

7
2eje



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**CALIBRACION Y VALIDACION DE
INSTRUMENTOS DE MEDICION DE
TEMPERATURA (TERMOPARES)**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO EN ALIMENTOS
P R E S E N T A :
MARIO ESPINOSA HERNANDEZ

ASESOR I. A. ROSALIA MELENDEZ PEREZ
COASESCR DR. JOSE LUIS ARJONA ROMAN

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1984

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Calibración y Validación de Instrumentos de Medición de

Temperatura (Termopares).

que presenta el pasante: Mario Espinosa Hernández

con número de cuenta: 8518485-9 para obtener el TITULO de:

Ingeniero en Alimentos .

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán, Izcalli, Edo. de Mex., a 01 de Julio de 1994

PRESIDENTE J.M.F. Javier Hernández Vega

VOCAL J.M.F. Benjamín Contreras Santa Cruz

SECRETARIO J.S. Rocelita Meléndez Pérez

PRIMER SUPLENTE J.A. Alfredo Alvarez Cárdenas

SEGUNDO SUPLENTE Dra. Raquel López Apellano

AGRADECIMIENTOS

A DIOS DOY GRACIAS POR HABERME DADO
LA OPORTUNIDAD DE SER ALGUIEN EN LA
VIDA Y POR DARME LA FAMILIA TAN
MARAVILLOSA QUE TENGO

AGRADEZCO A MIS PADRES EL HABER FORMADO EN MI
UN ESPÍRITU DE SUPERACIÓN Y PERSEVERANCIA YA
QUE GRACIAS A ELLO LOGRE ABRIRME PASO EN LA VIDA.

LE AGRADEZCO A MIS HERMANOS HILDA, RAUL Y RAQUEL
TODO EL APOYO QUE ME BRINDARON PARA PODER TERMINAR
MIS ESTUDIOS Y CONCLUIR CON ESTA TESIS.

AGRADEZCO A TODOS MIS COMPANEROS DE ESTUDIO
EN ESPECIAL A ERIC, EL ESPÍRITU DE COMPETENCIA
QUE ME INCULCARON Y QUE PERMITIÓ NO RENDIRME
EN AQUELLOS MOMENTOS DE MAYOR DESESPERACIÓN

**AGRADEZCO INFINITAMENTE A MIS ASESORES:
ROSALÍA MELENDEZ PÉREZ Y JOSE LUIS ARJONA ROMAN
TODO SU APOYO Y CONFIANZA QUE ME BRINDARON EN
LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS**

**AGRADEZCO A MIS SINODALES EL TIEMPO DEDICADO EN LA REVISIÓN DE
ESTA TESIS ASÍ COMO SUS VALIOSOS COMENTARIOS Y SUGERENCIAS PARA
MEJORAMIENTO DE LA MISMA**

**DOY UN ESPECIAL AGRADECIMIENTO A:
EL LIC. RESENDIZ FERNÁNDEZ GABRIEL Y
AL P.I.M.E. VALENCIA MOSQUEDA LUIS SAU
POR SU ASESORAMIENTO EN LA CONSTRUCCIÓN
DEL INSTRUMENTO**

ÍNDICE GENERAL

	PÁGINA
RESUMEN	1
OBJETIVOS	3
INTRODUCCIÓN	5
1 ANTECEDENTES	7
1.1 TERMOMETRIA	
1.1.1 TEMPERATURA Y TERMÓMETROS	8
1.1.2 ESCALAS TERMOMÉTRICAS	9
1.1.3 ESCALAS DE TEMPERATURA	12
1.2 TERMÓMETROS DE EFECTO MECÁNICO	14
1.2.1 TERMÓMETROS DE LÍQUIDO EN CAPILARES	15
1.2.2 TERMÓMETROS DE DILATACIÓN	19
1.2.3 RELES	22
1.2.4 TERMÓMETROS MANOMÉTRICOS O DE EXPANSIÓN	23
1.2.5 TERMOSTATOS	26
1.3 TERMÓMETROS DE EFECTO ELÉCTRICO	27
1.3.1 TERMÓMETROS DE RESISTENCIA	27
1.3.2 TERMOPARES	31
1.3.2.1 LEYES DE LOS TERMOPARES	34
1.3.2.2 TIPOS DE CONECCIONES EN TERMOPARES	38
1.3.2.3 MEDICIÓN DE FEM	39
1.3.2.4 CABLES DE EXTENSIÓN	44
1.3.2.5 RESISTENCIA EN TERMOPARES	46
1.3.2.6 CONVERSIÓN VOLTAJE - TEMPERATURA	48
1.3.2.7 CORRECCIÓN DE TEMPERATURA EN LA UNIÓN DE REFERENCIA A UNA TEMPERATURA DIFERENTE A 0°C	53

1.3.2.8 CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE TERMOPARES	55
1.3.2.9 CONFECCIÓN DE TERMOPARES	58
1.3.2.10 RECOMENDACIONES DE USO EN TERMOPARES	64
1.4 OTROS METODOS EN LA DETECCION DE TEMPERATURA	65
1.4.1 INDICADORES DE TEMPERATURA	66
1.4.2 INDICADORES TEMPERATURA-TIEMPO	67
1.4.3 INDICADORES QUE INTEGRAN TEMPERATURA-TIEMPO	68
1.4.4 REGISTRADORES TEMPERATURA-TIEMPO	70
1.4.5 FIBRA ÓPTICA	71
1.4.6 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA POR RADLACIÓN	72
1.4.7 MÉTODOS ESPECIALES PARA DETERMINAR TEMPERATURA	74
1.4.7.1 TERMÓMETRO DE CRISTAL DE CUARZO	74
1.4.7.2 TERMOGRAFIA DE CRISTAL LIQUIDO	74
1.5 SELECCIÓN DE SISTEMAS PARA LA OBTENCION DE DATOS	75
1.5.1 SISTEMA GENERAL DE OBTENCIÓN DE DATOS	75
1.5.2 ASPECTOS BÁSICOS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES	76
1.5.3 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	77
1.5.4 CONVERSIÓN ANALÓGICO DIGITAL (A/D)	78
1.5.5 FUENTE RECTIFICADORA	79
1.6 ASPECTOS DE VALIDACIÓN	81
1.6.1 PRUEBAS DE EXACTITUD Y PRECISIÓN	84
1.6.2 PRUEBA DE LINEARIDAD	85
1.6.3 PRUEBA DE REPETIBILIDAD	87
1.6.4 PRUEBA DE REPRODUCIBILIDAD	87
1.6.5 CALIBRACIÓN	88

2 METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DEL INSTRUMENTO MEDIDOR DE TEMPERATURA

2.1 CUADRO METODOLOGICO	90
2.1.1 CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO	91
2.2 VALIDACION DE TERMOPARES	92
2.2.1 EXACTITUD Y PRECISIÓN	92
2.2.2 LINEARIDAD	93
2.2.3 REPETIBILIDAD	94
2.2.4 REPRODUCIBILIDAD	95
2.2.5 ETAPA FINAL EN VALIDACIÓN DE TERMOPARES	96
2.3 CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	97
2.3.1 TRAZO DE PISTAS	100
2.3.2 GRABADO DE TARJETAS	100

3 RESULTADOS

3.1 ACOPLAMIENTO DE PARTES QUE INTEGRAN EL INSTRUMENTO	102
3.2 CONSTRUCCIÓN	107
3.2.1 CREACIÓN DE TARJETAS	111
3.2.2 ENSAMBLE DE TARJETAS	114
3.2.3 ACOPLAMIENTO GENERAL Y VERIFICACIÓN DE SEÑAL	116
3.3 VALIDACIÓN DE TERMOPARES	120
3.4 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN INSTRUMENTO CONSTRUIDO	145
CONCLUSIONES	130
RECOMENDACIONES	132

ANEXOS

APOYO BIBLIOGRÁFICO

ÍNDICE DE FIGURAS

NUMERO	FIGURA	PÁGINA
1	EXTRAPOLACION EN EL VOLUMEN DE UN GAS A LA TEMPERATURA DE CERO ABSOLUTO	12
2	CORRECCIÓN DE TEMPERATURAS EN TERMÓMETROS CAPILARES	18
3	TERMÓMETRO BIMETÁLICO	21
4	TERMÓMETRO DILATOMÉTRICO	21
5	RELES	23
6	TERMÓMETROS MANOMÉTRICOS	25
7	RESISTIVIDAD DE MATERIAL PARA TERMISTOR COMPARADO CON PLATINO	30
8	DIAGRAMA BÁSICO DE UN TERMOPAR	32
9	GRADIENTE DE TEMPERATURAS PRODUCIDOS EN UN TERMOPAR	33
10	SEGUNDA LEY DE LOS TERMOPARES	36
11	TERCERA LEY DE LOS TERMOPARES	36
12	CUARTA LEY DE LOS TERMOPARES	37
13	QUINTA LEY DE LOS TERMOPARES	37
14	SEXTA LEY DE LOS TERMOPARES	37
15	CONEXIÓN TERMOPARES EN SERIE	38
16	CONEXIÓN TERMOPARES EN PARALELO	38
17	INCLUSIÓN DE UN GALVANOMETRO EN UN CIRCUITO DE TERMOPAR	41
18	CURVAS VOLTAJE-TEMPERATURA EN TERMOPARES (NBS)	43
19	TRANSMISIÓN DE SEÑAL EN TERMOPAR SIN CABLES DE EXTENCIÓN	46
20	CAUSAS DE CAMBIOS EN LA RESISTENCIA DE TERMOPARES	47
21	CURVA DIVIDIDA EN OCHO SECTORES	53
22	CONFECCIÓN DE UNIONES DE TRABAJO	61
23	ACOPLAMIENTO DE UNIONES DE TRABAJO EN CAMISAS	61
24	TIEMPOS DE RESPUESTA VS DIÁMETROS DE TERMoeLECTRODOS	61
25	TIEMPOS DE RESPUESTA EN CALIBRES DE TERMoeLECTRODOS	62
26	TIPOS DE CONECTORES Y/O TERMINALES PARA TERMOPARES	62

27	ESQUEMA DE UN CENSOR DE TEMPERATURA EMPLEANDO FIBRA ÓPTICA . . .	72
28	DIAGRAMA GENERAL DE OBTENCIÓN DE DATOS	75
29	AMPLIFICADOR OPERACIONAL SIMPLE	77
30	AMPLIFICADOR OPERACIONAL INVERSOR Y NO INVERSOR	77
31	ETAPAS DE RECTIFICACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA A CONTINUA . . .	80
32	LINEARIDAD INDEPENDIENTE	86
33	LINEARIDAD PROPORCIONAL	86
34	ERROR DE REPETIBILIDAD	88
35A	DIAGRAMA BÁSICO DE AMPLIFICADOR OPERACIONAL	104
35B	CIRCUITO INTEGRADO LM324	104
36	FUENTE DE RECTIFICACIÓN	106
37	REGULADORES DE VOLTAJE	106
38	ACOPLAMIENTO DE RESISTENCIA VARIABLE EN CIRCUITO DE AMPLIFICA- DOR OPERACIONAL	109
39	CIRCUITO DE AMPLIFICADOR ANALÓGICO DIGITAL	109
40	PANTALLA DE CRISTAL LIQUIDO	110
41	DIAGRAMA GENERAL DE INSTRUMENTO	110
42	TARJETA DE FUENTE	112
43	TARJETA DE AMPLIFICADOR OPERACIONAL	112
44	TARJETA DE VISUALIZADOR	113
45	TARJETA DE CONVERTIDOR ANALÓGICO-DIGITAL	113
46	DISTRIBUCIÓN DE TARJETAS EN CHASIS	119
47	RESULTADOS GRÁFICOS DE LA PRUEBA DE LINEARIDAD	125
48	COMPARACIÓN DE RESPUESTA INSTRUMENTO COMERCIAL Y CONSTRUIDO	128

ÍNDICE DE CUADROS

NUMERO	CUADRO	PÁGINA
1	PUNTOS DE REFERENCIA DE LA ESCALA ETPI-68	15
2	COEFICIENTES DE DILATACIÓN EN LÍQUIDOS TERMOMÉTRICOS	18
3	COEFICIENTES DE EXPANCIÓN O DILATACIÓN TÉRMICA EN METALES EMPLEADOS EN TERMÓMETROS BIMETÁLICOS	20
4	MATERIALES EMPLEADOS EN TERMÓMETROS MANOMÉTRICOS	26
5	COEFICIENTES DE RESISTENCIA	29
6	SENSIBILIDAD REQUERIDA EN MILIVOLTIMETRO PARA TERMOPARES	44
7	TAMAÑO Y RESISTENCIA EN CABLES DE TERMO PAR COMERCIALES	48
8	LÍMITE DE ERROR PARA EXTENSIÓN DE CABLES EN TERMOPARES	48
9	COEFICIENTES POLINOMIALES NBS	52
10	CARACTERÍSTICAS DE TERMO PARES	57
11	CLASIFICACIÓN DE TERMO PARES EN BASE AL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	58
12	TERMOELECTRODOS COMERCIALES	63
13	CAMISAS DE TERMO PAR COMERCIALES	63
14	LONGITUD DE CAMISAS EN TERMO PARES	63
15	INTERPRETACIÓN DE COLORES PRODUCIDOS EN UN INDICADOR TEMPERA- TURA-TIEMPO	68
16	PIEZAS QUE CONFORMAN LAS TARJETAS	115
17	TEMPERATURAS OBTENIDAS EN SISTEMA ISOTÉRMICO A 0°C	120
18	TEMPERATURAS OBTENIDAS EN SISTEMA ISOTÉRMICO A 92.8°C	121
19	RESULTADOS DE ESTADÍSTICO EN LA PRUEBA DE PRECISIÓN	121
20	RESULTADOS DE ESTADÍSTICO EN LA PRUEBA DE EXACTITUD	121
21	RESULTADOS EN LA PRUEBA DE LINEARIDAD	122
22	SUMA DE ATRIBUTOS PARA SELECCIÓN DE TERMO PAR PATRÓN	123
23	RESULTADOS EN LA PRUEBA DE PRECISIÓN PARA EL INSTRUMENTO CONSTRUIDO	126
24	RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LINEARIDAD Y ANÁLISIS DE MUESTRAS PAREADAS EN INSTRUMENTO COMERCIAL Y CONSTRUIDO	127

25	CARACTERISTICAS GENERALES DE INSTRUMENTO CONSTRUIDO	131
26	CARACTERÍSTICAS DE USO EN TRES TIPOS DE TERMOPARES	132

SIMBOLOGIA

α	coeficiente de dilatación térmica
amp-op	amplificador operacional
aw	actividad de agua
AWG	american wire gauge
A,B,C	metales
β	coeficiente de dilatación
CA	corriente alterna
C A/D	convertidor analogico digital
C	capacitor
CC	corriente continua
CI	circuito integrado
e	fuerza electromotriz en uniones de contacto
ETI	escala termométrica internacional
FEM	fuerza termoeléctrica motriz
I	intensidad
K Ω	kilo ohms
ma	miliampers
NBS	national boreau standart
σ	coeficiente de resistencia
Ω	ohms
P	presión
pF	picofaradios
Q	calor
R	resistencia
T, t	temperatura
t500ma	transformador de 500 ma
μ f	microfaradios
V	voltaje

RESUMEN

La justificación principal por el que se desarrollo el presente trabajo, fue con el fin de apoyar, facilitar y simplificar el trabajo experimental que llegan a desempeñar los alumnos que cursan el Laboratorio Experimental Multidisciplinario IV, de la carrera de Ingeniería en Alimentos. En dicho laboratorio se tiene como enfoque principal, el estudio de los fenómenos relacionados con la transferencia de calor, por lo que trabajar con instrumentación de rápida respuesta y aceptable confiabilidad para detección de temperaturas es imprescindible, dado al grado de alcance que se pretende conseguir con la obtención de datos y el subsecuente análisis del tema en estudio. Dado las limitantes que se tienen en el tipo y número de equipos disponibles en el laboratorio, se decide hacer una investigación con la posibilidad de construir cajas registradoras de temperatura para su empleo con termopares, con la característica de ser económicamente accesibles y de fácil construcción, pudiendo ser empleados incluso en sistemas a nivel industrial con adaptaciones a sistemas computarizados.

Como primera parte, se describe el manejo y principio por el cual operan un amplio número de equipos medidores de temperatura, que van, desde el convencional termómetro de líquido hasta las más recientes innovaciones tecnológicas en el campo de aplicación de la industria de alimentos, poniendo mayor énfasis en los medidores de temperatura conocidos como termopares, esto con el fin de dar apoyo a las materias que requieran información acerca de dichos equipos, y de alguna manera mostrar ventajas y desventajas en el empleo de cada uno de ellos.

Como segunda etapa en el presente estudio se dan a conocer diferentes técnicas de análisis estadístico, que corresponden a una metodología de validación aplicada principalmente en termopares. Todo con la finalidad de que sea empleado a manera de guía por los alumnos que cursan el laboratorio, en lo que se refiere a efectuar la selección más apropiada de termopares, técnicas de validación, y preparación de sistemas de trabajo en el campo de la transferencia de calor, así se podrá realizar una mejor planeación de proyectos

conociendo desde un inicio las limitantes, pros y contras, que se presentan en el manejo de este tipo de instrumentación.

Como etapa final y principal justificación en el desarrollo del presente estudio, se hizo uso de las bases descritas en el funcionamiento de termopares, en conjunto de algunos conocimientos, mínimos necesarios, en el campo de la electrónica, del tal forma que se reunieron las bases suficientes que permitieron el diseño, selección de partes y construcción de un instrumento detector de temperatura y calibrador de termopares.

Es muy importante hacer notar que la información manejada, referente al campo de la electrónica, no es del todo detallada, debido a que la teoría en este tema queda fuera del alcance en el presente estudio, limitándose únicamente en las bases correspondientes a su aplicación, en otras palabras, los elementos empleados se contemplan en su parte más fundamental, suficiente para entender el proceso de construcción. Es por esto que la complejidad en la elaboración del instrumento se presenta en el proceso de acoplamiento de elementos y circuitos, elaboración de circuitos impresos, interconexión de partes, y acoplamiento general.

OBJETIVO GENERAL

CONSTRUCCIÓN DE UN INSTRUMENTO MEDIDOR DE TEMPERATURAS QUE CALIBRE TERMOPARES Y REDUZCA TIEMPO EN SU PROCESO DE VALIDACIÓN, PARA SU POSTERIOR EMPLEO EN PROCESOS QUE INVOLUCRAN LA TRANSFERENCIA DE CALOR.

OBJETIVOS PARTICULARES

1) APLICACIÓN DE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN DE TERMOPARES PARA SU APLICACIÓN EN LA CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.

2) CONSTRUCCION DE EQUIPO DIGITAL DE OBTENCIÓN DE DATOS, CON SELECCIÓN, ADAPTACIÓN Y ENSAMBLE DE CIRCUITOS ELECTRICOS.

3) DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ERROR EXPERIMENTAL AL UTILIZAR EQUIPO CONSTRUIDO CONTRA EQUIPO COMERCIAL.

INTRODUCCIÓN

Los alimentos constituyen sistemas biológicos y físicoquímicos muy complejos, en donde, la estabilidad de sus componentes se ve fuertemente influenciada principalmente y entre otros factores (a_w , pH , P , [oxígeno]) por la temperatura, ya que es en función de este factor, el que se lleven a cabo reacciones que cambien o modifiquen sus constituyentes, el que se logre alcanzar una estabilidad que garantice su conservación o el de tratar de impartir alguna característica física al producto. Sea cual sea el objetivo a alcanzar, la temperatura, juega un papel determinante siempre que se habla de conservación y transformación de alimentos, y aun más, en aquellos clasificados como perecederos.

Es por lo anterior que en la industria alimentaria la temperatura se considera, como uno de los parámetros principales en el control de procesos, ya que al trabajar con gamas que van desde las bajas temperaturas de congelación, hasta las altas temperaturas de esterilización y procesos de secado se vuelve algo delicado, laborioso y en algunos casos muy costoso. Sin embargo de ello depende que se logre el éxito en los diversos procesos. Hoy en día el realizar un control y seguimiento de temperaturas no es nada complicado y en la mayoría de los casos resulta muy económico, el único problema que persiste, es no tener un amplio conocimiento de aquel equipo y/o instrumentos de adquisición de datos convenientes que se necesitan para realizar un control efectivo en aquella etapa de trabajo que así lo requiera, como es en la producción, almacenamiento, procesamiento, transporte y venta.

Es por esto que una vez que se logra la implementación de algún sistema confiable de adquisición de datos, se espera este cumpla eficientemente con la colección o registro de datos que permitan su posterior almacenamiento, presentación o proceso adicional subsecuente.

El elemento esencial de un sistema moderno de obtención de datos es el instrumento transductor, el cual proporciona una señal eléctrica que indica la variable física que se está midiendo, la señal puede ser un voltaje, resistencia, frecuencia analógicos, o una

representación digital de cuales quiera de estas cantidades en forma de una serie de pulsos eléctricos; por lo tanto, un potenciómetro registrador es un sistema simple de obtención de datos que puede usarse a fin de coleccionar datos de temperatura de termopares. En este caso, los datos deben leerse con la escala que maneja el registrador.

Un sistema más complejo puede convertir la señal analógica de voltaje del termopar en una señal digital equivalente, de tal forma que facilite la lectura y elimine errores causados por el operador (tal es el caso en el error de paralaje), así mismo es posible que la señal digital se adapte a una serie de accesorios que apoyen el rápido procesamiento de los datos (por ejemplo una computadora).

De aquí parte el enfoque que se persigue en el presente estudio de crear un sistema digital de adquisición de datos para su empleo con termopares.

