18:24:03p.m.	0.011	22	19:06:03p.m.	0.01
9	18:27:05p.m.	0.01	23	19:09:05p.m.	0.01
10	18:30:07p.m.	0.01	24	19:12:07p.m.	0.01
11	18:33:09p.m.	0.01	25	19:15:09p.m.	0.01
12	18:36:11p.m.	0.011	26	19:18:11p.m.	0.01
13	18:39:13p.m.	0.01	27	19:21:13 p.m.	0.01
14	18:42:01p.m.	0.01	28	19:24:01 p.m.	0.011

La siguiente gráfica permite apreciar los valores de temperatura que se presentaron a lo largo de la segunda experimentación, mismos que fueron registrados en la tabla anterior.

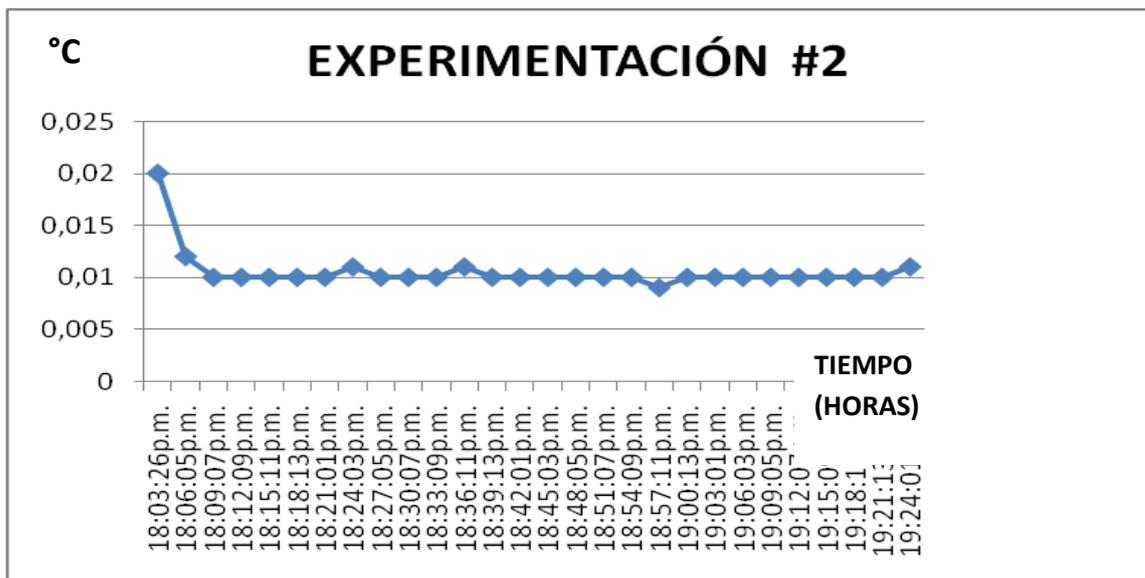


Figura 38. Gráfica de resultados presentados en experimentación # 2 en celda de agua desionizada

En esta gráfica se aprecia la disminución en la temperatura al inicio de la fase experimental. Con ayuda del baño de hielo aplicado en la celda, la temperatura alcanzó un equilibrio hasta el término de la fase con una desviación mínima entre algunos valores.

EXPERIMENTACIÓN # 3: CELDA DE AGUA DESIONIZADA

Siguiendo la etapa de experimentación de la celda de agua desionizada, se realizó una tercera prueba en la cual los valores obtenidos mediante las lecturas de temperatura continuaron manteniendo un valor casi constante de 0.01 °C durante un lapso de tiempo aproximado de 1 hora y 25 minutos. De igual forma se presentó en algunos valores una variación aproximada de +/- 0.002 °C con respecto del valor antes mencionado. Sin embargo, la mayoría de los valores de temperatura registrados por el termómetro de resistencia se mantuvo en 0.01 °C.