CAPITULO I
ANTECEDENTES

1 ANTECEDENTES

En los inicios del hombre, una de sus primeras necesidades fue el establecer las diferencias entre el frío y el calor, empleando así, como primer sistema de referencia su propio tacto, ya que con este podía ordenar a los cuerpos, en cierto orden de calor de forma fácil y rápida; posteriormente, conforme sus conocimientos se fueron desarrollando, las necesidades fueron creciendo y el sistema de tacto empezó a ser ineficiente, resultaba muy subjetivo y además poseía un margen de sensibilidad muy limitado, así que era imposible emplearlo en condiciones más severas de calentamiento o enfriamiento. Sin embargo, no tardó en darse cuenta que no sólo el tacto, sino, todos los elementos al someterse a cierto grado de calentamiento o enfriamiento, presentaban efectos de respuesta que sobre todo eran reproducibles. De esta manera el hombre empezó a implementar innumerables instrumentos que empleo para medir de forma objetiva y numérica cualquier variación en la energía térmica de cualquier cuerpo y/o espacio, todos ellos apoyados en la medición de alguna cantidad mecánica, óptica o eléctrica de un cuerpo particular como patrón de respuesta, denominando así, al patrón de medida temperatura y a los diversos elementos y/o instrumentos termómetros.

Todas aquellas bases y necesidades en el conocimiento de la temperatura hicieron posible la creación de la Termometría, como aquella ciencia que fundamenta y establece todo aquello que se relacione con el estudio de la temperatura. Mas adelante el dominio y aplicación de todos aquellos conceptos en este campo, hacen posible el desarrollo de innumerables termómetros así como la automatización de gran parte de los instrumentos que conforman actualmente el control de procesos en la Industria Alimentaria.

1.1 TERMOMETRIA

1.1.1 TEMPERATURA Y TERMÓMETROS^{1,7,12}

El sistema Internacional de mediciones establece estándares independientes en sólo cuatro cantidades fundamentales: longitud, tiempo, masa y temperatura; de estas cuatro se hace notar que la temperatura es fundamentalmente diferente en naturaleza de las otras, y se hace referencia a ella como una cantidad intensiva, mientras que al resto se les cataloga como extensivas. Esto es, ya que, si dos cuerpos semejantes en longitud son unidos, el total de longitud es dos veces el original, y lo mismo ocurre con dos intervalos de tiempo o masas. Sin embargo, en la combinación de dos cuerpos a la misma temperatura, resulta exactamente la misma temperatura.

El definir temperatura con lleva a referirnos de igual manera a la energía térmica, ya que ambos conceptos conducen al mismo fin, por su parte la energía térmica representa la energía interna total de un objeto, es decir, la suma de sus energías moleculares cinética y potencial, que están directamente influenciados por el equilibrio traslacional y rotacional de sus alrededores, de aquí la temperatura se encarga de interpretar esa energía térmica, en cantidades métricas perceptibles a los sentidos del hombre (P, V, Q, etc.) para definir de forma objetiva y numérica, que tan frío o caliente se encuentra un objeto determinado. Es por esto que sí se puede demostrar que un material presenta algún cambio en cualquier dimensión, y este tiene una correspondencia unívoca con los cambios en la temperatura, dicha variación puede usarse como patrón de referencia al medir temperatura, al material empleado para dicho fin recibe el nombre de termómetro.

La validez de medir con un termómetro la variación de temperatura de algún otro cuerpo o espacio, sin necesidad de establecer patrones de referencia individuales y específicos en cada cuerpo cuya temperatura se quiere conocer, se ve respaldado a través de la segunda ley de la termodinámica.

" Cuando dos cuerpos están en equilibrio térmico con un tercer cuerpo, ellos están en equilibrio el uno al otro, entonces por definición todos los cuerpos en el sistema están a la misma temperatura. "

Ahora bien, si nosotros después de haber establecido intervalos de temperaturas reproducibles en la propiedad termométrica que caracterizara el estado de una u otra sustancia y basándose en la variación unívoca de dicha propiedad, se tiene al termómetro, después se puede confeccionar la referida escala, y de esta manera las temperaturas desconocidas de otros cuerpos podrían ser comparados por introducción de algún tipo de termómetro, ocurriendo un equilibrio para cada caso, que ya con la escala definida numéricamente en el estándar, se logre definir la diferencia entre la temperatura de referencia y la otra temperatura del cuerpo desconocida.

Debe tenerse muy presente que el termómetro servirá dentro del intervalo para el cual fue confeccionada su escala, fuera de dicho intervalo no se tiene la validez de ser extrapolables sus resultados.

Por último se hace la indicación que los conceptos ya mencionados, al igual que muchos otros, presentan limitaciones, ya que estos no consideran a los espacios constituidos por una materia muy rarificada, tal es el caso de la radiación, en este caso, la temperatura se determina a partir de la potencia de flujos de la energía radiante que atraviesa al cuerpo y que equivale a la temperatura de un cuerpo absolutamente negro con esa misma potencia de radiación. También se debe tener en cuenta que entre más adelantado sea el desarrollo de la ciencia y la técnica, más amplio será el concepto de la temperatura.

1.1.2 ESCALAS TERMOMETRICAS^{10, 11, 20, 22}

La generación de ideas en la construcción de termómetros y escalas de temperatura, procedió por muchos años, al par de un análisis de termodinámica, que conformara una base sólida en la definición de temperatura.

Galileo (1564 - 1642) fue el primero quien formalmente dio origen a la termometría mecánica, con ayuda en un primitivo instrumento. Basado en la expansión térmica de aire que contenía un bulbo de cristal, forzaba hacia abajo una columna de agua contenida en un tubo que descendía de la parte inferior del bulbo hasta un plato lleno de agua, la lectura de temperatura de dicho termómetro se lograba por la medición del recorrido del agua en el

tubo cuando se dilataba el aire, el inconveniente que presentaba era que la altura de la columna dependía tanto de la temperatura como de la presión atmosférica, por lo que la medición resultaba muy dudosa. A éste aparato se le llamo termoscópio ya que la palabra termómetro se reservo para un instrumento que tuviera incorporada una escala numérica en su construcción.

Para un periodo de cerca de 100 años, se logra proveer la gestación de la ciencia de termodinámica, mientras tanto los termómetros no se hicieron esperar y diversos tipos de termómetros ya eran operados, en gran cantidad de laboratorios, el resultado que como consecuencia se dio, fue la formación de una gran variedad de escalas propias de cada termómetro creado, por lo que la tarea que prosiguió en los años siguientes, fue el de tratar de unificar a todos los termómetros desarrollados a una escala común. Para entonces aquellas escalas y termómetros manufacturados seguían presentando el inconveniente, de sólo definir la temperatura en términos de las características de los materiales y condiciones ambientales empleadas en su construcción, así como su propio error sistemático, sin llegar aún a alguna unificación de ellas.

Sin embargo, a fin de lograr generalizar y perfeccionar las escalas termométricas, se efectuaron trabajos, encaminados a estudiar los termómetros de gas los cuales garantizaban una precisión mas elevada, además de estar respaldados por amplia teoría. En estos termómetros la temperatura podía medirse ya fuese observando la variación de la presión del gas en función de la temperatura cuando el volumen permanece constante, o bien observando la variación del volumen del gas en función de la temperatura bajo una presión constante.

El ciclo de Carnot (1796 - 1832) principalmente se a foco al estudio de la eficiencia térmica producida en la máquina de vapor, ya que implícitamente en su mayoría estaba la conversión de calor en trabajo útil, Carnot en 1824 fue capaz de mostrar que, para que una maquina térmica produzca trabajo útil, es necesario que además de haber una reserva calorífica, deberá existir una reserva a una temperatura más baja.

W. Thomson, o mejor conocido como Lord Kelvin, se dio cuenta que las ideas de Carnot contenían las bases para una escala de temperatura absoluta. Suponiendo que una

unidad de calor producirá el mismo aumento de trabajo al pasar de un grado de temperatura al siguiente, Thomson en 1848 logro construir una escala de temperatura apoyado en la eficiencia del ciclo de Carnot usando en la suscripción de las reservas de calor en orden numérico ascendente, grado por grado. Esta idea de Thomson es remarcable por dos razones principales:

- primero - la escala de temperatura construida no depende de la propiedad de alguna sustancia real.
- segundo - también supone la existencia de un cero de temperatura, del cual el calor no puede ser extraído por la máquina térmica (Fig. 1).

Un hecho muy interesante que posteriormente describió Regnault, en relación de incremento en la escala Kelvin y Celsio, fue cuando el volumen de los gases con la temperatura a presión constante y la relación de incremento de presión con la temperatura a volumen constante, cumplía con el factor de 1/273 por grado de temperatura al cambiar de la escala Kelvin sobre la escala Celsius. Thomson en 1851 hizo uso de las observaciones de Renault uniendo la relación de la escala Celsius a Temperaturas termodinámicas.

Como las propiedades de los gases reales en un amplio intervalo de temperaturas se distinguen relativamente poco de los del gas perfecto, y sabiendo que un gas real desobedece las leyes del gas perfecto, es posible corregir las divergencias en un termómetro de un gas real, respecto a la escala termométrica centígrada termodinámica. estas correcciones son relativamente pequeñas y se hallan dentro de los límites de 0.001 a 0.5. así que conociendo las divergencias entre una y otra escala y haciendo empleo de puntos de referencia de sustancias reales se puede construir una gráfica que permite extrapolar los puntos para conocer los límites de uso en la escala termodinámica con la siguiente relación:

$$\frac{P_1 V_1}{P_{ref} V_{ref}} = \frac{T_1}{273.16^\circ K} \quad \dots(1.1)$$

Con esta ecuación se obtienen los puntos necesarios en la construcción de la gráfica (figura 1).

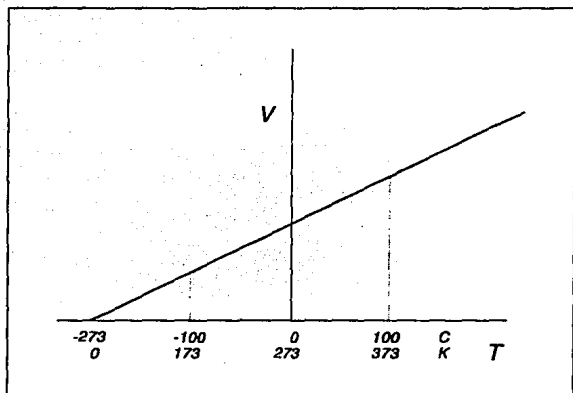


FIG. 1 EXTRAPOLACIÓN EN EL VOLUMEN DE UN GAS A LA TEMPERATURA DE CERO ABSOLUTO.¹¹

1.1.3 ESCALAS DE TEMPERATURA^{5,7,23,32}

En la construcción de una escala termométrica práctica, la elección de algún punto de referencia general que no varíe unívocamente con la modificación de la temperatura, además de no depender de factores externos y admitir la posibilidad de medir sus cambios aplicando un método relativamente sencillo y cómodo, sería prácticamente imposible, en realidad no existe ninguna propiedad termométrica que pudiera satisfacer plenamente esos requisitos en todas las gamas de temperatura que habrían de ser medidas.

Es por eso, que con objeto de reproducir de un modo más cómodo la escala termométrica termodinámica, en 1927 fue adoptada la escala práctica que ha recibido el nombre de Escala Termométrica Internacional de 1927 (ETI - 27), la cual enmarcaba puntos específicos de reproducción acorde a la escala termodinámica. En años posteriores se realizó la verificación de la ETI-27 a fin de ajustarla de un modo más preciso a la escala termodinámica, pero agregando mejoramientos basados en datos experimentales concretos y obtenidos en condiciones muy bien controladas. Como resultado de estas labores efectuadas, el comité consultativo de termometría elabora el proyecto de la escala Termométrica Práctica Internacional de 1948 (ETPI - 48). En el establecimiento de esta escala, el error límite de reproducción del punto de ebullición del agua constituía 0.01 C, y el del punto de fusión de hielo 0.001°C, el punto triple del agua en recipientes especiales se obtenía con un error límite no superior a 0.0001°C.

Tomando en consideración todo lo expuesto en cada conferencia y analizando detalladamente los resultados experimentales obtenidos en diversos laboratorios metrologícos de diferentes países, el Comité Consultativo de Metrología, reconoció el valor de 273.16 K como el mejor valor para la temperatura del punto triple del agua, situado a 0.01 C más arriba que el punto de fusión del hielo. Por esta razón la décima Conferencia General de Medidas y Pesas, celebradas en 1954, estableció la escala termométrica termodinámica con un sólo punto de referencia, el punto triple del agua. Dicho reglamento también prevé el uso de dos escalas termométricas: la escala termodinámica y la escala práctica, en cada una de estas, la temperatura puede expresarse de dos modos en grados Kelvin (con la notación solo de - K -) y en grados Celsio con la (notación °C).

En Octubre de 1968 el comité internacional de Medidas y Pesas adoptó la Escala Termométrica Práctica Internacional de 1968 (ETPI - 68), En esta fue amplificada la zona de bajas temperaturas hasta el punto triple del hidrógeno.

En diversas literaturas extranjeras, además de expresar la temperatura absoluta en grados Kelvin (K) y Celsio (°C) emplean el grado Fahrenheit (°F) y la escala absoluta que manejan se denomina escala Rankine (Ra). El grado Fahrenheit al igual que el grado Celsio, expresan la temperatura según la ETPI, pero con otro valor numérico, los puntos

cero de ambas escalas absolutas representan el mismo estado físico, la razón de estos dos valores es la misma, independientemente de la escala absoluta usada; es decir,

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{\text{Rankine}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{\text{Kelvin}}$$

Los valores numéricos pueden ser convertidos en grados de otra escala mediante las relaciones siguientes:

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.16 = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) = \frac{5}{9} \text{Ra} - 273.16$$

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.16 = \frac{5}{9} \text{F} + 255.37 = \frac{5}{9} \text{Ra}$$

En la ETPI - 68 los principales puntos de referencia se realizan con determinados estados de equilibrio de fase, de algunas sustancias puras, tales estados y valores se citan en la tabla (1)

1.2 TERMÓMETROS DE EFECTO MECÁNICO

Este tipo de instrumentos se caracterizan por efectuar la indicación de temperatura en base a la respuesta física que directamente proporciona el material empleado como sustancia termométrica, logrando la medición por detección de los cambios producidos e incorporación de algún dispositivo mecánico, eléctrico y óptico (escala).

TABLA 1 PUNTOS DE REFERENCIA (CONSTANTES) DE LA ESCALA ETPI - 68¹ 11

ESTADO DE EQUILIBRIO	VALOR DE TEMPERATURA		ESTIMACION TERMODINAMICA DUDOSA
	K	°C	
PTO TRIPLE DEL HIDROGENO EN EQUILIBRIO	13.81	-259.34	0.01
EQUILIBRIO ENTRE LAS FASES LIQUIDA Y GASEOSA DEL HIDROGENO BAJO PRESION DE 33.330 kpa (25/76 ATM)*	17.042	-256.10	0.01
EQUILIBRIO PTO DE EBULLICION DEL HIDROGENO	20.28	-252.87	0.01
EQUILIBRIO PTO DE EBULLICION DEL NEON	27.102	-256.04	0.01
EQUILIBRIO PTO TRIPLE DEL OXIGENO	54.361	-218.78	0.01
EQUILIBRIO PTO DE EBULLICION DEL OXIGENO	90.188	-18.962	0.01
EQUILIBRIO PTO TRIPLE DEL AGUA	273.15	0.01	**
EQUILIBRIO PTO DE EBULLICION DEL AGUA	373.15	100	0.005
EQUILIBRIO PTO DE SOLIDIFICACION DEL CINC	692.73	419.58	0.032
EQUILIBRIO PTO DE SOLIDIFICACION DE LA PLATA	1235.0	961.93	0.2
EQUILIBRIO PTO DE SOLIDIFICACION DEL ORO	1337.5	1064.4	0.2
EQUILIBRIO PTO DE SOLIDIFICACION DEL ANTIMONIO	903.84	630.74	0.001

* Los valores de las temperaturas se dan para el estado de equilibrio bajo una presión igual a 1 atm (101.325 kpa; 760 mm Hg), salvo los pto triples y el marcado con *.

** El valor es exacto por definición.

1.2.1 TERMÓMETROS DE LIQUIDO EN CAPILARES¹ 11

El termómetro de líquido en capilares es uno de los dispositivos mas comunes que se emplean tanto en industrias como en laboratorios. Este instrumento experimenta un cambio de dimensión mecánica ocasionado por un cambio de temperatura, éste tipo de termómetro se emplea en un amplio intervalo de temperaturas que va entre los -200 a 750 °C, y se caracterizan por su sencillez de manejo, exactitud y bajo precio.

El termómetro generalmente construido de vidrio, consta de un bulbo en la parte inferior relativamente grande como contenedor del líquido termométrico, un tubo capilar, un vástago gravado de una escala convencional, el líquido termométrico y una pequeña cavidad en la parte superior como sistema de seguridad en caso de exceder el límite de temperatura máximo y así evitar algún estallamiento. En operación el bulbo se somete al medio cuya temperatura se desea medir, el líquido se expande, y sube por el capilar, la temperatura se mide en el punto donde coinciden el límite alcanzado por el líquido y la escala en el termómetro. Es de gran importancia hacer notar, que la expansión registrada por el termómetro es la diferencia entre la expansión del líquido y la expansión del vidrio. Con objeto de tomar en cuenta dichos efectos de conducción, en su calibración, el termómetro por lo general se elabora tomando en cuenta el cálculo de una profundidad específica de inmersión (inmersión parcial) o para una inmersión total, por lo que no está por demás hacer notar que debe tenerse cuidado, al usar termómetros en sus condiciones correspondientes a las de calibración; en otras palabras, se producirán errores sustanciales si el termómetro calibrado para inmersión total se utiliza en inmersiones parciales y viceversa. De lo anterior se define por su forma de calibración a dos de las principales clasificaciones en termómetros capilares:

- 1) termómetro capilares de inmersión parcial (se caracteriza por su marca de inmersión).
- 2) termómetros capilares de inmersión total (no presenta marca de inmersión).

Cuando se presenta una situación, en la que no es posible el empleo de un termómetro en sus condiciones de calibración, es necesario aplicar una corrección en ambos tipos de termómetros con apoyo de un segundo termómetro (fig. 2) a fin de aplicar la siguiente ecuación de corrección:

$$CORRECCION = \beta n' (t_{med} - t_{bulb})$$

donde:

- β es el coeficiente de dilatación.
- n' la altura del tramo saliente.

t_{med} temperatura del medio que se mide con el termómetro base.
 $t_{u.}$ temperatura del termómetro auxiliar.

Como líquidos termométricos se emplean diversos materiales seleccionados en base a un alto coeficiente de expansión, (cuadro 2), sin embargo los líquidos más empleados son el alcohol etílico y mercurio. El alcohol (generalmente empleado con algún colorante), tiene la ventaja de poseer un coeficiente de expansión más alto que el mercurio, pero esta limitado a que tienda a hervir a baja temperatura (próxima a 70°C), además, al igual que los otros líquidos orgánicos, se debe de tener en cuenta que estos mojan el vidrio, debido lo cual disminuye la exactitud en las lecturas.

Por otro lado el mercurio ofrece, a pesar de su coeficiente de expansión bajo; una serie de ventajas:

- no moja el vidrio
- se obtiene relativamente fácil en estado químicamente puro
- bajo una presión de una atmósfera, permanece líquido en un intervalo de 38.87 a 356.58°C
- la presión ejercida de los vapores saturados de mercurio a una temperatura mayor de 356.58°C , en comparación de otros líquidos, es pequeña, lo que permite ampliar el intervalo de temperaturas.

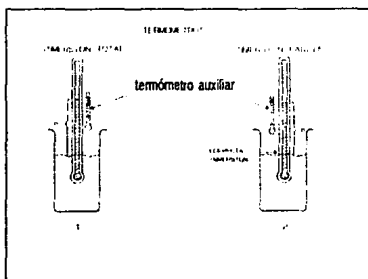
Los termómetros en cuanto a destino y campo de aplicación se dividen en los siguientes grupos:

- a) Patrones.
- b) Termómetros de laboratorio y especiales.
- c) Técnicos y de contactos eléctricos .
- d) Meteorológicos.
- e) Termómetros para la agricultura.
- f) Termómetros para uso doméstico.

El origen de clasificación es dada en base al grado de confiabilidad, exactitud e intervalo de temperaturas manejado en cada uno de ellos.

CUADRO 2 COEFICIENTES DE DILATACIÓN EN LÍQUIDOS TERMOMÉTRICOS.^{8,21}

LÍQUIDOS TERMOMÉTRICOS	LÍMITES POSIBLES DE APLICACIÓN (°C)		DILATACIÓN TÉRMICA VOLUMÉTRICA (K ⁻¹)	
	INFERIOR	SUPERIOR	REAL	APARENTE
MERCURIO	-35	750	0.00018	0.00016
TOLUENO	-90	200	0.00109	0.00107
ALCOHOL ETÍLICO	-80	70	0.00105	0.00103
KEROSENO	-60	300	0.00095	0.00093
ETER DE PETRÓLEO	-120	25	0.00152	0.00150
PENTANO	-200	20	0.00092	0.00090

FIG. 2 CORRECCIÓN DE TEMPERATURAS EN TERMÓMETROS CAPILARES.²¹

1.2.2 TERMÓMETROS DE DILATACIÓN^{5, 6, 16, 33}

Estos termómetros se fundan en la utilización de las propiedades de los cuerpos sólidos al modificar sus dimensiones proporcionalmente al variar la temperatura, estos dispositivos son ampliamente utilizados en sistemas automáticos de control de temperatura, como sistemas de prevención del tipo apagado - encendido en contactos eléctricos. Los termómetros de dilatación por el tipo de construcción se clasifican en Bimetálicos y Dilatométricos.

Los termómetros bimetálicos se forman a base de la fuerte unión de dos tiras de metal A y B a una misma temperatura cada una con diferente coeficiente de expansión térmica α , y α . (fig.3). El elemento B es generalmente hecho de invar (acero-36% níquel) con un coeficiente de expansión muy bajo (cuadro 3, $1.7 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$), pero con alta elasticidad, mientras que el elemento A posee un coeficiente de expansión relativamente alto. Debido a que el cambio la longitud del invar por grado de temperatura siempre será menor que el del contrario, al aumentar la temperatura del elemento bimetal, causará que este se flexione en la dirección del invar (metal inactivo) tal caso se muestra en la fig.3, mientras que al disminuir la temperatura del elemento bimetal la flexión será en la dirección del metal A (metal activo).

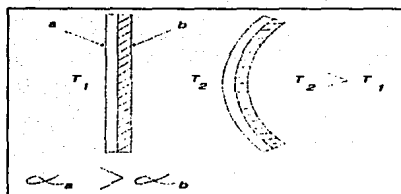
Los termómetros bimetálicos se destinan para empleo en temperaturas que oscilan entre los 500°C y -180°C , e incluso a niveles inferiores, sin embargo, a temperatura baja, el índice de deflexión se reduce con suma rapidez, que por el contrario, no se tiene una estabilidad muy prolongada temperaturas superiores a 400°C . La precisión del elemento bimetálico varía mucho, dependiendo de los requerimientos y aplicaciones, con un error en el orden del 0.5 al 1%.

Los termómetros dilatométricos generalmente no se emplean para medir temperatura, y al igual que los bimetálicos se emplean más en calidad de controladores automáticos de temperatura, pero se diferencian debido a que los materiales térmicos se encuentran separados (fig.4). Consta de un tubo metálico (metal activo)(1), dentro del cual permanece un vástago (metal inactivo)(2), el extremo superior del tubo se fija a una base

(3) en la cabeza (4) hay un dispositivo eléctrico de contactos constituidos por palancas articuladas (5). La parte inferior del tubo se sumerge por completo en el medio cuya temperatura se quiere medir, al elevarse la temperatura el tubo se dilatará más que el vástago, debido a lo cual este se desplazará hacia abajo y simultáneamente el movimiento moverá los contactos. Este tipo de dispositivos son empleados en gamas de temperatura que van desde -30 a 1000 C con una precisión en el orden de 1.5 a 2.5% dependiendo de la calidad en las aleaciones.

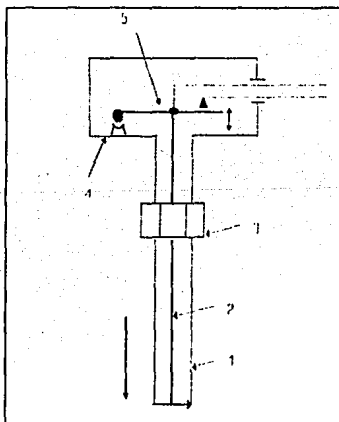
CUADRO 3 COEFICIENTES DE EXPANSIÓN Ó DILATACIÓN TÉRMICA EN METALES EMPLEADOS EN TERMOMETROS BIMETALICOS.^{4, 16, 31}

MATERIAL	COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA (αE°) ($^{\circ}C^{-1}$)	MODULO DE ELASTICIDAD		INTERVALO DE TEMPERATURAS ($^{\circ}C$)
		PSI ⁴	GN/m ²	
INVAR	1.70	21.4	147	0-200
LATÓN AMARILLO	18.3-23.6	15.0	96.5	0-400
MONEL 400	13.50	26.0	179	0-100
INCONEL 702	12.50	31.5	217	0-100
ACERO INOX 316	16.00	28.0	193	0-100
COBRE ROJO	15.30	22.0	152	0-150
CROMO-MOLIBDENO	12.30	-	-	0-100
ACERO NIQUEL	20.00	29.0	199	0-500
BRONCE	10.16	15.0	103	0-100



a, b metales
 T temperatura
 α coeficiente de dilatación

FIG. 3. TERMÓMETRO BIMETÁLICO³



1 metal activo
 2 vástago
 3 base para fijar vástago
 4 cabeza
 5 palanca de conexión

FIG. 4 TERMÓMETRO DILATOMETRICO¹⁴

1.2.3 RELES^{10,11}

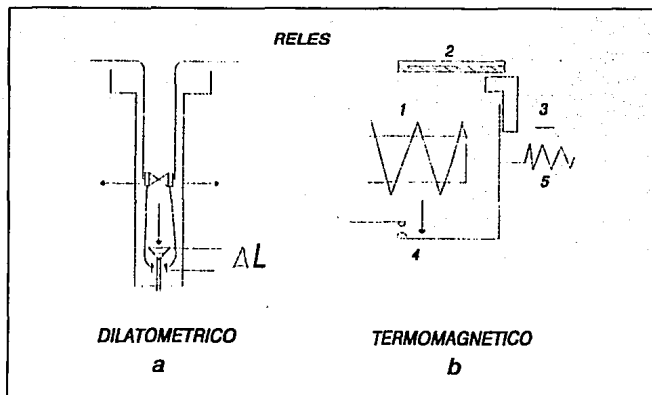
Este tipo de instrumentación se deriva directamente de los termómetros dilatométricos, sólo que estos dispositivos tienen la característica de no actuar en la medición o indicación de temperatura de algún espacio o cuerpo, interesando solo como parte integrante de un circuito eléctrico; asume la función protectora si se produce alguna anomalía en la alimentación eléctrica, usualmente en motores de compresores utilizados en la industria frigorífica. Existen dos tipos de relés los térmicos y los termomagnéticos, ambos son actuados en el calentamiento que se produce directamente e indirectamente por la intensidad de la corriente absorbida por dicho motor (efecto Joule), su diferencia radica en el tipo de accionamiento.

Los bimetalicos se dividen en dos grupos uno de calentamiento directo y otro de calentamiento indirecto.

En los del primer tipo la corriente de alimentación del motor atraviesa por el dispositivo, este consta de una barra bimetalica, el cual al calentarse, se dobla hacia el metal que menor conductividad posee, abriendo el contacto eléctrico, y bloqueando así el paso de energía al motor. El campo de aplicación se encuentra en el intervalo de -60 a 300°C .

El segundo tipo, de calentamiento indirecto, constan de una resistencia por la cual pasa la corriente absorbida por el motor, montada alrededor de una camisa de metal fig.(5a). Al calentarse el metal de la camisa, esta se expande reduciendo el espacio ΔL , que se establece mediante el tornillo de regulación, hasta lograr separar la conexión. Este dispositivo puede emplearse para temperaturas en un intervalo de 100 a 300°C .

De forma similar los relés termomagnéticos son actuados por una bobina o núcleo magnético(1), recorrido por la corriente de una fase del motor, que al producir calentamiento actúa a una barra bimetalica(2) y esta a su vez acciona a una palanca(3) que abre el contacto eléctrico(4), para la reincorporación del circuito, se debe enfriar la barra bimetalica y regresar a su posición original, mientras un resorte(5) se encarga de regresar a la palanca y cerrar nuevamente el circuito fig.(5b).



- 1 núcleo magnético
- 2 barra bimetálica
- 3 palanca
- 4 contacto eléctrico
- 5 resorte

FIG. 5 RELES^{10, 16}

1.2.4 TERMÓMETROS MANOMÉTRICOS O DE EXPANSIÓN^{5, 14}

Los termómetros de expansión representa uno de los dispositivos más económicos y versátiles usados en la fabricación de medidores industriales de temperatura, se diseñan para proporcionar una indicación de la temperatura a cierta distancia del punto de medición. La simplicidad de estos dispositivos permite lograr construcciones resistentes, minimizando la posibilidad de fallas por daños, con una mínima atención en su mantenimiento. Por otro

lado una de sus principales desventajas es que en caso de llegar a fallar el sistema, toda la unidad debe sustituirse o en caso de reparación se debe tener cuidado en su recalibración.

Su funcionamiento se funda por empleo de un fluido termométrico en un sistema herméticamente cerrado, midiendo el trabajo realizado por el fluido debido a la dependencia existente entre las variaciones de temperatura, y la presión de la sustancia termométrica de trabajo. Los termómetros con arreglo a la sustancia de trabajo se dividen en:

- 1 gas
- 2 líquido
- 3 condensación (Vapor líquido)

En los sistemas los que corresponden a cambios de volumen están, por regla, completamente llenos con un líquido, en tanto que los que corresponden a cambios de presión están llenos de gas, o bien, parcialmente con un líquido volátil.

Los termómetros de gas miden temperaturas en un intervalo de -200 a 650°C siendo su respuesta debida al cambio de presión acorde a los cambios en temperatura, en calidad de sustancia de trabajo se emplea principalmente nitrógeno, antes de ser llenados de gas, en todo el termosistema, se debe asegurar la ausencia completa de humedad, ya que esta podría modificar las presiones ejercidas durante la medición.

Los termómetros manométricos de condensación se fabrican con límites de medición de -50 a 300°C , poseen la característica de sólo llenarse parcialmente de condensado en una relación de 0.7 a 0.75 de su volumen, aproximadamente, y en su parte restante se forman vapores saturados del líquido (cuadro 4). Un rasgo muy característico de los termómetros de condensación es la considerable irregularidad de su escala, ya que no siguen un comportamiento uniforme lineal, por consiguiente para mantener la escala uniforme, es necesario prescindir de un dispositivo mecánico adicional especial (fig. 6).

Una de las principales desventajas en los termómetros manométricos de líquido y condensación, es la falta de un comportamiento lineal, el cual desfavorece a su precisión y amplitud de intervalos.

Los termómetros manométricos de líquido se fabrican, en una gran variedad de intervalos de temperatura, este tipo de termómetro se distinguen considerablemente de los de gas y condensación, debido a que su respuesta es a causa de la variación en volumen y no de presión; los líquidos más empleados en estos termosistema es el alcohol propílico, metaxileno, aceites de siliconas y mercurio, estos mismos permiten medir temperaturas entre -150 a 300°C .

Los termómetros manométricos se fabrican conforme a dos tipos de uso: **Indicadores y Registradores (termógrafos)**.

Los termómetros indicadores, constan de un elemento sensible o de medición (bulbo o ampolla), el cual contiene al fluido termométrico que cambia de volumen, presión o presión de vapor, el cambio, según sea el caso, se comunica por medio de un tubo capilar al dispositivo de medición, el cual, generalmente es el mismo dispositivo empleado en un manómetro de Bourdon (fig. 6).

Los termómetros registradores, también llamados termógrafos, difieren de los anteriores por contener, un sistema de indicación gráfica de temperatura, en lugar de el sistema de carátula para un manómetro Bourdon (fig. 6).

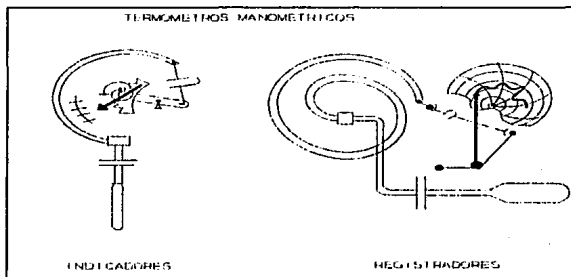


FIG. 6 TERMÓMETROS MANOMETRICOS^{1a}

CUADRO 4 MATERIALES EMPLEADOS EN LOS TERMÓMETROS MANOMÉTRICOS.^{3,16}

FLUIDO	RANGO DE APLICACIÓN (°C)
FREÓN - 22 (CHF ₂ Cl)	-25 a 80
PROPILENO (C ₃ H ₆)	-50 a 60
CLORURO DE METILO (CH ₃ Cl)	0 a 125
ACETONA (C ₃ H ₆ O)	100 a 200
ETILBENCENO (C ₈ H ₁₀)	160 a 300

1.2.5 TERMOSTATOS³

Estos dispositivos son controladores accionados por temperatura, mismos que se conocen también como controladores de ciclamiento, tiene como fin el regular la temperatura, generalmente, de superficies o espacios refrigerados entre dos límites prefijados. Entre las partes principales que constituyen a un termostato se encuentran:

- órgano de detección (termómetro)
- órgano de mando (interruptor eléctrico)
- dispositivos de enlace mecánico (palancas y resortes)

El elemento detector está expuesto directamente a la temperatura del medio cuya temperatura se requiera regular, donde cualquier tipo de termómetro común puede servir en la construcción del termostato. El órgano de mando esta formado por contactos eléctricos que actúan como interruptor, en algunos tipos de termostatos, el interruptor puede ser constituido por el propio termómetro de mando (termómetro de vidrio de contactos eléctricos), mientras que para la mayoría de los casos el interruptor será actuado por dispositivos de enlace mecánico directamente asociados por la influencia del órgano de detección.

En los termostatos, los dos dispositivos más comúnmente empleados son el de bulbo y bimetalico. El primero de ellos se compone de un bulbo, como órgano detector, lleno de cierto fluido termométrico (vapor, líquido o mezcla de vapor saturado), el cual se halla comunicado a un fuelle o diafragma, a toda variación en la temperatura detectada en el bulbo corresponderá la deformación del fuelle o diafragma, y con el sistema de palancas se cierran (rango inferior de refrigeración) ó abren (rango superior de refrigeración), los contactos eléctricos, o bien, se hacen actuar a otros mecanismos compensantes.

El otro elemento es constituido básicamente por la barra bimetalica, donde el bimetel se encuentra directamente en contacto con el medio cuya temperatura se desea medir.

1.3 TERMÓMETROS DE EFECTO ELÉCTRICO

Los termómetros de efecto eléctrico son los instrumentos más rápidos y confiables en medición de temperatura, se caracterizan, debido a que su respuesta producida, se traduce o convierte, en una señal eléctrica, ya sea a través de un cambio en la resistencia o voltaje, acorde a los cambios de temperatura. En base a su principio de funcionamiento, se clasifican en:

- TERMÓMETROS DE RESISTENCIA ELÉCTRICA.
- TERMOPARES.

1.3.1 TERMÓMETROS DE RESISTENCIA^{1, 2, 3, 4}

Los termómetros de resistencia se usan ampliamente para medir temperaturas en un intervalo de -260 a 750°C , sin embargo, algunos pueden medir temperaturas de hasta 1000°C . Su principio de funcionamiento se basa en la propiedad que tienen las sustancias de cambiar su resistencia eléctrica con el paso de voltaje al variar la temperatura, el termómetro se sumerge en el medio cuya temperatura se mide, conociendo la relación de variación en la resistencia del termómetro en función de la temperatura, se puede indicar acerca de la temperatura del medio cuya temperatura se desea conocer. Anteriormente se trabajaba con los materiales que se pensaban eran más favorables en la fabricación de termómetros de resistencia (metales puros), pero posteriores investigaciones demostraron

que también una serie de materiales semiconductores, pueden emplearse en calidad de termómetros, y debido a este descubrimiento se dividieron ambas clases en dos grandes grupos:

1) Metales Conductores - denominados termómetros de resistencia o detectores de resistencia de temperatura (RTD).

2) Metales semiconductores - denominados termistores.

Los grupos no se distinguen sólo por su material de construcción, su principal diferencia esta en su comportamiento ante la temperatura, es decir, la resistencia eléctrica del metal puro crece proporcionalmente lineal al aumentar la temperatura, debido a la dispersión creciente y moderada de los electrones en la heterogeneidad de la red cristalina, motivada por el incremento de las oscilaciones térmicas de los iones alrededor de sus posiciones de equilibrio. En los semi-conductores se observa otro caso, el número de electrones de conducción crece bruscamente con el aumento en la temperatura siguiendo un arreglo de comportamiento exponencial, además, a diferencia de los metales conductores puros (cobre platino, tungsteno, etc.), los termistores responden negativamente a la temperatura y su coeficiente de resistencia es 10 veces más alto (fig. 7, cuadro 5).

Los termistores se confeccionan con la formación de una pequeña placa, con los materiales semiconductores, en cambio los RTD son confeccionados de metales puros y se fabrican, generalmente, en forma de un enrollamiento de alambre fino (bobina no inductiva o devanado) sobre una armazón especial hecha de un material aislante, dicho enrollamiento suele llamarse elemento sensible (ES), el referido elemento se instala dentro de una camisa protectora especial de buena conductividad y resistencia mecánica, con el fin de protegerlo contra los daños mecánicos e influencias del medio ambiente (humedad) del espacio cuya temperatura se mide. Sin embargo, una de las funciones más importantes de la camisa, además de proteger, es su capacidad de inercia, ya que es en base a este parámetro el RTD definen su velocidad de respuesta; en base a esta característica, los termómetros de resistencia se subdividen en :

- Termómetros de inercia grande ($\tau = 240s$)
- Termómetro de inercia media ($\tau = 80s$)
- Termómetro de inercia pequeña ($\tau = 9s$ ó menos)

De forma general en los termómetros de alta precisión se requiere de una capacidad de inercia pequeña, y para reducir la capacidad de inercia, es necesario que el material de la camisa protectora posea buena conductividad térmica, y para esto la capa de aire comprendida entre el elemento sensible y las paredes interiores de dicha camisa, necesita ser lo menor posible (en algunos casos se emplean gases inertes). En la detección de los cambios de resistencia para registro de temperaturas, se emplean técnicas tradicionales de medición de resistencia, no obstante, dada la naturaleza en funcionalidad de origen eléctrico, es posible contar con instrumentación más sofisticada, que permita un completo manejo automático en el control y medición de temperaturas.

CUADRO 5 COEFICIENTES DE RESISTENCIA - TEMPERATURA A 20°C (T., 0°C).^{5,22}

SUBSTANCIA	α (°C)
NÍQUEL	0.0067
HIERRO (ALEACIÓN)	0.0020 A 0.006
TUNGSTENO	0.00480
ALUMINIO	0.00450
COBRE	0.00425
PLOMO	0.00420
PLATA	0.00410
ORO	0.00400
PLATINO	0.00392
MERCURIO	0.00099
MANGANINA	± 0.00002
CARBÓN	-0.00070
ELECTRÓLITO	-0.0200 A -0.09
SEMICONDUCTOR	-0.0668 A +0.14

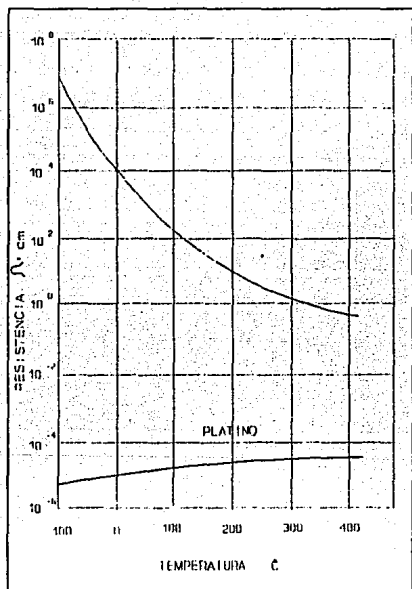


FIG. 7 RESISTIVIDAD DE MATERIAL PARA TERMISTOR COMPARADO CON PLATINO.⁴

1.3.2. TERMOPARES^{1, 2, 10, 16, 22}

El termopar, también conocido como termómetro termoelectrónico, es empleado ampliamente para la medición de temperatura en el intervalo de -200 a 2500 °C.

Entre sus principales ventajas de uso se encuentran:

- Alto grado de precisión y bajo costo.
- alta velocidad de respuesta.
- facilidad de instalación en zonas de difícil acceso.
- efectuar mediciones a larga distancia entre el punto de medición y el de registro.
- opción de graduar el aparato de medición y el termopar por separado y adaptabilidad a diversos elementos de lectura.
- posibilidad de registro automático de temperatura.

La medición de temperatura con empleo de termopares se funda en los fenómenos termoelectrónicos descubiertos por Thomas Seebeck en 1821. El efecto Seebeck, llamado así en memoria de su descubridor, consiste en lo siguiente:

Supongase un circuito formado por las uniones de los extremos de dos distintos conductores A y B (por ejemplo cobre y platino) (fig. 8), si a las uniones formadas se las mantiene a una temperatura t_1 y t_2 , respectivamente, la diferencia de temperaturas en las uniones dará como resultado el origen de una corriente eléctrica (E_{12}) llamada fuerza termoelectrónica motriz (f_{em}), misma que posee dirección y magnitud en función a las temperaturas en las uniones.

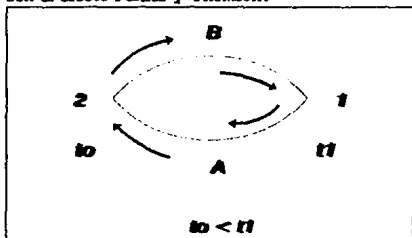
La generación de corriente en el sistema termoelectrónico por inducción de un calentamiento se justifica según la ley de Joule (I, R), mientras que la dirección de la misma, depende directamente de las propiedades eléctricas de los materiales empleados en la construcción del termopar (termoelectrodos), por ejemplo, en lo que corresponde a la unión 1 de temperatura t_1 (llámese caliente ó de trabajo), la dirección es dada del material que posee menor electronegatividad (menor densidad electrónica, del ejemplo platino), al material de mayor electronegatividad (mayor densidad electrónica, del ejemplo cobre), por efecto de compensación en sus capas de valencia, En lo que corresponde a la soldadura 2 mantenida a una temperatura t_2 , conocida (llámese unión de referencia), el sentido de ésta,

determina el signo tanto del mismo conductor como de la fuerza termoeléctrica motriz. De lo anterior se obtiene que el termoelectrodo positivo será aquel al que la corriente se dirige en una soldadura cuya temperatura es $t_1 < t_2$, y termoelectrodo negativo, aquel al que la corriente viene de esa misma soldadura. Como en el circuito examinado en la figura 8 la corriente engendrada en la soldadura 2 se dirige de A a B (del cobre al platino), el termoelectrodo A (cobre) es positivo, y el B (platino) negativo.

Por lo tanto el orden de inscripción de los electrodos en el subíndice de la fuerza termoeléctrica motriz E_{AB} , indica la dirección de la corriente en la soldadura 2, y por eso el termoelectrodo que se escribe primero en el índice, es positivo, y el segundo, negativo.