Los valores obtenidos en el transcurso de la experimentación son mostrados en las siguiente tabla:

Tabla 14. Resultados de experimentación # 3 en celda de agua desionizada

MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)	MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)
1	18:19:33 p.m.	0.019	15	18:01:07 p.m.	0.01
2	18:22:13 p.m.	0.01	16	18:04:07 p.m.	0.01
3	18:25:08 p.m.	0.01	17	18:07:07 p.m.	0.01
4	18:28:08 p.m.	0.01	18	19:10:07 p.m.	0.01
5	18:31:08 p.m.	0.01	19	19:13:07 p.m.	0.01
6	18:34:08 p.m.	0.01	20	19:16:07 p.m.	0.01
7	18:37:24 p.m.	0.012	21	19:19:07 p.m.	0.009
8	18:40:08 p.m.	0.01	22	19:22:07 p.m.	0.01
9	18:43:08 p.m.	0.011	23	19:25:07 p.m.	0.01
10	18:46:09 p.m.	0.009	24	19:28:07 p.m.	0.011
11	18:49:08 p.m.	0.01	25	19:31:07 p.m.	0.01
12	18:52:00 p.m.	0.01	26	19:34:22 p.m.	0.009
13	18:55:07 p.m.	0.01	27	19:37:07 p.m.	0.01
14	18:58:07 p.m.	0.01	28	19:40:07 p.m.	0.01

El comportamiento de la celda durante la experimentación puede ser observado en la siguiente gráfica, la cual representa los valores mencionados en la tabla anterior.

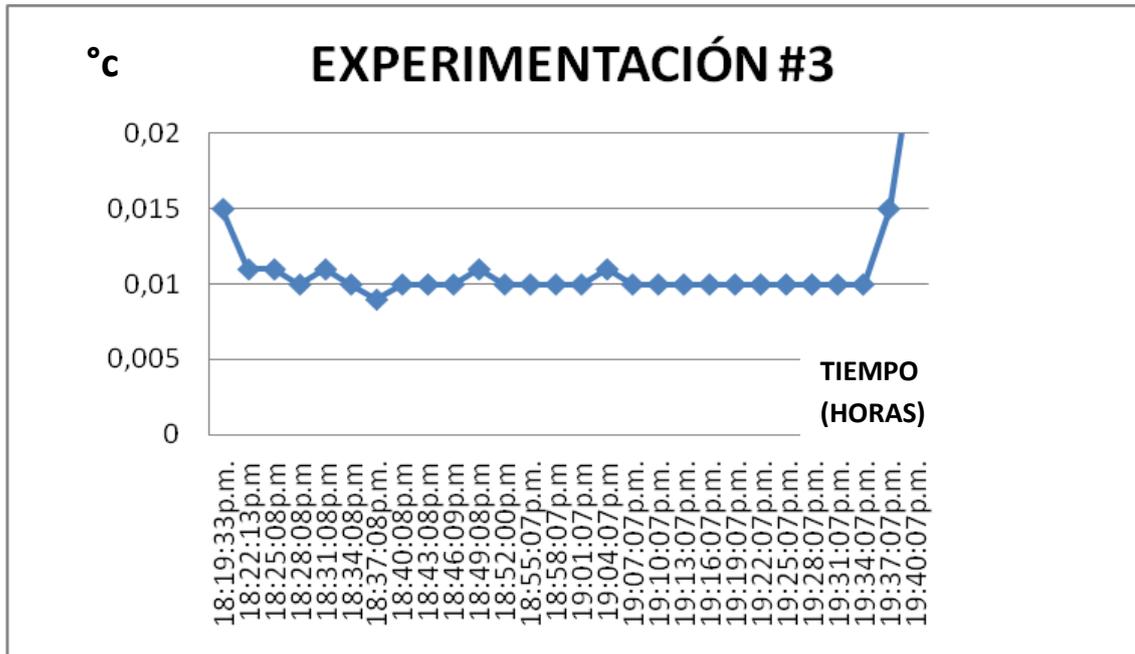


Figura 39. Gráfica de valores presentados en experimentación # 3 en celda de agua desionizada

Esta gráfica permite apreciar una mayor variación presentada en algunos valores a comparación de las fases experimentales anteriores, debido a la falta de hielo y al cambio de éste para continuar con la fase experimental.

EXPERIMENTACIÓN # 4: CELDA DE AGUA DESIONIZADA

Para finalizar la etapa de experimentación de la celda se llevó a cabo una cuarta fase de prueba, en la cual se mantuvieron bajo control las variables que pudieran influir sobre los resultados o valores obtenidos. Los resultados obtenidos en esta etapa mantuvieron un valor constante de 0.01°C durante un lapso de tiempo aproximado de 1 hora y 10 minutos, con una variación aproximada de +/- 0.002 °C (menor que en las experimentaciones anteriores).