En los metales empleados en la fabricación de termoelectrodos, se puede conocer que la mayoría de ellos, son metales de transición (cuadro 6) o bien aleaciones de los mismos, esto es debido a que la distribución de los electrones en sus niveles de energía, muestran la mayor diferencia de respuesta con la temperatura, o bien, presentan mayor facilidad de excitación molecular, debido a sus capas d y f sin llenar, garantizando así la generación de una fem, aún con pequeños incrementos de temperatura. Es por esto que no se justifica el empleo de cualquier metal para construcción de termoelectrodos.

Además del efecto Seebeck, existen efectos adicionales que se presentan y modifican, ya sea con un aumento ó una disminución, a la fem total producida en un termopar, estos son el efecto Peltier y Thomson.



A y B metales
1 y 2 uniones
 t_0 temperatura inferior
 t_1 temperatura superior

FIGURA 8 DIAGRAMA BÁSICO DE UN TERMOPAR.³

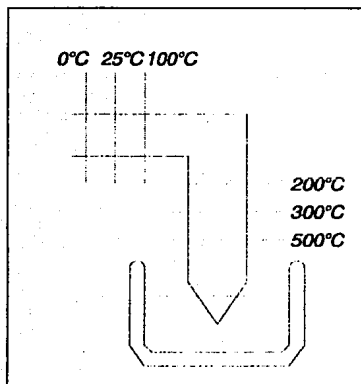


Fig. 9 GRADIENTE DE TEMPERATURAS PRODUCIDOS EN UN TERMOPAR.

El efecto Peltier se manifiesta en consecuencia al propio flujo de corriente producido en el termopar, donde la diferencia entre el calor que se absorbe, en la unión de trabajo, y el que se expulsa, en la unión de referencia, es la cantidad convertida en energía eléctrica, debido a que el sentido de la corriente es tal que se tiende a igualar la diferencia de temperaturas en las uniones, es por esto que se dice, un termopar actúa como una máquina térmica.

En lo que corresponde al efecto Thomson, este genera una fem, de mucho menor influencia que el efecto Peltier, debido a la existencia de un gradiente de temperaturas, generado a lo largo de cualquiera de los termoelectrodos del termopar, debido a factores como el propio gradiente de temperaturas existente entre la unión de trabajo y de referencia en el termopar y la temperatura que circunda en las extensiones de los termoelectrodos. El gradiente de temperatura llega a presentar influencia cuando se tienen elevados gradientes

de temperatura producidos en el sistema de trabajo (por ej. hornos de gas y microondas), es por esto la importancia que se tiene en el empleo de materiales aislantes que apoyen en la disminución del gradiente de temperatura que se presenta a lo largo de los termoelectrodos. Cabe aclarar que aún con el material aislante, siempre persistirá un gradiente de temperatura en el termopar debido al proceso mismo de medición (fig. 9), y que puede ser intensificada por la falta de homogeneidad en los materiales de construcción empleados en los termoelectrodos y/o extensiones, que originan corrientes parásito, haciendo más notorios los efectos anteriores.

1.3.2.1. LEYES DE LOS TERMOPARES^{1,18,24,25}

1. LEY DEL CIRCUITO HOMOGÉNEO: No es posible sostener una corriente termoelectrónica en un circuito de un sólo material homogéneo, aun variando la sección transversal, únicamente por la aplicación de calor.

2. LEY DE LOS METALES INTERMEDIOS: La inserción de un metal intermedio en un circuito de termopar no afectara la fem neta, siempre que las dos uniones introducidas por el tercer metal estén a temperatura idéntica.

Esta ley sugiere que un dispositivo para medir la fem termoelectrónica, se puede introducir en el circuito y en cualquier punto, sin afectar la fem neta, siempre que todas las uniones que se agregan al circuito por la introducción del dispositivo estén a la misma temperatura fig. 10.

3. LEY DE LAS TEMPERATURAS INTERMEDIAS. Si un sólo termopar desarrolla una fem neta E , cuando sus uniones se encuentran a las temperaturas T_1 y T_2 , y una fem E' , cuando sus uniones están a T_2 y T_3 , desarrollará una fem $E_c = E + E'$, cuando sus uniones están en las temperaturas T_1 y T_3 fig. 11.

4. LA F.E.M. térmica de un termopar con uniones a T_1 y T_2 es totalmente inafectado por temperaturas diferentes en cualquier parte del circuito si los dos metales usados son homogéneos cada uno fig. 12.

5. SI UN METAL C es insertado entre A y B en una de las uniones, la temperatura de C, en cualquier punto fuera de las uniones AC y BC, no tiene ninguna influencia con las uniones AC y BC si ambas están a la temperatura T_1 . La f.e.m. neta es la misma como si C no estuviera ahí.

Esta ley permite introducir los alambres de extensión ya sea con las mismas características termoelectricas que los termoelectrodos del termopar o bien con algún otro material homogéneo, sin afectar la f.e.m. neta del termopar fig. 13.

6. SI LA FEM DE LOS METALES A Y C es E_{AC} , y la de los metales B y C es E_{CB} , entonces la fem de los metales A y B es $E_{AC} + E_{CB}$.

Esta ley permite demostrar que es posible calcular, con anterioridad, la f.e.m individual producida en cada uno de los materiales que pudieran conformar una posible pareja termoelectrica, sin necesidad de encontrarla, con innumerables ensayos y combinaciones, de esta manera antes de conformar al par termoelectrico, se conocerá si funcionara con una baja o alta respuesta, en pocas palabras se estará diseñando un termopar. como se puede apreciar en la anterior, para ser posible el diseño del termopar es necesario el empleo de un material conocido C, este material es un estándar y generalmente se utiliza platino normalizado fig. 14.

LEY DE VOLTA:

Según la ley de Volta, en un circuito cerrado constituido por dos distintos conductores A y B, cuando las temperaturas en los puntos de su unión son iguales ($t_1 = t_2$), y no surgen fems extrañas, la corriente termoelectrica no se engendra, por eso se debe admitir que en este caso las fuerzas termoelectricas motrices que surgen en los puntos de unión 1 y 2 son iguales entre sí, pero tienen signos diferentes, debido a lo cual la fuerza termoelectrica motriz total del circuito equivale a cero.

La ley de Volta también puede aplicarse a un circuito cerrado compuesta por cualquier número de conductores homogéneos diferentes A,B,C,...,M,N. Entonces, cuando los

puntos de su unión tienen la misma temperatura t , la suma de las fuerzas termoelectromotrices es igual a cero. Cabe señalar que esta ley es un corolario directo de la segunda ley de la termodinámica, ya que si la suma de las fuerzas termoelectricas en tal circuito no fuera igual a cero, en éste surgiría una corriente térmica, si dicha corriente surgiera, entonces una parte del circuito comenzaría a calentarse y la otra a enfriarse, eso significaría que la evacuación y el suministro de calor se efectuaría sin gasto de trabajo, lo cual contra dice a la segunda ley de la termodinámica y conduce a la condición de que la suma de las fuerzas termoelectricas en tal circuito equivale a cero.

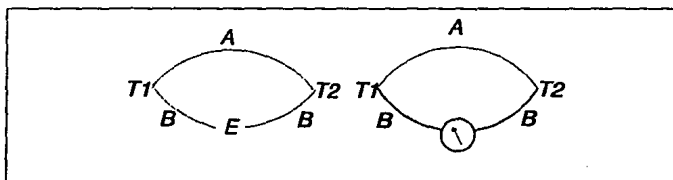


FIG. 10 SEGUNDA LEY DE LOS TERMOPARES¹

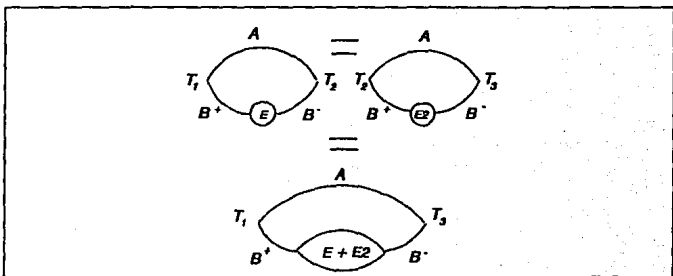
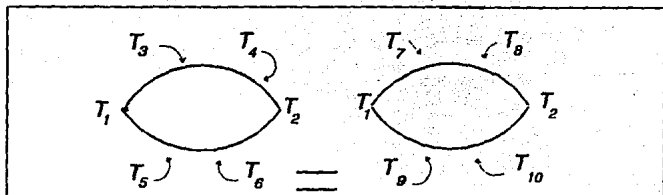
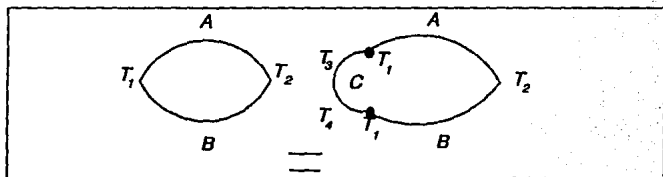
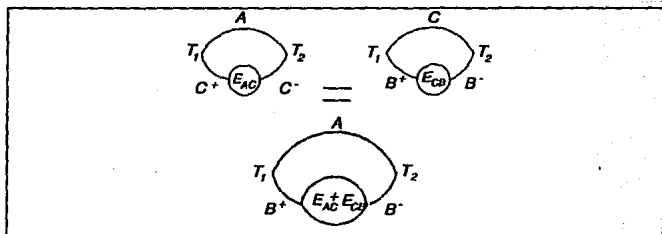


FIG. 11 TERCERA LEY DE LOS TERMOPARES¹.

FIG. 12 CUARTA LEY DE LOS TERMOPARES³FIG. 13 QUINTA LEY DE LOS TERMOPARES³FIG. 14 SEXTA LEY DE LOS TERMOPARES³

1.3.2.2. TIPOS DE CONECCIONES EN TERMOPARES^{10,11,12}

Con objeto de contar con un circuito más sensible, los termopares se conectan en serie; dicho arreglo se llama termopila (fig. 15), y para una situación de tres uniones, la salida sería, 3 veces la de un arreglo de un termopar único siempre que las temperaturas de las juntas de trabajo y referencia sean uniformes.

El arreglo de termopila es útil a fin de obtener una fem considerable para la medición de una pequeña diferencia de temperatura entre las dos juntas. En esta forma, un instrumento relativamente barato puede usarse para la medición de voltajes. Cuando se instala una termopila, es importante que las uniones estén aisladas eléctricamente. Las conexiones en paralelo y serie (fig. 15 y 16) puede usarse a fin de obtener la temperatura promedio de varios puntos, cada una de las uniones puede estar a una temperatura diferente y, por lo tanto generar una fem diferente. Estos métodos son los más adecuados para obtener una temperatura promedio en un espacio relativamente grande.

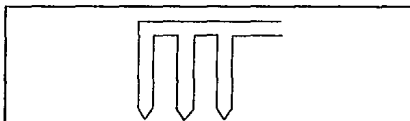


FIG. 15 CONEXION TERMOPARES EN SERIE

$$F_r = F_1 + F_2 + F_3 \quad \dots 1.3.1.$$

Termopares en serie producen una suma de voltajes.

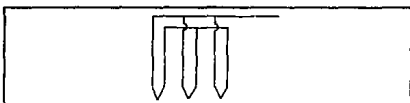


FIG. 16 CONEXION TERMOPARES EN PARALELO

$$F_r = \frac{(F_1 + F_2 + F_3)}{3} \quad \dots 1.3.2.$$

Termopares en paralelo producen una fem promedio.

1.3.2.3. MEDICIÓN DE F.E.M.^{13, 14, 23, 24}

Como se ha mencionado, los circuitos termoelectricos involucran dos juntas cuando menos, a diferentes temperaturas, para el surgimiento de una fem. Si la temperatura de una junta se conoce (junta de trabajo) la temperatura de la otra puede ser evaluada con facilidad.

Existen diversas formas para el conocimiento y evaluación de la fem en un circuito termoelectrico, pero en cada caso es necesario se cuenta con dos factores fundamentales:

- a) Unión de referencia a temperatura constante ó conocida.
- b) Instrumento medidor de voltaje.

A) UNIÓN DE REFERENCIA

La "National Bureau of Standard (NBS)", se ha encargado del estudio detallado en el comportamiento de respuesta temperatura - voltaje para los 7 pares termoelectricos más utilizados, de los cuales ha publicado tablas que son consideradas como estándar, estas tablas se prepararon con base a una junta de referencia de 0°C, misma que ha sido aceptada y generalizada por los diversos laboratorios e industrias que trabajan con termopares. Además otra de las características en las tablas presentadas por la NBS, es que los valores no se obtienen a partir de alguna ecuación, estas son obtenidas directamente a partir de datos experimentales reproducidos en condiciones muy bien controladas, es por esto que se les clasifica como tablas empiricas, sin embargo, la elevada confiabilidad que se logra en su precisión radica en que los voltajes obtenidos son comparados entre diversos termopares de su mismo tipo (TABLAS APENDICE A).

Existen diversas formas para establecer ó reproducir la temperatura de referencia, un primer arreglo muy conocido y utilizado, es el empleo de un baño de hielo (fig. 17a) en este sistema se puede reproducir una temperatura alrededor de 0.001°C. Pero la inmersión

insuficiente y el aumento de agua en el fondo del vaso, así como el empleo de agua desmineralizada, producen un error alrededor de 1°C .

Técnicas más avanzadas en la generación del punto de referencia, constan de la creación de blocks isotérmicos y sistemas de refrigeración electrónica, construidos en apoyo a el fenómeno de refrigeración del efecto Peltier logrando obtener un error máximo de $+0.05^{\circ}\text{C}$ en la reproducción de 0°C , haciendo posible eliminar el baño de hielo (fig.17b).

Los métodos más sofisticados cuentan con el apoyo de sistemas de compensación "hardware" y "software" con la capacidad de sintetizar el punto de referencia sin necesidad de algún tipo de baño, haciendo posible eliminar completamente cualquier tipo de instrumentación intermedia. La única desventaja es que como la relación voltaje - temperatura de los termopares no es lineal a todo lo largo de su intervalo de uso, se debe contar con ecuaciones para corrección en la medición de la temperatura, las cuales describan dicho comportamiento lo mejor posible para cada tipo de termopar (fig. 18).

B) INSTRUMENTO MEDIDOR DE VOLTAJE

En lo que respecta al instrumento de medición en un termopar, una vez establecido la temperatura en la unión de referencia (fig. 17), es necesario incluir en el circuito un medidor de voltaje de corriente continua (c.c) de elevada sensibilidad (galvanómetro), lo cual es posible realizar, apoyándose en las leyes de los termopares (específicamente la segunda) para esto se requiere, bien, interrumpir el circuito en la unión de referencia (fig. 17a y 17b) o bien interrumpir alguno de los termoelectrodos A o B (fig. 17c), y si es necesario, para ambos casos, mediante cables de extensión, incluir al galvanómetro. En la práctica el caso a es el más empleado por presentar mayor versatilidad en el intercambio de los termopares. Sin embargo, en cualquiera de ambos casos el termopar tendrá tres extremos: el de trabajo (1) que se somete al medio cuya temperatura se ha de medir, y en los extremos libres (2 y 3) que deben seguir manteniendo una temperatura constante.

Dado que la salida de los termopares es del orden de los milivolts, este puede medirse con un milivoltímetro (miligalvanómetro) de tipo analógico o digital.

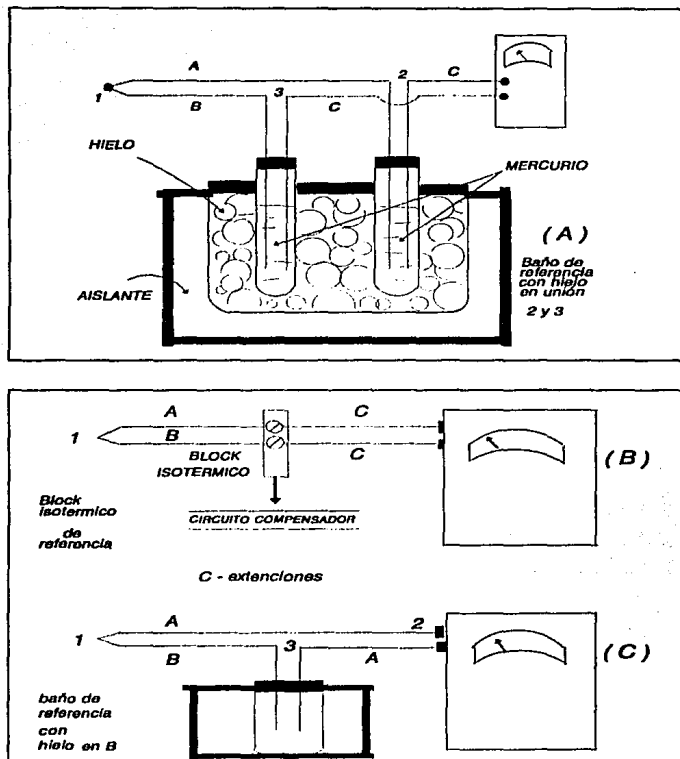


FIG. 17 INCLUSIÓN DE GALVANÓMETRO EN UN CIRCUITO DE TERMOPAR^{19,21}

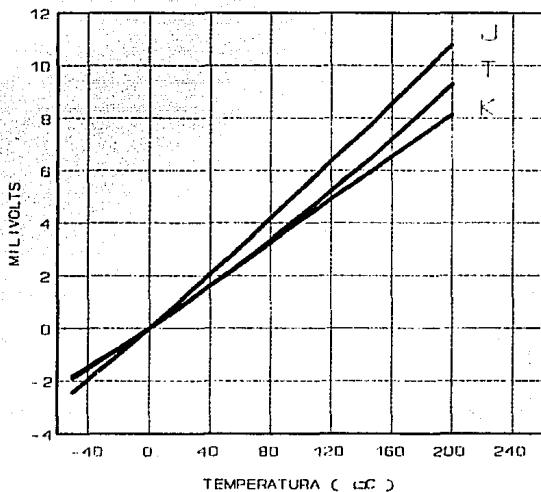
El voltímetro es en principio es un dispositivo muy sensible a la c.c, por lo que la medición dependerá de la fem generada por el sistema, es decir, tomando en cuenta la resistencia total del circuito, incluyendo la resistencia de los alambres de extensión y las propias conexiones.

Por lo tanto un sistema completo para realizar mediciones de la fem producida por un termopar, consta de los alambres de extensión, temperatura constante de referencia, conexiones y el voltímetro, este último con la característica de poder calibrar de forma manual o automática. Teniendo las ventajas de poder compensar efectos sobre la lectura, sean estos aumentos o disminuciones, ocasionados ya sea por la resistencia de los alambres de extensión, conexiones o por supresión de la fuente de referencia a 0°C , entre otros, eliminando así diferentes fuentes de error. Los diferentes requerimientos en la sensibilidad del voltímetro cambia para los diferentes tipos de termopares (cuadro 6). Sin embargo una característica que no se puede dejar de pasar desapercibida es cuando se tiene un termopar del tipo K, por ejemplo, y se requiera detectar al cambio de 0.1°C la sensibilidad requerida en el instrumento no debe ser menor a $4.4\mu\text{v}$. Como consecuencia a la magnitud de esta señal se presenta una invitación abierta completamente a la introducción de ruido en el sistema, y como resultado se producirá una variación en la toma de lecturas. Por esta razón los instrumentos diseñados deben contar con diferentes técnicas fundamentales en la reducción del ruido.

Las mediciones analógicas son razonablemente sencillas ya que dependen de una fuerza generada por la interacción entre una corriente y un campo magnético.

Sin embargo, el uso de dichos medidores analógicos está limitado por la exactitud con que puede leerse la posición del indicador o aguja con respecto a la escala. El paralaje es otro problema, y muchas veces dos individuos pueden leer el mismo medidor y llegar a valores diferentes de la magnitud que se mide. En cambio, con un medidor digital, el valor de la cantidad medida se muestra en forma directa como una serie de dígitos, las pantallas de cristal líquido son el ejemplo más conocido (calculadoras de mano), la exactitud inherente y velocidad de respuesta de los indicadores digitales, es muy superior que la de los indicadores analógicos.

CURVAS DE REFERENCIA
EN TERMOPARES (NBS)



COBRE - CONSTANTAN (T)
 HIERRO - CONSTANTAN (J)
 CROMEL - ALUMEL (K)

FIG. 18. CURVAS VOLTAJE - TEMPERATURA EN TERMOPARES (NBS)."

CUADRO 6 SENSIBILIDAD REQUERIDA EN MILIVOLTIMETRO PARA TERMOPARES.¹⁸

TIPO DE TERMOPAR	SENSIBILIDAD DEL VOLTIMETRO POR 0.1°C (μv)
E	6.2
J	5.1
K	4.0
R	0.7
S	0.7
T	4.0

1.3.2.4. CABLES DE EXTENSIÓN^{18, 21, 27}

Como se ha mencionado anteriormente, el extremo de referencia de un termopar debe permanecer a una temperatura constante diferente a la unión de trabajo, por lo que dicha unión tendrá que alejarse de las superficies calientes, especialmente en la práctica cuando se trabaja en condiciones industriales, como son tuberías de vapor y hornos principalmente, hacia la zona donde pueda instalarse un dispositivo para mantener constante la temperatura de los extremos de referencia.

Para esto no sería factible fabricar termopares con vástagos rígidos y largos, lo más razonable sería limitar las dimensiones de la armadura rígida sólo hasta los márgenes convenientes para asegurar su montaje cómodo, y posteriormente prolongar los electrodos del termopar mediante cables alargadores flexibles para termoelectrodos o cables de extensión.

Para sólo algunos tipos de termopares es recomendable que tales cables se fabriquen con las mismas exigencias de calidad que los materiales de los cuales están confeccionados los propios termoelectrodos, claro que cuando se presenta este caso, es porque se precisa de un mínimo de error en la medición (termopares de metales nobles), pero en consecuen-

cia, el costo se eleva dada la pureza a alcanzar en los materiales; en la mayoría de los casos de uso común, a los cables no se les requiere con las exigencias de trabajo que poseen los termoelectrodos. De aquí surge la posibilidad de elegir para dichos cables metales tales que no sean escasos y que en el intervalo de temperaturas de 0 a 100°C, conserven apareados entre sí, la fuerza termoelectromotriz que el termopar produce.