Los valores medidos en el transcurso de dicha experimentación pueden ser apreciados en la siguiente tabla:

Tabla 15. Resultados de experimentación # 4 en celda de agua desionizada

MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)	MEDICIÓN	HORA	VALOR DE TEMPERATURA (°C)
1	19:54:04p.m.	0.020	15	20:36:02p.m.	0.011
2	19:57:10p.m.	0.011	16	20:39:03p.m.	0.01
3	20:00:11p.m.	0.01	17	20:42:06p.m.	0.01
4	20:03:10p.m.	0.009	18	20:45:09p.m.	0.01
5	20:06:03p.m.:	0.01	19	20:48:11p.m.	0.01
6	20:09:12p.m.	0.01	20	20:51:00p.m.	0.01
7	20:12:02p.m.	0.011	21	20:54:20p.m.:	0.01
8	20:15:05p.m.	0.01	22	20:57:02p.m.	0.01
9	20:18:13p.m.	0.01	23	21:00:12p.m.	0.01
10	20:21:14p.m.	0.01	24	21:03:07p.m.	0.01
11	20:24:13p.m.	0.011	25	21:06:03p.m.	0.01
12	20:27:14p.m.	0.01	26	21:09:12p.m.	0.01
13	20:30:00p.m.	0.01	27	21:12:10p.m.	0.011
14	20:33:10p.m.	0.009	28	21:15:10p.m.	0.009

En la siguiente gráfica se encuentran representados los valores mostrados en la tabla anterior.



Figura 40. Gráfica de valores presentados en experimentación # 4 en celda de agua desionizada

En la gráfica se muestra el comportamiento de la temperatura durante esta fase experimental. Los valores obtenidos mediante las tomas de lectura de temperatura con ayuda del termómetro de resistencia de platino muestran un descenso en la temperatura al inicio de la fase experimental. Sin embargo, la temperatura después alcanzó un equilibrio. Al término de la fase experimental se presentó una desviación poco pronunciada entre algunos valores.

Una vez llevadas a cabo todas las fases experimentales en la celda de agua desionizada y tomando como referencia cada uno de los valores de temperatura obtenidos en ellas, se puede apreciar que el valor que permanece constante y con desviaciones poco persistentes es el de 0.01 °C.

Con base en estos resultados se infiere que la celda de agua desionizada resulta la mejor opción para fungir como un patrón para la calibración de termómetros de referencia. No obstante, es preciso tener en cuenta el inconveniente que esta opción presenta: el alto costo que implica la obtención de agua desionizada, mismo que dificulta la realización de este proyecto.

CONCLUSIONES

La serie de pruebas de resistencia aplicada a los materiales de la celda permitió concluir que los materiales utilizados en el diseño de la misma, que conforman su estructura y componentes principales, son los adecuados.

Mediante la fabricación de las dos celdas, cada una de ellas conteniendo en su interior agua con distintos grados de pureza (potable y desionizada), y el sometimiento de éstas a las fases experimentales, se obtuvieron valores de temperatura con una aproximación cercana al punto triple de agua ($0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$), con una desviación aproximada de $\pm 0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lo anterior demuestra que este prototipo de celda resulta un elemento confiable para ser utilizado como un patrón de calibración para termómetros de referencia.

Asimismo, se comprobó la estabilidad de los valores de temperatura obtenidos en cada una de las celdas, a pesar de su diseño y de los materiales sencillos utilizados en su construcción. Se conservó una constante en dichos valores hasta el término de cada una de las fases experimentales. Debido a esta peculiar característica se determinó que el prototipo de celda tiene la capacidad de cumplir con su objetivo.

El método utilizado para mantener la fase sólida dentro de la celda resultó ser apropiado. Aplicar el baño de hielo sobre la celda permitió prolongar la conservación del manto de hielo dentro de la misma, logrando con ello que los valores de temperatura obtenidos en cada lectura permanecieran constantes durante cada una de las fases experimentales llevadas a cabo en cada celda.

De las dos celdas fabricadas, la de agua desionizada presentó mayores limitaciones en su construcción. Ello debido a que para la obtención de este tipo de agua se requiere de equipos que son algunas veces difíciles de conseguir. Esta celda requirió de un proceso de limpieza más prolongado en cada una de sus partes, así como la aplicación de otros procedimientos de limpieza no requeridos por la celda de agua potable.

Al haberse logrado la reproducción de un valor de temperatura cercano al punto triple del agua con el mismo grado de desviación en ambas celdas, se puede determinar que la celda de agua potable proporciona el mismo grado de confiabilidad que la de agua desionizada. Cabe resaltar aquí que la fabricación de la primera es sumamente sencilla debido al fácil acceso a este tipo de agua.

Con base en lo antes mencionado, se puede concluir que este prototipo de celda resulta la mejor alternativa para funcionar como un elemento de calibración de termómetros de resistencia de platino.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Sitio web del Centro Nacional de Metrología
<http://www.cenam.mx/>

[2] “Sistema Internacional de Unidades” del Centro Español de Metrología, sitio web:
<http://www.cem.es>

[3] Smith-Van Ness, *Introducción a la termodinámica e Ingeniería Química*, cuarta edición, pág. 368, McGraw Hill, México, D.F., Junio de 1991.

[4] Martínez López, Enrique, *Termometría de líquido en capilares de vidrio*, publicación técnica CNM-MET-PT-011, México, 1998.

[5] Valencia R. ,Jaime, Méndez Lango Edgar, Licea David, *Monografía de resistencia de platino*, publicación técnica CNM-MET-PT-009, México, 1997.

[6] Tippens, *Física, Conceptos y Aplicaciones*, Editorial McGraw Hill, págs. 360, 362, 367 y 368.

[7] Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) CNM-MED-PT-004, Centro Nacional de Metrología, México, 1999.

[8] Damos gracias al Dr. Edgar Méndez Lango, Jefe de Termometría del CENAM, quien originalmente sugirió este experimento.

GLOSARIO

Campo de medida.-Es el intervalo de valores que puede tomar la magnitud a medir con un instrumento determinado. Un instrumento puede poseer varios campos de medida.

Alcance.-Es el valor máximo que es posible medir con el instrumento; no siempre coincide con el valor máximo indicado en la escala del instrumento.

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

División de escala.-Es el intervalo entre dos valores sucesivos en la escala medida. Algunos instrumentos disponen de más de una división de escala. Si un instrumento trabaja de modo simultáneo con más de una escala, se considerará como división de escala de ese instrumento a la menor.

Incertidumbre.-Es el parámetro cuantificador de la precisión de un instrumento. La incertidumbre de medida es una característica individual de un instrumento, que se obtiene tras sus calibración. Se representa como \pm , signos que nos indican el error que podemos cometer al medir con dicho instrumento.

Confiabilidad.-Es la facultad que tiene un instrumento de medición de realizar una función bajo condiciones determinadas, durante un cierto tiempo. Se expresa mediante un valor numérico que indica la probabilidad de que dicha función se cumpla.

Norma o Estándar.-Es un valor establecido y conocido que se utiliza para medir una cantidad desconocida.

Punto de referencia.- Es la base desde la cual se toma una medición. Es el punto de origen de cualquier medición o, dicho de otra forma, el punto donde inicia la medición.

Punto triple.-Es aquél en el cual coexisten en equilibrio el estado sólido, líquido y gaseoso de una sustancia.

Exactitud.-Es el grado de conformidad con una norma o estándar establecido. La exactitud también puede considerarse una comparación entre los resultados deseados y los reales.

Precisión.- Es la fiabilidad del proceso de medición con relación a su repetitividad.

Confiabilidad.- Es aquella condición en la cual los resultados reales son iguales a los resultados deseados o previstos.

ANEXOS

“BAÑOS REFRIGERANTES”

Uno de los puntos fijos más empleados y sencillos de reproducir es la temperatura del punto de congelación del agua. Un modo de reproducir este punto fijo consiste en el desarrollo y la fabricación de una celda en la cual pueda ser apreciable este punto y medible dicha temperatura.

Una vez que se toman los valores de la temperatura y se alcanza la temperatura del punto de congelación del agua, ésta debe controlarse para evitar cualquier variación que pueda alterar los valores térmicos.

Existen errores significativos al momento de intentar controlar la temperatura del punto de congelación del agua, mismos que podrían generar variaciones en el valor de dicha temperatura.

Los factores que podrían generar este tipo de errores van desde la fabricación y preparación de la celda para la toma de lecturas de temperatura hasta la manipulación de la misma por parte de quien realiza la toma de lecturas; otra variable que podría incidir es el ambiente que rodea la celda.

Una forma de controlar estas variables –como es el caso de la temperatura ambiente, la cual puede afectar la temperatura de la celda- consiste en el empleo de baños de fluidos o elementos capaces de controlar y limitar la interferencia que pueda generar la temperatura ambiente en la celda.