La incorporación de los cables de extensión al sistema de medición de termopares no produce alteraciones en las mediciones, esto apoyado en la ley de volta, a menos que se engendren fuerzas termoelectricas parásitas, no obstante el límite de extensión a emplear esta en función a la caídas de voltaje que se produce por la resistencia que ejercen los mismos cables y la capacidad que tiene el instrumento detector de contabilizar dicho error, es necesario observar que la polaridad al conectar los cables al instrumento de medición y el termopar sean los correctos, es decir positivo del termoelectrodo (+) con el positivo del galvanómetro y de igual forma al negativo (-), ya que al errar dichas condiciones pueden surgir graves errores en el proceso de medición sin ser causantes los cables de extensión.

Actualmente es posible efectuar lecturas de temperatura a larga distancia, sin requerir el empleo de extensiones, mediante un dispositivo que transmite una señal por ondas (fig. 19), hasta el receptor que registra la lectura, este dispositivo se instala en la cabeza del termopar y también puede instalarse en termómetros de resistencia.

Por último, el empleo de cable (varios hilos) o alambre (un sólo hilo) es indistinto, al igual que el calibre empleado, la diferencia se tiene en la maleabilidad, resistencia mecánica y tiempo de respuesta que se tienen en las 2 diferentes presentaciones, a menor calibre mayor velocidad de respuesta, quedando a criterio del operador la selección del tipo de extensión.

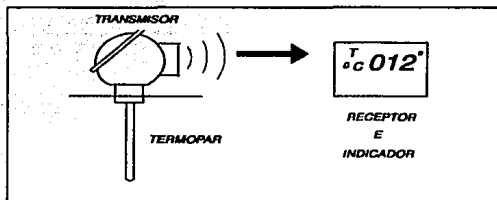


Fig. 19 TRANSMISIÓN DE SEÑAL EN TERMOPAR SIN CABLES DE EXTENSIÓN.¹⁷

1.3.2.5 RESISTENCIA EN TERMOPARES^{16, 17, 18}

Una de las principales características que se busca posea un termopar, consiste en que su señal de salida, sea lo más alta posible por cada grado de temperatura que se aumente o disminuya, sin embargo una vez que se consigue dicha característica, se debe evitar la menor pérdida posible de señal, y esto se logra guardando una baja relación de resistencia que se pueda ejercer por cada segmento de longitud que constituye la extensión de un termopar (cuadro 7).

La resistencia en un termopar no es una propiedad que se manifieste en forma constante, ya que el cambio de resistencia en los termopares es un fenómeno que se presenta naturalmente con el paso del tiempo, debido a la constante exposición y variación de temperaturas. No obstante, los cambios repentinos en la resistencia es un indicio de que alguna causa fuerte esta influenciando al termopar. Algunos de los casos puede ser que el termopar halla sufrido un fuerte golpe que puede llevar a la formación de una unión T, (fig. 20).

En este caso la nueva unión medirá la temperatura T_1 , y no T_2 .

Otras de las causas que provocan alteraciones en la resistencia de los termopares son las siguientes:

- Cambios bruscos de temperatura.
- debilitamiento del cable por tratamiento mecánico excesivo.
- deterioro del material por falta de un aislamiento adecuado.
- exposición a altas temperaturas por tiempos prolongados.
- exposición a bajas temperaturas por tiempos prolongados.
- exposición en atmósferas nocivas.
- magnetización.

Muchos de estos efectos no siempre pueden ser detectados por un chequeo normal de termopares, es decir en un sistema a las condiciones tal y como se trabajan normalmente. La medición de cambios de resistencia de un termopar es semejante a medir resistencia con una técnica conocida como "offset" (medición de ohms por compensación ó equivalencia). Como el nombre indica, existe una equivalencia en ohms que permite conocer la diferencia entre la corriente que fluye por el termopar y la corriente que se pierde en él.

Esta misma técnica es la que permite determinar la longitud máxima que puede tener un cable de extensión, para que la resistencia ejercida no tenga influencia en la fem producida y como consecuencia producir algún error en la lectura de temperatura (tabla 8).

El uso de extensiones en grandes distancias ejercen un efecto proporcional, por ejemplo si se tiene un termopar del tipo K y se emplea un cable del # 20, la resistencia por pie de cromal - alumel es 0.528 ohms. A 200 ft (pies) ejercerá una resistencia de 105 ohms.

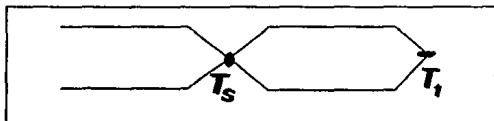


FIG. 20 CAUSAS DE CAMBIOS EN LA RESISTENCIA DE UN TERMOVAR¹¹

CUADRO 7 TAMAÑO Y RESISTENCIA EN CABLES DE TERMOFAR COMERCIALES.^{10,11}

CALIBRE(B&S)	8	14	16	20	24	28	30
DIÁMETRO(IN)	0.128	0.064	0.051	0.032	0.020	0.012	0.010
CONDUCTOR	RESISTENCIA - OHMS/ FT						
COBRE	0.0006	0.003	0.004	0.010	0.026	0.065	0.103
HIERRO	0.004	0.015	0.003	0.059	0.149	0.376	0.548
CONSTANTAN	0.018	0.072	0.114	0.291	0.725	1.850	2.940
CROMEL	0.026	0.104	0.165	0.415	1.050	2.700	4.030
ALUMEL	0.011	0.043	0.069	0.113	0.438	1.110	1.760
PLATINO	0.004	0.016	0.025	0.066	0.166	-	0.663
PLATINO-10%	0.007	0.028	0.044	0.119	0.298	-	1.190
PLATINO-13%	0.008	0.031	0.049	0.124	0.312	-	1.250

CUADRO 8 LIMITE DE ERROR PARA EXTENSIÓN DE CABLES EN TERMOPARES.^{10,11}

TIPO DE CABLE EN EXTENSION	INTERVALO DE TEMPERATURA		LIMITE DE ERROR			
	°F	°C	ESTANDAR		ESPECIAL	
			°F	°C	°F	°C
J	32 a 392	0 a 200	4.0	2.2	2.0	1.1
K	32 a 392	0 a 200	4.0	2.2	-	-
T	-76 a 212	-60 a 100	1.8	1.0	0.9	0.5

1.3.2.6. CONVERSIÓN VOLTAJE - TEMPERATURA^{10,11,12}

Las relaciones matemáticas generalmente son el método más rápido de relacionar 2 variables que tienen cierta interacción.

La relación fem - temperatura para un termopar en general no puede ser expresado por una simple ecuación dado que su respuesta en el voltaje de salida no sigue un comportamiento lineal definido a lo largo del intervalo en sus temperaturas de empleo, dicho comportamiento se puede apreciar en la figura 19 (pag. 43).

Las diferentes bibliografías consultadas, coinciden en que el mejor método para conocer con precisión la temperatura en la unión de trabajo de un termopar es tomando la lectura directamente del voltaje que se produce en la medición y consultando las correspondientes tablas para el tipo de termopar, publicados por la NBS.

Las desventajas de este método son las siguientes:

- La temperatura no se puede conocer al momento de la medición del voltaje.
- Se debe contar con las tablas de la NBS para el tipo de termopar utilizado.
- Se debe contar con un galvanómetro de elevada sensibilidad y alta precisión.
- La unión de referencia debe estar siempre a 0°C lo que implica que siempre se debe contar con una fuente enfriamiento, que en casos prácticos resulta algo estorboso.
- Los termopares deben ser normalizados.

Una de las características de las tablas presentadas por la NBS, es que los valores no se obtiene a partir de alguna ecuación, estos son obtenidos directamente de datos experimentales reproducidos en condiciones muy bien controladas, es por esto que en ocasiones se les considera como tablas empíricas. Sin embargo la elevada precisión que se logra, radica en que los voltajes obtenidos son comparados entre diversos termopares normalizados del mismo tipo.

Por otro lado, las ecuaciones desarrolladas que se emplean para realizar un seguimiento en el comportamiento de los termopares, pertenecen a dos clases:

- 1) Las que permiten conocer la relación $T - V$
- 2) Las que permiten conocer la relación $V - T$

Ambos tipos de ecuaciones poseen la característica de sólo describir los comportamientos termométricos en un intervalo definido de temperaturas, fuera de estos intervalos pierden gran confiabilidad.

Por ejemplo para en un primer caso donde se utiliza la relación $T - V$, se tiene una ecuación que se emplea para reproducir la zona de 630.74 a 1069.43°C en la escala

Termométrica Práctica Internacional, por medio de un termopar patrón de clase superior perteneciente al grupo del platino, y es dada como:

$$V_{(t)} = a + bt + ct^2$$

...1.3.3.

donde V es la fuerza termoeléctrica de un termopar cuyos extremos se hallan a una temperatura $t_0 = 0^\circ\text{C}$ y el extremo de trabajo, a una temperatura t ; a , b , c son las constantes calculadas de acuerdo con los valores $V_{(t_0)}$ a una temperatura de $630.74 \pm 0.2^\circ\text{C}$ (punto de solidificación del antimonio), en los puntos de solidificación de la plata (961.93°C) y del oro (1064.43°C).

Tal como se puede apreciar la ecuación anterior sólo se emplea para reproducir voltajes a temperaturas muy elevadas quedando fuera totalmente la aplicación en cualquier campo referido a procesos en alimentos.

Para un segundo caso donde se presenta la relación $V - T$, se puede realizar un seguimiento de temperaturas con empleo de el siguiente polinomio:

$$T = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + \dots + a_n X^n$$

...1.3.4

Donde

T = temperatura de la unión de trabajo [=] $^\circ\text{C}$

X = voltaje del termopar [=] v

a = coeficiente polinomial único a cada termopar (cuadro 9).

n = máximo orden del polinomio.

El valor de los coeficientes polinomiales (a) son proporcionados por la NBS propios para cada termopar, los cuales son obtenidos por aproximaciones sucesivas.

Los valores se caracterizan por estar restringidos fuera de las condiciones límite indicados en el cuadro 9. En las condiciones marcada por el polinomio, si es posible emplear cualquier termopar para obtención de temperaturas en la mayoría de los procesos aliment-

cios, quedando fuera sólo aquellos que involucran sistemas a baja temperatura (congelación).

Las desventajas que en cierta forma llega a presentar este método es el hecho de seguir manteniendo la unión de referencia a 0°C, además de que se debe contar con una máquina calculadora para rapidez en los cálculos. Por otro lado, el voltímetro no es una desventaja, siempre y cuando se encuentre calibrado, ya que la sensibilidad dependerá del grado de exactitud que se requiere alcanzar (ver cuadro 6).

Otro sistema que se basa en un método gráfico pero que también involucra ecuaciones del tipo V - T consiste en dividir dentro de 8 secciones la curva característica del termopar empleado (fig. 21) en donde cada sector se aproxima a un comportamiento polinomial del tercer orden.

$$T_n = bx + cx^2 + dx^3$$

...1.3.5.

Donde:

- Tⁿ = temperatura en el intervalo a [=] °C
- x = voltaje producido por el termopar [=] v
- b, c, d = ctes. en intervalo de temperaturas a.

Las desventajas en el método es debido a que es necesario contar con un software como sistema de adquisición y tratamiento de datos, ya que a cada sección le corresponde cierto valor de las constantes b, c, d. Además se sigue requiriendo de la fuente de enfriamiento para la unión de referencia a 0°C, sin embargo este polinomio sí puede ser empleado en algunos tipos de termopares, para sistemas a baja temperatura en procesos alimenticios.

Por último una ecuación muy útil y sencilla que describe las variaciones lineales de voltaje - temperatura, para todo tipo de termopares, es una ecuación tomada de la relación simple propuesta por el mismo Thomas Seebeck como:

$$E_{AB} = (V_1 - V_0) = \alpha(T_1 - T_0)$$

...1.3.6.

donde:

V_0 = voltaje producido a las condiciones de la unión de referencia [=] μV

V_1 = voltaje producido por la unión de trabajo [=] μV

T_1 = Temperatura a la unión de trabajo [=] $^{\circ}\text{C}, \text{K}$

T_0 = Temperatura de la unión de referencia [=] $^{\circ}\text{C}, \text{K}$

E_{AB} = fem generado por los termoelectrodos A y B [=] μV

α = coeficiente Seebeck [=] ($\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$)

La gran limitante que se presenta en esta ecuación es, que el coeficiente Seebeck debe ser constante, y para que esto suceda, se deben ocupar sólo pequeños intervalos de T en toda la gama de uso de cualquier termopar. Sin embargo la gran ventaja de esta ecuación radica en el hecho de no ser indispensable la fuente de enfriamiento para mantener la unión de referencia a 0°C , siendo posible el uso de las tablas normalizadas de la NBS, aplicando una simple corrección.

CUADRO 9 COEFICIENTES POLINOMIALES NBS.¹⁴

	TIPO J	TIPO T	TIPO K	TIPO R
	0 A 760°C $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	-160 A 400°C $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$	0 A 1370°C $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$	0 A 1000°C $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
a_0	-0.0488868252	0.100860910	0.226584602	0.26363291
a_1	19873.14503	25727.94369	24152.10900	7179075.491
a_2	-218614.5353	-767345.8295	67233.4248	-48840341.37
a_3	11569199.78	78025595.81	2210340.682	1.90002E+10
a_4	-264917531.4	-9247486589	-860963914.9	-4.82704E+12
a_5	2018441314	6.97688E+11	4.83506E+10	7.62091E+14
a_6		-2.66192E+13	-1.18452E+12	-7.20026E+16
a_7		3.94078E+14	1.38690E+13	3.71496E+18
a_8			-6.33708E+13	-8.031104E19

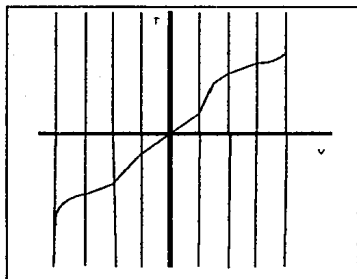


FIG. 21 CURVA DIVIDIDA EN OCHO SECTORES²¹

1.3.2.7. CORRECCIÓN DE TEMPERATURA EN LA UNIÓN DE REFERENCIA MANTENIDA A UNA TEMPERATURA DIFERENTE DE CERO^{16,11}

Una de las características principales de trabajar con termopares consiste en mantener, por regla general, a la unión de referencia, a una temperatura constante, siendo generalmente 0°C el punto adoptado. Sin embargo en innumerables casos al medir temperaturas en condiciones prácticas, la unión de referencia se puede mantener constante pero no igual a cero. Con esto, al variar la temperatura de dicha unión también cambia la fem producida por el termopar, lo cual hace necesario introducir una corrección.

La corrección se puede realizar de dos formas mediante la suma o resta algebraica en la diferencia de voltaje causado por la diferencia de temperaturas en la unión de referencia ó, directamente si se tiene la posibilidad de calibrar el instrumento de medición de tal forma que se ajuste la lectura, que al final de cuentas también resulta una suma o resta de voltajes.

Si bien basándose en la fem obtenida por cualquiera de los métodos anteriormente descritos, con la temperatura de referencia (t'') igual a 0°C , podemos escribir la ecuación de un termopar, la cual expresa en forma general, la fuerza termoeléctrica motriz que surge en un circuito de dos termoelectrodos A y B, en función de la temperatura de los puntos de su unión como:

$$E_{AB}(t_0) = \theta_{AB}(t_0) + \theta_{BA}(t_0)$$

o bien

$$\dots 1.3.7a.$$

$$E_{AB}(t_0) = \theta_{AB}(t_0) - \theta_{AB}(t_0)$$

$$\dots 1.3.7b.$$

Donde la fuerza termoeléctrica motriz de un termopar, cuyos puntos de unión tienen temperaturas diferentes (t, t_0), es igual a la diferencia de las fuerzas termoelectromotrices de contacto $e_{AB}(t)$ y $e_{BA}(t_0)$.

Ahora si suponemos que, al permanecer invariable la temperatura (t) del extremo de trabajo, y la temperatura de referencia, que durante su caracterización era igual a t_0 (0°), varío y se elevo hasta t''_0 . En este caso la fem $E_{AB}(t, t_0)$, desarrollada por el termopar, se diferenciara de su valor original con la referencia a 0°C .

Valiéndose de la ecuación 1.3.7b. se puede determinar esa diferencia como:

$$E_{AB}(t_0) - E_{AB}(t''_0) = [\theta_{AB}(t_0) - \theta_{AB}(t_0)] - [\theta_{AB}(t_0) - \theta_{AB}(t''_0)] \quad \dots 1.3.8.$$

o bien

$$E_{AB}(t_0) - E_{AB}(t''_0) = \theta_{AB}(t_0) - \theta_{AB}(t_0) - \theta_{AB}(t_0) + \theta_{AB}(t''_0) \quad \dots 1.3.8a.$$

reduciendo el término $e_{AB}(t_0)$ se tiene

$$E_{AB}(t_0) - \theta_{AB}(t''_0) = \theta_{AB}(t_0) - \theta_{AB}(t_0) \quad \dots 1.3.9.$$

despejando $E_{AB}(t, t_0)$ se obtiene la relación que indica la diferencia buscada.

Para cuando se tiene $t, < t'_0$, la corrección es :

$$E_{AB}(t_0) = E_{AB}(t'_0) + E_{AB}(t_0) \quad \dots 1.3.10$$

y cuando se tiene $t_0 > t'_0$, la corrección es

$$E_{(t_0)} = E_{AB}(t'_0) - E_{AB}(t_0) \quad \dots 1.3.11$$

Se hace notar que en las ecuaciones 1.3.10. y 1.3.11 el efecto de la corrección, independientemente de su signo, es una constante que perdura mientras la relación $V - T$ permanece lineal, ya que cuando hay un cambio de comportamiento también hay un cambio de la constante. Esta es la principal razón por la cual se tiene que efectuar tanto la validación de termopares, como la calibración del instrumento de medición a las condiciones de trabajo que se requiera emplear al termopar.

1.3.2.8 CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE TERMOPARES^{18, 21, 22, 27}

En teoría, es posible emplear dos materiales homogéneos cualesquiera, no semejantes y sobre todo conductores, para formación de un termopar, pero diversos metales y aleaciones ya han sido desarrollados específicamente para construcción de termopares, siendo 7 combinaciones aceptadas y estandarizadas por el " Subcommittee of the American Society for testing and materials ", a cada una de las combinaciones se le ha asignado una letra a modo de clasificación (cuadro 9).

Dentro de los atributos que se busca se han desarrollados por las combinaciones de materiales en la formación de termopares se encuentran:

-Proporcionar una relación Temperatura - Voltaje razonablemente lineal en el intervalo de temperatura útil del termopar, con lo que se simplifica la instrumentación, además de ayudar a proporcionar un grado consistente de precisión.

-**Temperatura máxima útil y costos:** la temperatura máxima que puede alcanzar un termopar, esta dado en función del punto de fusión característico de los termoelectrodos o bien por el cambio drástico en sus características termoelectricas. Los termoelectrodos de mayor punto de fusión generalmente cuestan más para fabricarlos y purificarlos.

-**Atmósferas de empleo:** el medio ambiente que circunda a un termopar es un factor que en ciertos casos limita su empleo, ya que este puede influir sobre las características termoelectricas de los termoelectrodos.

El platino, por ejemplo, es útil en atmósferas neutras u oxidantes pero se contamina en atmósferas reductoras y vacío (a una temperatura de 500°C el platino en el vacío se sublima) y aunque ya se han desarrollado protecciones para empleo en diferentes tipos de trabajos, no siempre se puede garantizar, al momento de su instalación, la hermeticidad de los mismos.

-**El voltaje de salida del termopar debe ser alta por cada grado que se aumente o disminuya la temperatura,** en vista de que la fuerza termoelectrica, desarrollada por la mayoría de los termoelectrodos termoelectricos es generalmente pequeña (entre 0.01 a 0.07 mv/°C) por lo que es natural que se prefiera un termómetro que produzca un mayor fem, esto permite el empleo de aparatos de medición menos sensibles pero más confiables.

-**homogeneidad termoelectrica** ya que cuando partes de los electrodos tienen una homogeneidad termoelectrica parásito que puede alterar las mediciones de la temperatura hasta en un orden de 10 a 25°C de la lectura original. Esta es una clásica desventaja de las aleaciones, por lo que se debe tener mucho cuidado en su confección. No obstante en la práctica también no es fácil obtener conductores termoelectricamente homogéneos a todo lo largo de la extensión de estos, sobre todo si se trata de los fabricados con aleaciones de metales nobles. También se ha de prestar atención al hecho de que incluso un buen conductor químicamente homogéneo se transforma en fuente de fuerzas termoelectricas parásitas cuando sus partes se distinguen por su estado físico. Por ejemplo, la fuerza termoelectrica motriz de un termopar puede variar si los electrodos se someten a la acción de un campo magnético o a sollicitaciones mecánicas (compresión, torsión o alargamiento).

-**Resistencia mecánica** ya que con esto se permite manejar bajos calibres (diámetro del termoelectrodo).

-**Alta sensibilidad** que esta muy relacionado principalmente con la conformación de la unión de trabajo, calibre del termoelectrodo, y camisa de protección.

Como se puede apreciar en la tabla 1.10.5. los termopares de mayor precisión pertenecen a los del grupo del platino estos termopares son empleados principalmente en el intervalo de 0 a 1500 °C como termómetros patrones de orden superior en la determinación de puntos específicos de temperatura para la escala Termométrica Práctica Internacional.

CLASIFICACIÓN DE TERMOPARES

Según el carácter de los materiales de construcción de los termoelectrodos, los termopares se dividen en dos grupos:

A Los termopares con termoelectrodos de metales nobles o también conocidos como metales preciosos.

B Los termopares con termoelectrodos de metales innobles ó metales básicos.

A el grupo A pertenecen los termopares fabricados con platino-platino-rodio. Según su destino se dividen en 4 principales variedades en función a su precisión cuadro 11.

A el grupo B pertenecen los termopares de aleaciones, y son los que conforman las clases con mayor grado de error.

CUADRO 10 CARACTERÍSTICAS DE TERMOPARES^{14,21}

DESIGNACIÓN DE TERMOFAR	MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	INTERVALO DE TEMPERATURA UTIL (°C)	PRECISIÓN % (0 -100 °C)
R	PLAT - PLAT/ROD Pt-Pt,13%Rh	-50 a 1700	+0.25
S	PLAT - PLAT/ROD Pt-Pt,10%Rh	-50 a 1700	+0.25
B	PLAT/ROD-PLAT/ROD Pt,30%Rh-Pt,6%Rh	0 a 1820	+0.5
J	HIERRO-CONSTANTAN Fe-57%Cu,43%Ni	-150 a 1000	+1.0
T	COBRE-CONSTANTAN Cu-57%Cu,43%Ni	-200 a 350	+0.5
K	CROMEL - ALUMEL 90%Cr,10%Ni - 94%Ni,3% Mn,2%Al	-200 a 1300	+1.5
E	CROMEL-CONSTANTAN 90%Cr,10%Ni - 57%Cu,43%Ni	-250 a 1000	-

CUADRO 11 CLASIFICACIÓN DE TERMOPARES EN BASE AL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN^{13,17}

	ERROR NORMALIZADO		
	°C	$\frac{\%}{10^{\circ}\text{C}}$	$\frac{\%}{10^{\circ}\text{C}}$
TERMOPARES PATRONES DE CLASE SUPERIOR	0.5	0.4	0.4-0.7
TERMOPARES PATRONES	1.1-1.7	0.4-0.5	1
TERMOPARES DE USO COMÚN (ESTÁNDAR)	2.2	0.75	2
TERMOPARES TÉCNICOS	2.2 + 5	1.5	-

1.3.2.9. CONFECCIÓN DE TERMOPARES^{13,15,17}

En la conformación de termopares se enlistan como principales elementos a la unión de trabajo y la camisa de protección. Estas dos características en los termopares deben lograr una elevada afinidad a fin de intervenir en lo más mínimo posible, a la producción de algún umbral o falsedad en la toma de lecturas.

La confección de la punta de trabajo en un termopar consiste primordialmente de la unión de los termoelectrodos para formación de la llamada unión ó punta de trabajo. La unión puede formarse por medio de dos técnicas, una consiste en la torsión de los termoelectrodos, y la otra por soldadura, dichas uniones producen cuanta variedad de termopares se halla en el mercado.

La torsión es una técnica muy poco utilizada, dado que se la fragilidad en su manejo.

En lo que respecta a la técnica de soldadura existen diversos tipos para efectuarla, dentro de estos la más empleada es la soldadura eléctrica, este tipo de soldadura se realiza tanto torciendo los hilos como sin torcerlos (fig. 22). Al efectuar la torsión no es recomendable practicar más de dos vueltas, si la torcedura se hace con mayor número de vueltas, entonces la unión de trabajo puede no hallarse en el lugar de la soldadura.

En lo que corresponde a la selección de un diámetro adecuado de uso en los termoelectrodos, estos se pueden seleccionar tan delgados o gruesos, de acuerdo a los requerimientos de trabajo que se presenten, en forma general se puede decir que entre más

alta sea la temperatura a medirse mayor espesor debe poseer el calibre de los termoelectrodos (cuadro 12), sin embargo conforme se incrementa el tamaño, el tiempo de respuesta de la temperatura, a los cambios de temperatura, se hace mayor (fig. 24).

Una característica que también se hace muy notoria es que el grosor de la armadura o camisa de protección, va en función al calibre de los termoelectrodos, en otras palabras, entre mayor sea el calibre en termoelectrodos mayor será el diámetro de camisa y viceversa (cuadro 13).

Son tres tipos de armaduras (camisas) que involucran la protección en los termoelectrodos (fig. 23):

- 1.- Unión aterrizada en la camisa (GROUNDED).
- 2.- Unión sin contacto en la camisa (UNGROUNDED).
- 3.- De exposición libre (BARE WARE).

Cada una de las protecciones, relaciona una diferente velocidad de respuesta para un mismo tipo de termopar, sin embargo todos tienen el objetivo común de garantizar conservar en buen estado físico la punta de trabajo protegiéndola de daños mecánicos y medios corrosivos principalmente. Las camisas se fabrican generalmente de acero inoxidable de diversas categorías con longitudes y grosores que varían de acuerdo a los requerimientos de trabajo (cuadro 13). El grosor de la camisa va a depender directamente de la presión a soportar; si la presión es atmosférica o cercana a ella, se pueden emplear camisas que soportan de 2.5 a 4 Kg f/cm^2 , para soportar mayores presiones se cuentan con camisas que soportan 64, 250, y hasta 500 Kg f/cm^2 .

Entre las cualidades se requiere cumpla una camisa están:

- Poseer un dispositivo de empaque que evita la penetración de humedad gases y polvo en el interior de la camisa.
- Debe ser hermético completamente cuando así se requiera en atmósferas nocivas o sistemas a presión.
- Debe asegurarse la posibilidad de extraerse de la camisa los termoelectrodos para una revisión periódica.

-Es necesario que el material protector posea buena conductividad térmica, que permita a la unión de trabajo poseer un buen contacto térmico con la parte inferior de la camisa y por consiguiente con el medio. Esta característica se ve determinada por la capacidad de inercia y se refleja directamente en el tiempo de respuesta (fig. 25).

Los termopares se fabrican con los siguientes valores de inercia calorífica:

Hasta 5 segundos - pequeña capacidad de inercia
(termopares de elevada precisión y velocidad de respuesta)

Hasta 60 segundos - moderada capacidad de inercia

Hasta 180 segundos - gran capacidad de inercia
(termopares en medición a elevadas temperaturas y/o presiones)

Los factores que influyen en la rapidez con la que la señal de los termopares puede ser transmitida son :

- 1- La intensidad de la señal en milivoltios.
- 2- La resistencia de la extensión que cubre el termopar.
- 3- La existencia de interferencia eléctrica, magnética y calorífica en el área de trabajo.
- 4- Tipo de camisa de protección en la punta de trabajo.
- 5- Diámetro de los termoelectrodos.

Es importante que en la confección de la punta de trabajo se tenga un aislamiento eléctrico en los termoelectrodos a fin de que sólo halla contacto en la unión que se confeccione.

Por último, en la confección de las líneas de extensión para los termopares, el recubrimiento constituye un elemento importante a cubrir, ya que éste proporciona tanto protección mecánica como térmica cuando se trabaja en ambientes a elevada temperatura (baja temperatura para otros casos). Como medios de recubrimiento que se disponen comercialmente, se encuentran el teflón, acero inoxidable, cerámicos y de asbesto. Cada uno de estos tipos tienen diferentes presentaciones como son rígidos , flexibles y retráctiles (tipo telefonó).

El detalle de las terminales queda a preferencia de los requerimientos del usuario ya que se cuenta con una gran variedad, los hay desde los conocidos de conexión rápida hasta

los de, conexión mecánica ó de presión (fig. 26). Las conexiones pueden o no ser del mismo material de construcción que los termoelectrodos, en este caso llevan el mismo código de clasificación que el tipo de termopar al que corresponde, la función de las conexiones es el de asegurar una buena conductividad de la señal sin producir falsos contactos. Su empleo se dispone a igual criterio de uso en los cables de extensión.

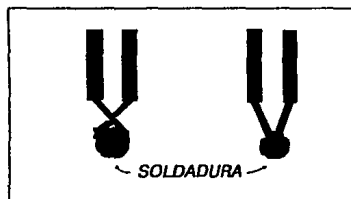


FIG. 22 CONFECCION DE UNIONES DE TRABAJO.²¹

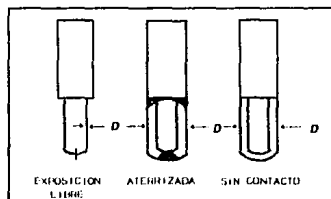


FIG. 23 ACOPLAMIENTO DE UNIONES DE TRABAJO EN CAMISAS.²²

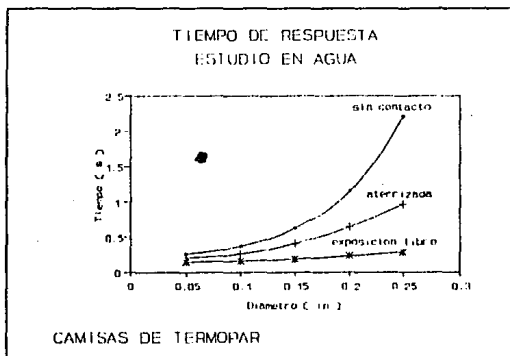


FIG. 24 TIEMPO DE RESPUESTA VS DIÁMETRO DE TERMOELECTRODO.²³

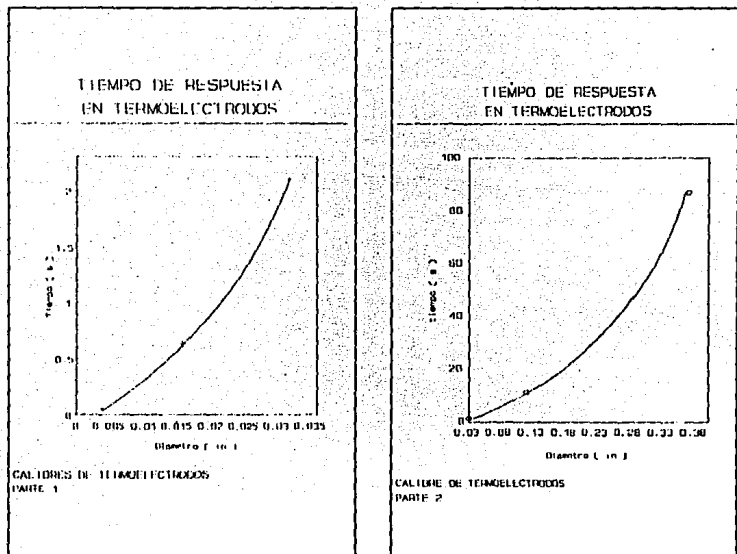


FIG. 25 TIEMPOS DE RESPUESTA EN CALIBRES DE TERMOELECTRODOS¹⁸

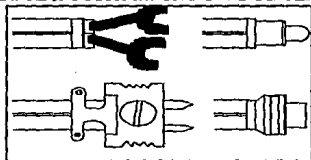


FIG. 26 TIPOS DE CONECTORES Y/O TERMINALES PARA TERMOPARES²⁷

**CUADRO 12 TERMOCLECTRODOS
COMERCIALES^{16,17}**

CALIBRE AWG	DIÁMETRO (mm)
30	0.010
28	0.012
24	0.020
20	0.032
16	0.051
14	0.064
12	0.081
10	0.102
8	0.128
6	0.162
4	0.204
—	*0.001
—	*0.002
—	*0.003
—	*0.005

**CUADRO 13 CAMISAS DE TERMOVAR
COMERCIALES^{18,27}**

DIÁMETRO EXTERNO (IN)	DIÁMETRO INTERNO (IN)
1/16	0.052
1/8	0.070
3/16	0.132
1/4	0.194
3/8	0.320
7/16	0.370
1/2	0.430
*0.012	0.008

* ESPECIALES

** INMERSIÓN

AWG AMERICAN

WIRE GAUGE

**CUADRO 14 LONGITUD DE CAMISAS
EN TERMOVARES^{16,17}**

LONGITUD (IN)
2 1/2
4
5 1/2
6
**12
**16
**17 1/2
**18
**24
**30
**36

1.10.10. RECOMENDACIONES DE USO EN TERMOPARES

Las sugerencias de uso y desventajas para los diferentes tipos de puntas de trabajo presentados en la figura 23 son los siguientes:

a) La unión de exposición, se recomienda emplear en la medición de temperatura para gases no corrosivos estáticos o en flujo, donde una respuesta rápida es requerida (fig. 24). La cubierta es aislada y sellada, en la parte donde la unión sale de la camisa de protección para prevenir la penetración de humedad, gases o polvos, los cuales pueden dañar el material de los termoelectrodos. La desventaja en el uso de este tipo de punta de trabajo, es la elevada fragilidad, ya que se puede producir fácilmente alguna ruptura, rápida oxidación, engrasamiento de la unión por algún manejo mecánico brusco o inadecuado, por otro lado la gran ventaja, además de su rápida respuesta, es que se pueden realizar chequeos rápidos para verificar el buen estado de los termoelectrodos y poder realizar el reemplazo si se requiere.

b) Es recomendable para mediciones de temperatura en fluidos y/o gases estáticos o en flujo, medios oxidantes y/o reductores y para aplicación a elevadas presiones, su tiempo de respuesta es muy aceptable (fig. 24), su gran desventaja radica en de no ser posible realizar un chequeo periódico o reemplazo de los termoelectrodos, dado que se encuentra soldado a la camisa, por lo que en su descompostura se debe realizar un cambio total de la unidad (termo-electrodos y armadura).

c) Es recomendable para mediciones en ambientes corrosivos, altas presiones y elevadas temperaturas, la gran ventaja en este tipo de termopar, es el ser posible llevar acabo un chequeo del estado en el que se encuentran los termoelectrodos y si es posible realizar un reemplazo en muy poco tiempo sin necesidad de eliminar la camisa de protección. Su principal desventaja es que su tiempo de respuesta se vuelve considerablemente grande (ver fig. 24).

1.4. OTROS METODOS EN LA DETECCION DE TEMPERATURA^{10,11}

De un tiempo a la fecha una mayor cantidad de consumidores, exigen productos con aceptables características organolépticas, elevado valor nutricional, imagen saludable y principalmente una elevada seguridad de consumo en alimentos perecederos, principalmente, con un mínimo o ningún tipo de aditivo en su elaboración. Alrededor de esto, los objetivos aparentemente incompatibles de vida útil más prolongada y procesamiento mínimo en productos perecederos, requieren de la optimización de toda la producción y efectivos parámetros de conservación, para así lograr alta calidad con la mínima degradación del alimento hasta que sea consumido.

Sin embargo, ha llegado a ser ampliamente enfatizado que uno de los eslabones más débiles, en la cadena de conservación de alimentos perecederos, ha sido la fase posterior al procesamiento, y esto, principalmente, debido a la falta de control en las temperaturas de transporte, almacenamiento y venta. Para ello una gran variedad de indicadores de temperatura han sido desarrollados como una herramienta en los sistemas de control y monitoreo en la vida de anaquel de productos durante su almacenamiento, distribución y venta.

El principio de operación de los indicadores de temperatura, no es propiamente el de un termómetro convencional, su mecanismo de detección corresponde a factores mecánicos, químicos o enzimáticos irreversibles (en una gran mayoría), expresado como un respuesta visual presentada en una especie de etiqueta o marbete que se adhiere a los productos, y así, las lecturas obtenidas proporcionan información de las condiciones de almacenamiento y distribución. La eficacia en la confiabilidad de estos sistemas depende de su instalación inmediata después del procesamiento del producto, y mantenerse ahí hasta llegar al consumidor, el dispositivo utilizado debe ser económico si se desea colocar dentro o en cada uno de los productos, pero si el costo es un problema, algunos de ellos pueden monitorear la temperatura colocándose en lugares estratégicos de una estiba, camión o espacio refrigerado de exhibición y venta.

Una gran variedad de dispositivos en cuanto detección de temperatura y tiempo, han sido desarrollados, algunos de ellos reaccionan cuando se ha rebasado la temperatura de control, mientras que los otros reaccionan en una combinación de las variables temperatura-tiempo para control de tiempo en la vida de anaquel que le queda al producto, finalmente ciertos dispositivos registran la temperatura a intervalos específicos de tiempo. Por lo tanto, los indicadores para alimentos congelados pueden ser agrupados en cuatro grandes categorías:

- a) indicadores de temperatura.
- b) indicadores de temperatura-tiempo.
- c) indicadores que integran temperatura-tiempo.
- d) aquellos que registran temperatura-tiempo.

Las principales desventajas de estos dispositivos son:

- costos
- la mayoría no son reutilizables
- en un lote el control de temperatura es representativo
- su sensibilidad depende de intervalos de temperatura
- solo responden a temperaturas y tiempos específicos
- su manejo es delicado antes de su activación
- pueden provocar una idea falsa de deterioro en el producto
- es necesario el chequeo directo en el lugar de uso

1.4.1 INDICADORES DE TEMPERATURA^{9,10,19}

Estos indicadores responden con cambios de color cuando una temperatura preseleccionada a sido alcanzada o rebasada, la temperatura fijada puede ser cualquiera que uno desee, el cambio de color puede provocarse inmediatamente ó después de que la temperatura del dispositivo esta por arriba de la temperatura de respuesta por un período de tiempo. Un primer tipo de estos dispositivos consiste en la encapsulación de dos soluciones incoloras, separadas por una capa congelada de un elemento acuoso, el cual si se descongelaba permitía la interacción de las dos soluciones formando un precipitado (Nicol 1960).

Actualmente los indicadores de temperatura disponibles para alimentos congelados, son aquellos dispositivos hechos de un material llamado líquido termocrómico (TCL), este dispositivo tiene la característica de cambiar a varios colores reversiblemente, puede ser negro a -15°C , rojo a -10°C , verde a -5°C y azules a -2°C . La desventaja en este dispositivo es que se debe checar a intervalos frecuentes de tiempo, ya que no se sabe cuanto tiempo se expuso el producto a cierta temperatura, por lo mismo su empleo se limita cuando se tiene un bajo volumen del producto, como es el caso de los gabinetes de venta, así mismo, su empleo debe excluirse de los canales de distribución debido a que la velocidad de deterioro en la calidad del producto alimenticio difiere de las variaciones en la temperatura.

1.4.2 INDICADORES TEMPERATURA - TIEMPO^{9,10,11}

Este tipo de dispositivo se basa en el cambio gradual de color de una mezcla, provocada por una reacción química, hasta llegar a un punto en el cual el cambio de color se produce completamente, esta reacción se da por combinación de dos sustancias en función a las variables temperatura-tiempo, es por esto que en su fabricación para empleo en alimentos refrigerados, ha de tenerse una velocidad de reacción en el cambio de color, paralela a la velocidad de pérdida de calidad en el producto alimenticio. Los primeros dispositivos de este tipo, consistían en sistemas químicos contenidos en una membrana permeable al oxígeno (Rainstad y Volz 1950 - 1972) conforme el oxígeno se permeaba a través de la membrana al sistema de reacción, iba cambiando el color del sistema, la velocidad de oxidación del sistema químico dependía de la temperatura y era preparado de tal forma que fuera análogo al deterioro de la calidad del producto refrigerado.

Actualmente el único integrador de temperatura-tiempo disponible comercialmente, se basa en un proceso bioquímico, este sistema se constituye de una solución de enzimas con un indicador líquido de pH que es mezclado con una solución de sustrato. El dispositivo produce un cambio de color causado por un decremento en el pH, resultado de una hidrólisis enzimática de lípidos, dicha reacción, presenta el modelo de cinética de Arrhenius ($\ln k$ vs

1/T); antes de su activación, el indicador consiste de dos compartimientos separados en forma de dos minisacos de plástico, un compartimiento se contiene a una enzima lipolítica (lipasa pancreática), y el otro al lípido como sustrato e indicador de pH. El dispositivo es activado cuando se rompe la barrera que separa los compartimientos por acción mecánica.

Los colores que presenta este dispositivo están impresos alrededor de la ventana de reacción, lo cual permite la comparación y rápida visualización en el reconocimiento del estado en que se encuentra el producto, los colores encontrados en el dispositivo son los siguientes:

CUADRO 15 INTERPRETACIÓN DE COLORES PRODUCIDOS EN UN INDICADOR TEMPERATURA-TIEMPO^{7,10,15}

NUMERO	COLOR	REPRESENTACIÓN
0	VERDE	-INDICA QUE EL DISPOSITIVO A SIDO ACTIVADO (REPRESENTA EXCELENTE CALIDAD)
1	AMARILLO	-INDICA QUE EL 80% DE LA TOLERANCIA T-t HAN SIDO UTILIZADAS (REPRESENTA BUENA CALIDAD)
2	NARANJA	-INDICA QUE LA TOLERANCIA T-t YA HA SIDO UTILIZADA (REPRESENTA CALIDAD DUDOSA)
3	ROJO	-INDICA QUE EL 130% DE LA TOLERANCIA T-t YA HA SIDO UTILIZADA (REPRESENTA SOBRE EXPOSICION)

1.4.3 INDICADORES QUE INTEGRAN TEMPERATURA Y TIEMPO^{8,10,19,20}

Este tipo de dispositivos indican el tiempo de vida útil disponible de un producto, probablemente, estos dispositivos son los más prometedores, porque proporcionan una cantidad considerable de información a partir del momento en el cual han sido activados y hasta que su capacidad total ha sido consumida. Los dispositivos se diseñan para responder a una temperatura específica, y la magnitud de la respuesta será proporcional al período de tiempo en el que ha sido rebasada la temperatura de control.

Un primer tipo de indicador consiste en una sustancia química migratoria coloreada, que fluye a lo largo de una esponja o material poroso debido a una exposición del producto por arriba de la temperatura de respuesta del dispositivo, el material coloreado fluye a una velocidad determinada, de manera que el control se efectúa por la distancia de avance de la línea azul en el material poroso, el avance de difusión de la sustancia puede ser observado a través de ventanas a lo largo del indicador o por una escala apropiada. Debe tenerse en cuenta que la velocidad de difusión se incrementa conforme aumenta la temperatura del producto. Los tipos de químicos utilizados son esterres de ácidos grasos y ftalatos, mezclados con tinta azul, variando el tipo y concentración de estos se pueden seleccionar diferentes temperaturas de difusión y vidas de respuesta, por lo que estos indicadores pueden ser utilizados como integradores de temperatura-tiempo críticos en diversos productos, donde las temperaturas críticas son iguales a la temperatura de fusión del ester.