Los baños aplicados a las celdas permiten mantener estable la temperatura de operación.

Para probar la estabilidad proporcionada por el baño, puede sumergirse la celda en éste y registrarse su temperatura en función del tiempo. Las variaciones en los valores de temperatura nos presentarán las limitantes de este baño para lograr la estabilidad.

Generalmente, para este tipo de condiciones de operación se recomienda el uso de baños refrigerantes.

BAÑOS REFRIGERANTES

Los baños refrigerantes son aplicados cuando es necesario obtener temperaturas bajas; suelen ser utilizados en laboratorios o en procesos industriales, como es el caso de:

- Reacciones químicas a bajas temperaturas
- Recuperación de líquidos altamente volátiles de una destilación o en trampas frías

Para poder ser utilizado, un refrigerante debe poseer ciertas propiedades físicas, químicas y termodinámicas que lo vuelvan confiable durante su uso.

Se sabe que un refrigerante es apropiado cuando cuenta con las siguientes propiedades:

- Baja temperatura de ebullición. Un refrigerante debe contar con un punto de ebullición por debajo de la temperatura ambiente, a presión atmosférica.
- Fácilmente manejable en estado líquido. Su punto de ebullición debe ser controlable con facilidad, de modo que su capacidad de absorber calor sea controlable.
- No inflamable, no explosivo, no tóxico. O sea químicamente estable, con el fin de que sea capaz de tolerar los repetidos cambios de estado a los que será expuesto.
- Bajo punto de congelación. La temperatura de congelación debe encontrarse muy por debajo de cualquier temperatura a la que se encuentre trabajando.
- Bajo costo. Con el fin de asegurar su fácil obtención y el costo del baño refrigerante.

Existen diferentes tipos de baños refrigerantes. Para temperaturas que se encuentran por debajo de los 0 °C, existen tres tipos de éstos:

HIELO Y SAL ÓRGANICA

Al realizar una mezcla de hielo a 0 °C con alguna sustancia soluble en agua, tiene lugar una disminución en la temperatura del hielo que depende de la cantidad de la sustancia añadida; para valores determinados de sustancia se alcanzará una disminución de temperatura máxima.

Esto sucede ya que en la superficie del hielo existe una capa de agua líquida que se encuentra en equilibrio con el hielo. Al añadirle la sal, parte de ésta se disuelve en el líquido que rodea al hielo, formando una disolución saturada que rompe tal equilibrio. Para recuperarlo, la disolución tiende a diluirse y el hielo a enfriarse; esto se logra fundiendo parte del hielo, mismo que extrae el calor necesario para fundirse en la disolución, que se enfría por debajo de los 0 °C.

Este baño refrigerante puede proveer temperaturas cercanas a los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dicha temperatura depende del tipo de sal utilizado.



Figura 41. Baño refrigerante hielo-sal

HIELO SECO

Una mezcla de hielo seco y un solvente orgánico puede proveer temperaturas de hasta $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Entre las desventajas que presenta este tipo de baño refrigerante se encuentra que muchos de los solventes utilizados son inflamables.

El contacto puntual con este tipo de refrigerante puede ocasionar quemaduras por frío debido a las bajas temperaturas a las que se encuentra.



Figura 42. Baño refrigerante hielo seco

NITRÓGENO LÍQUIDO

El nitrógeno líquido sólo o con un solventes orgánicos puede proveer temperaturas de hasta $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dicha temperatura depende del punto de fusión del solvente orgánico.



Figura 43. Baño refrigerante nitrógeno líquido

HIELO/AGUA

Unos de los baños refrigerantes más simples y baratos son las mezclas de hielo/agua, que nos ayudan a mantener temperaturas de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 44. Baño refrigerante mezcla hielo-agua

Este tipo de baño refrigerante requiere ser agitado constantemente con el fin de mantener uniforme la mezcla hielo/agua y de obtener una temperatura casi constante en la misma al momento de introducir cualquier elemento o instrumento de medición de temperatura.



Figura 45 .Termómetro colocado en baño refrigerante hielo-agua

Este baño refrigerante fue utilizado para mantener estable la temperatura del prototipo de celda durante el tiempo en que se llevó a cabo cada una de las fases experimentales.

El tipo de baño refrigerante a utilizar depende de las condiciones y características requeridas para realizar cualquier prueba, experimento o trabajo.