Antes de su uso la esponja es separada de la solución por una película que actúa como barrera, para iniciar la activación, se instala el indicador pegado al producto en el lugar de interés, entonces se remueve la barrera, la difusión del líquido coloreado integra el tiempo por arriba de la temperatura de respuesta, debido a que la posición del líquido coloreado, indica el tiempo equivalente al cual el producto a estado por arriba de dicha temperatura, así, conociendo la tolerancia de tiempo temperatura del producto alimenticio, se puede determinar el tiempo de vida que le queda al producto desde que se inicia su distribución.

Otro tipo de indicador disponible comercialmente consiste en:

- 1) microcomputadora portátil con una banda óptica para leer la etiqueta del indicador
- 2) un indicador impreso en forma de etiqueta que contiene un polímero que cambia de color reversiblemente, como resultado de la acumulación de la temperatura de exposición.
- 3) un software para el análisis de datos diseñado para correlacionar las indicaciones de reflectancia de los colores del polímero.

La desventaja en el empleo de éste dispositivo es el costo del equipo a emplear.

1.4.4 REGISTRADORES TEMPERATURA - TIEMPO^{9,10,11}

Los registradores temperatura-tiempo actúan son dispositivos capturistas de datos que toman lecturas a intervalos específicos de tiempo, con este tipo de dispositivos es posible la obtención de cartas temperatura-tiempo (no extrapolables fuera de las condiciones evaluadas) en todo lo que constituye la cadena de frío de diversos productos, dichas cartas permiten la determinación de aquellas áreas o etapas en las cuales ocurren grandes pérdidas en la vida útil de los productos. La miniaturización de los componentes y el desarrollo de microcomputadores han sido una de las principales causas para este rápido progreso.

Los registradores son programados para registrar a diferentes intervalos de tiempo, las temperaturas obtenidas con sensores, la programación y activación de los registradores se lleva a cabo por la conexión a una computadora antes de su instalación, y los resultados se recopilan conectando nuevamente al dispositivo en la computadora que recobra los datos para su análisis y elaboración de cartas.

Los registradores son tan pequeños que su tamaño es cercano al de un hongo, disponen de una batería recargable, una banda o cinta (tipo tarjeta de crédito) que sirve de interfase, memoria y un sensor (disponible hasta 12 sensores). Una desventaja en el empleo de este dispositivo, además de su elevado costo, es que sólo puede llevarse a cabo el monitoreo de temperatura en forma puntual en una estiba u espacio refrigerado, de tal modo que se debe tener especial cuidado en su ubicación.

1.4.5 FIBRA ÓPTICA.^{25, 29, 34}

La combinación de la transmisión de luz por fibra óptica y la miniaturización de los sensores de silicón, han dado como resultado un nuevo desarrollo en la tecnología de la medición para la industria alimentaria, misma que puede ser empleada para medir temperatura, presión e índice de refracción. Entre los beneficios que ofrecen estos sensores a la industria de alimentos, se encuentran: que son intrínsecamente seguros inmunes a interferencias electromagnéticas y radio frecuencias, por lo tanto, mayor precisión en la medición de ambientes con elevado ruido eléctrico.

Debido a que el sensor no es metálico, tampoco es afectado en ambientes de microondas.

El uso de la modulación espectral, es la base de la tecnología sensora en la fibra óptica, la configuración típica del sensor consiste en la modulación de un luz fuente, fotodiodos, cable de fibra óptica y un sensor que usa una cavidad como elemento sensible.

El sensor de temperatura, es construido utilizando un material no metálico a manera de una película muy delgada, que presenta un elevado índice de deflexión y este a la vez un alto índice de refracción, lo cual asegura su rápida deflexión en función a los cambios de temperatura. El sensor constituye una capa de silicón flexible fig. 27, la detección de temperatura consiste en enviar una luz fuente de espectro conocido, la cual al reflejarse en la película de silicón que se encuentra flexionado a causa del parámetro que se esta midiendo, produce una desviación en el retorno de la luz fuente original, los pequeños cambios son detectados por los fotodiodos.

La gran ventaja del empleo de fibra óptica es el bajo mantenimiento y su gran versatilidad de adaptación a diferentes líneas de proceso.

Sus principales desventajas es que debe adaptarse en sistemas con alto contenido en agua, de lo contrario el elemento sensor se calienta a tal grado que llega a explotar.

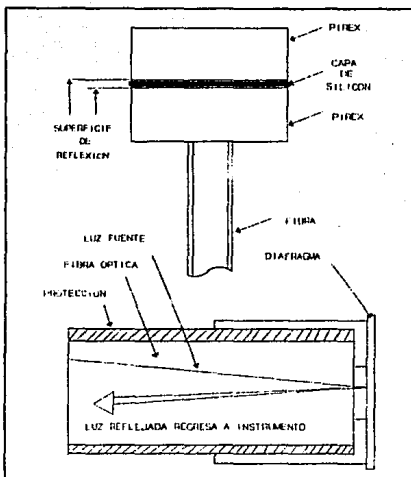


FIG. 27 ESQUEMA DE UN SENSOR DE TEMPERATURA EMPLEANDO FIBRA ÓPTICA¹⁴

1.4.6 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA POR RADIACIÓN.^{8, 22, 23}

En todos los instrumentos anteriormente citados para medir temperatura es necesario se mantenga en contacto el instrumento medidor con el cuerpo cuya temperatura se va a medir. Si el cuerpo esta muy caliente, el contacto del termómetro con el cuerpo lo pone en peligro de destrucción o de provocarle un daño irreparable. En este caso es necesario que se emplee un termómetro que logre adaptarse a condiciones tan severas de calentamiento, en dichas situaciones, se utilizan instrumentos que no requieren ser colocados en contacto

con el cuerpo o espacio a medir, además de que la distancia entre la fuente de medición y el instrumento no afectan la medición.

Estos instrumentos se denominan pirómetros y se basan en la termometría de radiación, donde la radiación térmica electromagnética emitida por un cuerpo es resultado de su temperatura, esta radiación se distingue de otros tipos de radiación electromagnética, como las ondas de radio y los rayos X, los cuales no se propagan como consecuencia de la propia temperatura.

Todos los cuerpos cuya temperatura es superior al cero absoluto irradian energía esta radiación depende de su temperatura, el cuerpo negro se considera como radiador térmico ideal, el cual absorbería por completo cualquier radiación térmica posible, sin embargo, en situaciones reales se construyen cuerpos físicos reales que se aproximen lo más que se pueda al cuerpo negro y de esta manera hacer analogías para determinar la temperatura del objeto de interés.

Hay dos distintos tipos de pirómetros:

- El pirómetro de radiación total (determinación de emitancia) y
- El pirómetro óptico.

El pirómetro de radiación total, como su nombre lo implica, acepta una muestra controlada de la radiación total y, a través del efecto de calentamiento de la muestra, obtiene una medida de la temperatura. A su vez, los pirómetros ópticos son de dos tipos: de flujo de electrones y monocromáticos. En el primero de ellos, la salida de un fotosensor indica la temperatura, en tanto que en el otro, se compara la intensidad espectral con un estándar calibrado.

En la práctica, el pirómetro óptico es el más usado de los métodos para medir la temperatura por radiación, ya que es relativamente barato y portátil y la determinación no depende demasiado de las propiedades de la superficie del material, aunque cabe señalar que este tipo de instrumentación no es muy empleado en el campo de la industria de alimentos, dado que son condiciones de manejo a elevadas temperaturas, donde se justifica su empleo.

1.4.7 MÉTODOS ESPECIALES PARA DETERMINAR TEMPERATURA.^{8,12,31}

1.4.7.1 TERMÓMETRO DE CRISTAL DE CUARZO

Un método nuevo y exacto para medir la temperatura se basa en la sensibilidad de la frecuencia resonante de un cristal de cuarzo a los cambios de temperatura. Cuando se utiliza el ángulo apropiado de corte con el cristal, existe una correspondencia lineal entre la frecuencia resonante y la temperatura. En los modelos comerciales del dispositivo se utilizan contadores electrónicos y pantallas digitales para medir la frecuencia. Para medir temperaturas absolutas, se mencionan sensibilidades utilizadas de 0.001°C para este dispositivo. Debido a que el proceso de medición se basa en la medición de la frecuencia, el dispositivo es particularmente insensible a la capacidad de ruido en el cable de conexión, o en el instrumento de detección de señal.

1.4.7.2 TERMOGRAFIA CON CRISTAL LIQUIDO

Los cristales colestéricos líquidos formados por ésteres de colesterol, tienen una respuesta interesante a la temperatura. En una gama reproducible de temperatura, el cristal líquido exhibe los colores del espectro visible. El fenómeno es reversible y repetible. Por la variación de la formación particular, se pueden hacer cristales colestéricos líquidos que operen a bajo de 0°C hasta varios cientos de grados Celsius. La escala de la temperatura del fenómeno, o temperatura a la cual cambia el color mostrado, puede variar de 1 a 50°C ; por lo tanto, los cristales líquidos permiten obtener indicaciones de temperaturas precisas mediante la observación de los cambios de color.

Con objeto de evitar el deterioro de los metales pueden revestirse con alcohol de polivinilo, produciendo cristales líquidos encapsulados que se fabrican en forma de un lodo con base de agua o prerrecubiertos con sustratos ennegrecidos de papel.

1.5 SELECCIÓN DE SISTEMAS PARA OBTENCIÓN DE DATOS.

1.5.1 SISTEMA GENERAL DE OBTENCIÓN DE DATOS¹⁴

Los elementos principales de cualquier sistema de proceso y adquisición de datos se muestran en el diagrama de bloques en la fig. 28 misma que presenta las tres partes principales. La primera es la etapa de entrada, la cual consta de transductores apropiados y un circuito de entrada, además de circuitos adicionales y el acondicionamiento de la señal como sea necesario (amplificadores, filtros, etc.). La segunda es la etapa de conversión de señal, en la cual, la información se prepara para transmisión, esto incluye las situaciones en que los transductores están lejos de donde se desean mostrar los datos, lo mismo que el equipo de transmisión, recepción y cuales quiera procesadores necesarios de datos; un ejemplo de esta última es la conversión de una señal de la forma analógica en digital.

Por último la etapa de salida con dos funciones primarias: mostrar y/o almacenar datos. En el instrumento medidor de temperatura que se desea construir, los principales elementos que integran el sistema de adquisición de datos consiste de las siguientes partes:

- Un termopar tipo T (A).
- Un amplificador operacional de instrumentación (A).
- Un convertidor analógico digital (B).
- Un visualizador ó "display" de cristal líquido (C).

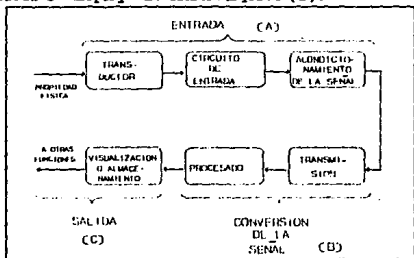


FIG. 28 DIAGRAMA GENERAL DE BLOQUES EN UN SISTEMA DE OBTENCIÓN DE DATOS¹⁴

1.5.2 ASPECTOS BÁSICOS DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES^{2,8,12}

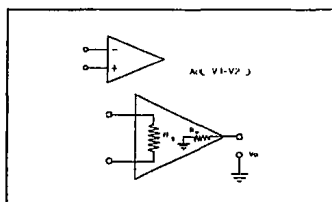
El amplificador operacional (amp-op) es probablemente el bloque más popular que se utiliza en la construcción de circuitos electrónicos. Este dispositivo es capaz de desempeñar innumerables funciones, en las cuales se incluyen operaciones de amplificación tanto lineales como no lineales, sobre señales eléctricas muy pequeñas. El amp-op se caracteriza por ser un amplificador de alta ganancia con dos terminales de entrada, una sola salida y un acoplamiento directo interno. Se presenta convencionalmente por el símbolo de la figura 29.

El voltaje de salida V_o es la diferencia de los voltajes de entrada aplicados a cada una de la terminales de entrada, multiplicada por la ganancia A_v del amplificador. Una señal positiva aplicada (+) a la terminal positiva (+), de entrada origina un cambio positivo en la salida, por esto la terminal (+) se conoce como entrada no inversora. Mientras que una señal positiva aplicada a la terminal negativa (-) de entrada produce un cambio negativo en la salida, de manera que la terminal (-) se llama entrada inversora.

Dependiendo del uso que se de en los dos diferentes tipos de entradas se forman dos tipos básicos principales de amplificadores: amplificador inversor y no inversor. Donde la ganancia de un circuito amplificador inversor es igual a la relación entre dos resistores y son independientes por completo del propio amplificador. La impedancia de entrada es R_1 y la impedancia de salida es cero. Por otro lado la ganancia de un amplificador no inversor está dada por la relación entre los dos resistores aumentando en uno, la impedancia de entrada es infinita y la de salida es cero (fig. 30.), lo anterior se puede traducir en que la reducción de ruido en el amplificador no es un problema serio. Una característica limitante que se tiene en ambos tipos de amplificadores, por el hecho de trabajar con resistores, es que no se puede modificar fácilmente la ganancia unitaria que logran con determinado resistor, para conseguirlo se tiene que cambiar el resistor cuantas veces se requiera para acoplarlo al valor deseado. Es por esto que en los amp-op clasificados como lineales, entre los diversos tipos que existen, se encuentran los que poseen una configuración que sobre pasan las limitaciones anteriores y que además se apoyan de otros amp-op

adicionales, estos se conocen como amplificadores de instrumentación, este tipo de amplificadores son muy utilizados en la mayoría de los instrumentos de medición debido a las ventajas que ofrecen:

- Ajuste de ganancia sin variar todos los resistores que integran el circuito.
- Alta impedancia de entrada y alto rechazo en modo común, esto favorece a reducir por cuenta propia los niveles de ruido que pudieran presentarse en alguna señal de entrada sin filtración previa.
- Son fácilmente adaptables a una gran cantidad de sistemas.
- No se constituye por elementos complejos.
- Son muy económicos.



R resistencias
V voltaje
A ganancia

FIG. 29 AMP-OP SIMPLE¹

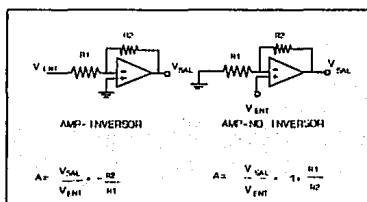


FIG. 30 AMP-OP INVERSOR Y NO INVERSOR¹

1.5.3 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES^{1,4}

En todas las situaciones físicas en las cuales se realizan mediciones o se transporta información siempre existe la presencia de ruido, el diseño y los procedimientos experimentales apropiados pueden reducir los efectos del ruido en muchas situaciones. Una ayuda importante para el investigador es cualquier conocimiento previo que pueda obtener respecto de los márgenes de frecuencia en los cuales existe la señal deseada a medir, para que se puedan distinguir de las señales producidas por ruido. Por ejemplo, si se miden

temperaturas atmosféricas, es razonable esperar que dichas temperaturas no cambien en pocos minutos, en consecuencia el voltaje de salida significativo de un termopar incluye sólo la parte de baja frecuencia, por lo tanto los componentes de alta frecuencia son ruido debido a las fluctuaciones provocadas en el medio ambiente.

Esta exposición conduce a un examen de la posibilidad de filtrar las señales eléctricas, éste término se refiere a que es preferible la creación de circuitos que transmitan o "pasen" sólo ciertas bandas o márgenes de frecuencia de una señal de entrada determinada. Las partes indeseables de la señal pueden caracterizarse como ruido, aunque debe de tomarse en cuenta, el hecho de que el ruido también puede estar presente en la banda de frecuencia de interés, por lo que el filtrado no siempre resuelve todos los problemas en la eliminación del ruido, sin embargo, si proporciona un grado significativo de mejora experimental.

Los filtros se componen de elementos como resistores y capacitores, en tanto que otros contienen elementos como amplificadores. Los circuitos compuestos del primer tipo se llaman **filtros pasivos**, en tanto que los segundos se denominan **filtros activos**.

1.5.4 CONVERSIÓN ANALÓGICO DIGITAL (A/D)^{1,2,13}

La " conversión A/D " es la transformación de señales analógicas en forma digital, las señales analógicas pueden tener la forma de voltajes o corrientes, en tanto que las señales digitales serán generalmente binarias, codificados en binario normal o en forma de dígitos. Actualmente estas conversiones analógico-digitales se incluyen frecuentemente en todo tipo de instrumentos de medición y control.

Los métodos más importantes de conversión A/D son los llamados:

- 1 Paralelos
- 2 Flash
- 3 Aproximaciones sucesivas
- 4 Integración o Rampa

La principal diferencia entre ellos es la capacidad que desarrollan en el procesamiento de información, por lo que el campo de empleo de cada uno ellos se encuentra muy bien definido, por ejemplo en el mercado de la baja velocidad está dominado por los convertidores integrativos, mientras que el procesamiento de vídeo, los sistemas de radar y televisión emplean casi exclusivamente convertidores paralelos, los tipos de aproximaciones sucesivas ocupan la zona intermedia. Es importante hacer notar, que en el empleo de los diferentes tipos de convertidores A/D, es posible trabajar con algunas combinaciones de ellos, no obstante, es prácticamente imposible que se pueden suplir entre sí. La primera razón para convertir señales de forma analógica en digital implica la inmunidad al ruido durante la transmisión, además, es más fácil ver eléctricamente la presencia o ausencia de un pulso, para discernir el valor preciso de una señal analógica en la presencia del ruido inducido a lo largo de la trayectoria de la transmisión, y por último, como ya se menciona, la velocidad de respuesta que proporcionan en el manejo de información.

1.5.5 FUENTE RECTIFICADORA¹⁷

En todo sistema eléctrico el elemento encargado de proporcionar la alimentación de un voltaje específico, mayor o menor, diferente a el voltaje de la toma normal de energía, es la fuente de alimentación, pero además, si la fuente de alimentación se encarga de cambiar el origen de la corriente alterna (CA), por corriente continua (CC), este recibe el nombre de fuente rectificadora.

El corazón de toda fuente rectificadora es el transformador, ya que este se encarga de disminuir el voltaje de la toma común (127 volts en CA) al voltaje requerido por el circuito.

La rectificación de corriente se logra con ayuda de varios componentes, entre ellos el acoplamiento del llamado circuito puente, el cual esta constituido por elementos denominados diodos, que tienen la característica de poseer polaridad, dicha característica sólo permite el paso de corriente de un sólo tipo (positiva ó negativa) en un sólo sentido en

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

cada línea, con lo que se logra hacer la separación, o rectificación, entre las etapas o crestas en el flujo de la corriente alterna positiva y negativa. Otro elemento importante en la fuente de rectificación son los capacitores; una vez que se logra la disminución de voltaje y se produce la separación de etapas en la corriente alterna (positivo - negativo) por el circuito puente, la participación de los capacitores consiste en cumplir con dos funciones esenciales; una como ya se ha mencionado es la disminución de ruido, la otra, más importante aún, es modular o compensar la ausencia de una etapa en las fluctuaciones de la corriente alterna para su conversión total en CC por medio de descargas, gráficamente dichas variaciones se apreciarían como se muestra en la figura 31.

De la última etapa de rectificación depende el buen funcionamiento de la instrumentación a manejar, ya que entre más constante sea el voltaje de alimentación, más bajos serán las fluctuaciones en el instrumento, es por esto que como etapa final de salida se tiene a otro elemento conocido como regulador de voltaje (fig. 31d), este se encarga de que la salida de voltaje después de los capacitores sea lo más constante posible, puliendo impurezas por así decirlo, de la etapa anterior.

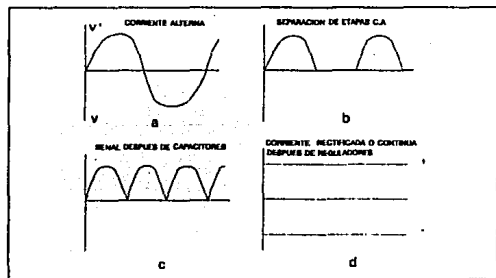


FIG. 31 ETAPAS DE RECTIFICACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA A CONTINUA.¹²

1.6 ASPECTOS DE VALIDACIÓN^{1, 4, 9, 10, 11}

La validación se describe como un estudio sistemático basado en evidencias documentadas con alto grado de aceptación, la cual ayuda a probar que los sistemas y/o procesos sean efectuados adecuadamente y constantemente trabajen según especificaciones, el concepto de validación es aplicado al desarrollo de cierta metodología que se emplea como guía en la comparación y/o evaluación referente a implementar, adaptar, modificar o crear la parte de procesos, instrumentos y sistemas; que son comparables cuando se tienen antecedentes de regirse por cierto comportamiento definido, de tal forma que se permite identificar y evaluar las desviaciones que se obtienen sobre el sistema. Por lo que una operación validada es aquella la cual ha sido probada, formalmente aprobada, y potencialmente reúne los requerimientos de especificación, atributos de calidad y lineamientos de realizarse según buenas prácticas de manufactura.

El proceso de validación se divide en tres categorías: validación prospectiva, validación concurrente y validación retrospectiva, donde cada una se diferencia dependiendo de la etapa en el desarrollo del proceso cuando se realiza.

-La validación prospectiva establece evidencia documentada con el propósito de que un sistema este basado en un protocolo preplaneado, se realiza durante la etapa de instalación, en la cual cada etapa del proceso a instalar fue estudiada previamente y ya se tienen identificadas las situaciones críticas, desarrollándose la evaluación durante la instalación y pruebas de arranque hasta la obtención de resultados favorables en su aceptación de la instalación.

La validación prospectiva consta de los siguientes pasos:

- 1.- calificación de sistemas y subsistemas
 - calificación de instalación
 - calificación operacional
 - calibración
- 2.- Elaboración de un protocolo de validación
- 3.- Ejecución del protocolo
- 4.- Análisis de resultados del reporte
- 5.- Aprobación del reporte y conclusiones

Con la calificación de la instalación se busca que los componentes:

- sean acorde a los especificados
- estén instalados en los lugares indicados, correctamente identificados
- cuenten con los procedimientos de operación, mantenimiento y calibración
- cuenten con los planos en donde se describe el sistema como fue construido

La calificación de la operación consiste en demostrar y documentar mediante pruebas experimentales que los componentes de los sistemas instalados cumplen con las especificaciones funcionales establecidas para ellos.

La calibración se tiene como la demostración de que un instrumento de medición reproduce resultados dentro de los límites de especificación generados por un instrumento estándar de referencia sobre un apropiado intervalo de medición.

En el reporte de validación usualmente se incluye una definición del sistema a ser validado identifica variables operacionales y parámetros de control.

La ejecución del protocolo consiste en demostrar la funcionalidad del sistema al integrar todos los componentes del mismo.

En el análisis de resultados se verifica que se cumpla con requisitos según las prácticas adecuadas de manufactura para poder ser aprobados por los responsables del proceso de validación incluyendo correcciones que se pudieron presentar.

-La validación concurrente establece evidencia documentada con el propósito de que un proceso este basado sobre información generada durante la implementación actual del proceso, se lleva a cabo durante la producción normal y los primeros lotes de una producción formal son monitoreados, la evaluación que se consigue se emplea en la estipulación de especificaciones para el control subsecuente del proceso.

-La validación retrospectiva establece evidencia documentada con el propósito de que un sistema este basado sobre la revisión y análisis de información histórica. El objetivo de realizar esta validación es demostrar que un proceso ha sido desarrollado satisfactoriamente y consistentemente a través del tiempo y promete seguir dando productos de buena calidad.

El protocolo que se desarrolla con la validación retrospectiva puede contener los siguientes lineamientos:

1. Reúne los valores numéricos del récord de un lote completo incluyendo resultados de pruebas en producto final, y datos de proceso.

2. Organiza esta información en secuencia cronológica, en acorde a los datos de manufactura del lote.
3. Incluye datos de los últimos 20 a 30 lote elaborados para análisis, si el número de lote elaborados es menos de 20, entonces incluir todos los lotes en el análisis.
4. Eliminar datos de pasos en el proceso no críticos y borrar la información numérica extra.
5. Someter a los datos resultantes a análisis estadístico y evaluación.
6. Sacar conclusiones del estado de control del proceso basados en los resultados obtenidos del análisis de la validación retrospectiva.
7. Realizar un reporte de sus resultados.

Por último, un concepto que también es manejado para justificar la estabilidad en el control de un proceso, es la revalidación.

-La revalidación es la repetición del proceso de validación o una porción específica de esta, las condiciones para realizar un estudio de revalidación y documentación son listados como sigue:

- cambios en un componente crítico (usualmente referido a materias primas)
- cambios o reemplazo en alguna pieza crítica del equipo modular
- cambios de locación
- significativo incremento o decremento en el tamaño del lote
- no se cumple con especificaciones en producto y proceso.

La validación en instrumentos de medición permite evaluar, indicar, aminorar, corregir y/o eliminar las posibles fuentes de error que por el instrumento se producen, de igual forma, permite conocer cuales son las principales fuentes que ocasionan incertidumbre en un sistema de medición experimental. Los tratamientos que se desarrollan en el proceso de validación de instrumentos de medición están referidos principalmente en estadísticos divididos en cinco pruebas identificadas como exactitud, precisión, linealidad, repetibilidad y reproducibilidad, los resultados que se consiguen de ellas, proporcionan la suficiente información que permite la creación de juicios para fortalecer la toma decisiones en una determinada situación experimental, de esta manera el investigador, al poseer un mayor conocimiento del sistema en estudio, puede actuar ante la falla, y conseguir dar la validez correspondiente a los resultados finalmente obtenidos.

La metodología que se genera para los diferentes tipos de sistemas experimentales no necesariamente es la misma, esta se debe adaptarse o modificarse a cada situación experimental, según las diferencias y necesidades que se requieran cubrir para control del sistema.

1.6.1 PRUEBAS DE EXACTITUD Y PRECISIÓN^{7, 8, 21, 22, 23}

Uno de los intereses generales que suele preocupar a todo experimentador que maneja instrumentación, consiste en llegar a conocer, cual sería el grado de exactitud en el que podría confiar para que los resultados obtenidos experimentalmente sean lo mas cercanos a una medición real, es muy claro que entre mayor confiabilidad se necesite mayor exactitud se deberá manejar la instrumentación.

La exactitud de un instrumento indica la desviación que se obtiene con la lectura de un parámetro respecto a un valor medio ideal o real, es muy común que el parámetro se cite como un porcentaje referido en la inexactitud de lectura ya sea respecto a la escala completa del instrumento, es decir, si un termómetro de 100°C presenta una inexactitud del 1%, puede ser interpretado como que el instrumento es inexacto dentro de un $\pm 1^\circ\text{C}$ en todo su intervalo de trabajo de la escala manejada por el termómetro, o bien, cuando en una lectura real de 10°C con un error de $\pm 1^\circ\text{C}$ representa el 10% de inexactitud esta será sólo respecto a la magnitud de la lectura obtenida, ya que esta inexactitud podría variar conforme se incremente o disminuya la escala en el instrumento.

Las dos formas que se tienen para expresar el nivel de exactitud dependen directamente del instrumento a emplear, de aquí la ventaja que hay en emplear unos u otros; no obstante la característica que se tiene en común para interpretar este parámetro, es que entre más se acerque el valor tomado al efectuar la medición, a un porcentaje de certeza del 100%, respecto a un valor particular en la escala del instrumento, la lectura resultará ser la más exacta, por lo tanto, la diferencia que no permite igualar el valor experimental a 100% del valor ideal o real, se interpreta como la inexactitud, error o desviación del instrumento. Por otro lado, la precisión de un instrumento, indica su capacidad para reproducir cierta lectura con una exactitud dada, se hace notar que la exactitud en todo instrumento de

medición, puede mejorarse por calibración, pero, no más allá de la precisión de un instrumento, con este antecedente se hace la observación que la precisión de un instrumento generalmente está sujeta a factores intrínsecos propios del instrumento, quedando en muchos casos fuera de el alcance del investigador, la posibilidad de mejorar la respuesta del instrumento, limitándose sólo a poderla evaluar posteriormente.

1.6.2 LINEARIDAD^{9,11,22,23}

Es muy común que en la práctica, cuando se trata de comprender un fenómeno de interés, se desee conocer la relación que existe entre las diversas variables que intervienen en dicho fenómeno y los cambios que estos producen, todo con el propósito de llegar a cuantificar cuales son los factores que mayor influencia presentan sobre dicho fenómeno, y finalmente poder efectuar un mejor control sobre un comportamiento determinado. Para el caso en el que en el sistema de estudio, se llegasen a presentar relaciones entre las variables que involucran a dicho sistema, y además responden a cambios proporcionales en cada una de las variables de principal interés, se pueden llegar a establecer cuantitativamente el tipo de correspondencia en dichas variables y determinar si se presentan variaciones del tipo lineal o no lineal.

Aplicando el caso a un instrumento de medición para definir el tipo de relación que presenta en su respuesta con la variable a evaluar, siempre se espera, que en el mejor de los casos, se presente una relación lineal entre la entrada y salida de la magnitud a medir, (cosa que no siempre es posible conseguir por completo dado la naturaleza del instrumento a emplear), sin embargo, las desviaciones respecto a una relación lineal ideal, denominadas tolerancias de linealidad, pueden ser evaluadas. En instrumentos comerciales a menudo se especifica la separación máxima respecto a la linealidad en la que podrán ser operados, es decir, especifican el intervalo en el que permiten obtener la mínima desviación a una función lineal ideal.

En la figura 32 y 33 se ilustran las dos formas en la que se especifica la linealidad, una refiere a la linealidad independiente y la otra refiere a la linealidad proporcional.

En la figura 32, donde se ilustra a la linealidad independiente, se especifica una confiabilidad del 2%, y se interpreta como que la salida en la respuesta, al medir una magnitud, se encuentra entre dos rectas paralelas con una separación entre ellas no mayor al $\pm 2\%$ en la salida de escala total a manejar por el instrumento, todo siempre con respecto a una recta ideal. Mientras que en la figura 33, se especifica una linealidad proporcional, también del $\pm 2\%$, en este caso significa que un valor cualquiera tomado en la práctica, no importando la sección de la escala en la que se trabaje, las lecturas registradas nunca estarán alejadas más del 2%, pero ahora con respecto a la magnitud que correspondería al valor real en el instrumento.

Se hace notar, que el instrumento que no posea o guarde una relación de linealidad definida no puede ser exacto, sin embargo, puede darse el caso de presentarse relaciones del tipo logarítmico entre otros, que sí pueden ser tratados y referidos a una relación lineal. La técnica estadística que permite obtener los modelos matemáticos que ayuden a describir en forma precisa que está sucediendo en un comportamiento determinado, es el análisis de regresión.

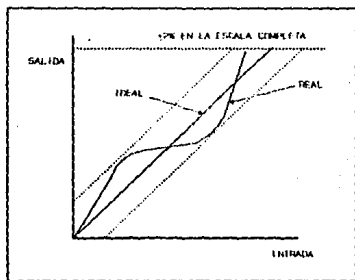


FIG. 32 LINEALIDAD INDEPENDIENTE²³.

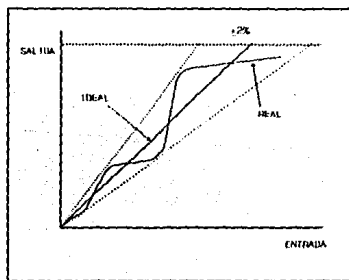


FIG. 33 LINEALIDAD PROPORCIONAL²³.

1.6.3 PRUEBA DE REPETIBILIDAD.^{11,18,22}

Si se usa un instrumento para medir una entrada idéntica de datos muchas veces por un tiempo definido o indeterminado, y la respuesta o salida no es la misma presentándose una dispersión o desviación en los datos obtenidos, esta desviación, a la obtención de un comportamiento constante esperado, se le conoce como error de repetibilidad y puede ser expresado en unidades absolutas o como fracción respecto a la escala completa, dicho comportamiento se ilustra en la figura 34. El que un instrumento sea repetible dependerá de factores tanto externos (medio ambiente, día, hora) como internos (principio de funcionamiento del instrumento, y tipos de accionamiento).

Por otro lado, cuando se llegan a presentar cambios por factores internos, generalmente es debido a que se trata de instrumentación con accionamientos del tipo analógicos, ya que los del tipo digital presentan fallas que son detectadas con mayor facilidad antes de poder ser utilizados.

Una prueba muy particular relacionada en asegurar la repetibilidad en un instrumento de medición, consiste en realizar la prueba con una duración igual o mayor, al tiempo que dure la experimentación a la cual será destinado su uso, no obstante, si se trata de procesos continuos se deben realizar pruebas con una duración de 24 horas o más, en estos casos la prueba realizada no se refiere a una prueba de repetibilidad sino a una de estabilidad en la respuesta del instrumento de medición.

1.6.4 REPRODUCIBILIDAD.⁴

La prueba de reproducibilidad se aplica principalmente cuando es necesario evaluar la respuesta de algún sistema experimental del cual prácticamente se desconoce su comportamiento, comparando la respuesta que se obtiene ya sea del sistema tradicional de trabajo, o por algún comportamiento que defina, o sirva de referencia al sistema en estudio. Con la comparación de respuesta se persigue principalmente determinar la eficacia y/o eficiencia del método, sistema o instrumento de prueba, directamente con el parámetro que es de interés medir, esperando que de alguna forma iguale, o en el mejor de los casos, supere al planteamiento original.

La comparación de métodos se lleva a cabo por diferentes procedimientos, los más apropiados se tienen con igualaciones matemáticas, o simplemente con la comparación estadística de respuesta, cuando se tiene definido el comportamiento dentro de un patrón establecido.

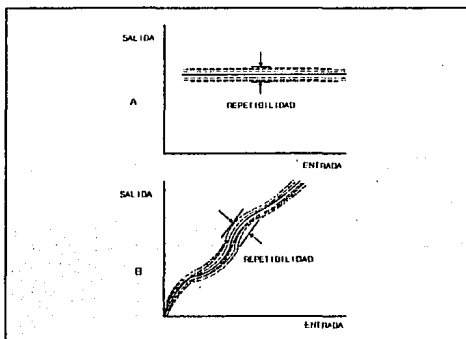


FIG. 34 ERROR DE REPETIBILIDAD²¹.

1.6.5 CALIBRACIÓN.^{5, 8, 16, 22, 23}

La calibración es un proceso mediante el cual se demuestra que un instrumento trabaja dentro de condiciones normalizadas, este proceso permite verificar al instrumento de medición en cualquier momento contra un patrón o estándar conocidos, y reducir, por lo tanto, los errores de exactitud.

Los procedimientos de calibración implican una comparación del instrumento particular con:

1) un patrón primario (implementación de un sistema en condiciones reproducibles y controlables).

2) un patrón secundario (instrumento de mayor exactitud que el empleado).

Para un termopar la calibración se tiene por:

a) comparación en respuesta en el voltaje de salida por medición de temperatura en un medio de condiciones conocidas, con las tablas estándar de la NBS.

b) comparándolo con la respuesta de un termopar de clase superior de platino, de exactitud conocida, en las mismas condiciones de trabajo.

c) comparando con termopar validado en un sistema de temperatura conocida.

La importancia de la calibración en instrumentos de medición no se deja de enfatizar, ya que el hecho de establecer por parte del fabricante un factor de exactitud, no conlleva a referirse a una exactitud idónea y permanente, ya que las condiciones de trabajo del fabricante en ocasiones son condiciones totalmente diferentes a las que pudiese manejar el investigador. Es por esto que se recomienda periódicamente, en instrumentos que lo permitan, efectuar periódicamente la calibración a manera de verificar si se siguen respetando las condiciones de exactitud especificados, y de esta manera asegurar la validez de las mediciones que se realizan.

Para diferenciar entre el proceso de calibración y validación, se indica que la calibración es una fase de ajuste o corrección física que se efectúa directamente en el instrumento de medición, para asignar un comportamiento o patrón definido. El proceso de validación por su parte se encarga de ajustar, identificar o corregir, por medio de tratamientos matemáticos un comportamiento ya definido.

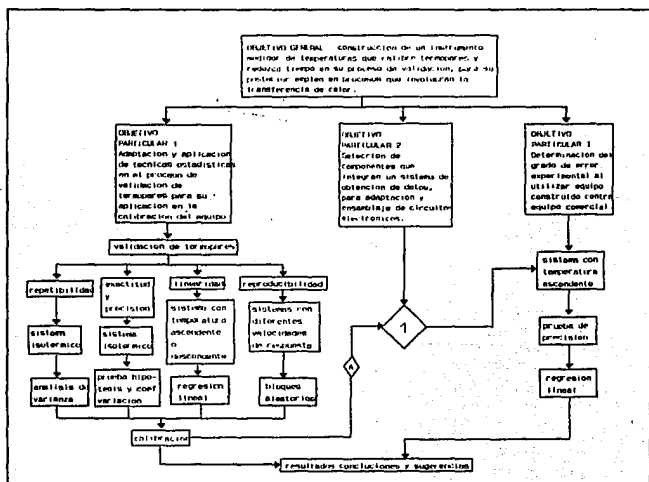
Es importante hacer notar que el método de calibración correspondiente a cada una de las diferentes categorías de instrumentos, no debe ser forzosamente el mismo, ya que el método a emplear depende directamente del origen para el cual se destina el empleo del instrumento, por lo que es preferible efectuar la calibración del instrumento en un sistema cuyas características son semejantes a las condiciones del sistema de trabajo en el que será empleado.

CAPITULO II
METODOLOGIA DE CONSTRUCCION PARA
INSTRUMENTO

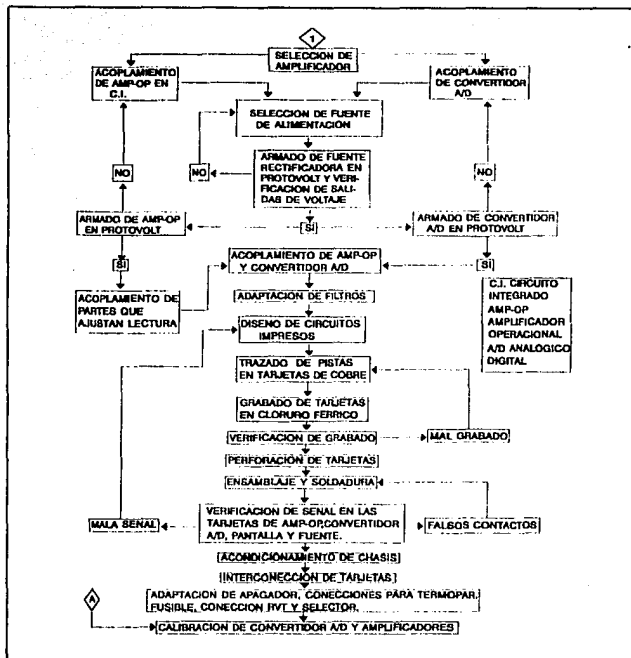
CAPITULO II

En el presente capítulo se describe la metodología a emplear para desarrollo de pruebas y construcción de equipo, según se plantea en el cuadro metodológico

2.1 CUADRO METODOLOGICO



2.1.1 CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO



2.2 VALIDACIÓN DE TERMOPARES

En aplicación de las técnicas de validación con termopares, la formación de juicios esta encaminada a efectuar la selección de un termopar que posea las mejores características de trabajo de un grupo determinado, ya que con la obtención de este, se puede hacer referencia a el todas las lecturas obtenidas por resto del grupo de termopares, de esta manera se consigue referir la experimentación hacia el error en cada uno de los eventos experimentales a desarrollar. Al termopar a seleccionar se le denomina termopar patrón y con el se permite evaluar el efecto de los tratamientos en el proceso de transferencia térmica al unificar o eliminar el error en los instrumentos de medición.

La selección del termopar patrón, se lleva acabo por la suma de atributos que se consigue con la aplicación de las pruebas, de tal forma que se asigna una escala numérica, dependiendo del numero disponible de termopares, y de cada prueba aplicada se asigna el valor más alto al termopar que mejores resultados presente, de esta forma el termopar que sea más exacto, preciso, lineal, reproducible y repetible, le corresponderá el puntaje más alto de la escala elegida y se tomara como patrón.

No es necesario se apliquen toda las pruebas de validación, ya que estas se seleccionan en base al juicio y necesidades del investigador, sin embargo, en la aplicación con termopares, se recomienda que en toda serie de pruebas a realizar, se emplee la prueba de exactitud antes que ninguna otra, esto con objeto de realizar la calibración pertinente del instrumento receptor de señal (Indicador) de tal forma que en las pruebas subsecuentes se disminuya el error, no se creen confusiones o se compliquen los cálculos en los tratamientos.

2.2.1 EXACTITUD Y PRECISIÓN

La aplicación de las dos técnicas en la validación de termopares, se llevan acabo con apoyo a técnicas estadísticas que corresponden a la prueba de hipótesis en el conocimiento

de exactitud, y la prueba de coeficiente de variación en el conocimiento de precisión. Al trabajar con termopares debe tenerse siempre cuidado de emplear los termopares acorde con la instrumentación para la cual fueron calibrados, ya que de otra manera se tendrán resultados erróneos en la prueba aun teniendo en perfectas condiciones al equipo y desarrollando la prueba correctamente.

El desarrollo experimental de las pruebas consiste, en introducir a los termopares de interés, en un sistema isotérmico de temperatura conocida, donde se registran las lecturas de temperatura a intervalos iguales de tiempo hasta completar un mínimo de diez lecturas, posteriormente se llevan a cabo los análisis ya indicados. Para seleccionar el termopar más exacto con el resultado de la prueba de hipótesis, en primer lugar las lecturas del termopar no deben ser significativas, es decir, deben quedar en la zona de aceptación según la distribución T o Z ; si todos los termopares caen dentro de la zona, el termopar más exacto será aquel que se acerque más al valor central de la zona de aceptación, o bien el que se acerque más al valor cero. De forma similar, se selecciona al termopar de mayor precisión quien resulte con el menor porcentaje de diferencia en el resultado de la prueba de coeficiente de variación.

2.2.2 LINEARIDAD

La prueba de linealidad se realiza en termopares para verificar que el tipo de termopar e instrumentación a emplear, guarde una relación lineal, sobre el intervalo de temperaturas del sistema de trabajo donde se desea trabajar, con lo cual se asegura que las variaciones de temperatura realmente sean producidas por sistema de experimentación.

Para desarrollar la prueba y seleccionar al termopar que mejor linealidad presente de un grupo determinado, se llevan a cabo los siguientes pasos:

- 1) Se introducen los termopares en un sistema de temperatura inicial conocida, y ya sea que esta se incremente o disminuya, se registran las lecturas de cada termopar en intervalos iguales de tiempo.

2) la prueba finaliza hasta llegar a una temperatura final predeterminada, la cual debe cubrir con los intervalos de temperatura que se requieren en el sistema experimental de principal interés.

3) Con las lecturas obtenidas del sistema experimental, en la prueba de correlación se toma como variable dependiente a la temperatura y como variable independiente al tiempo

4) El termopar que presenta mayor linealidad, será aquel que cumpla principalmente con la menor dispersión de datos, es decir deberá cumplir con una correlación lo más cercana al valor de uno, y por lo tanto un coeficiente de determinación lo más cercano a 100%; las pendientes entre las curvas no deben de cambiar drásticamente, es decir, deben de aproximarse a un valor que determina su comportamiento. La ordenada al origen no es determinante, sin embargo en el mejor de los casos se espera sea el mismo o el más cercano al valor de la temperatura con la cual se dio inicio la prueba.

2.2.3 REPETIBILIDAD

En termopares, la principal causa por la que se presenta este tipo de problema, es debido a la falta del sistema que mantenga a la unión de referencia en una temperatura constante conocida, estando expuesta a variaciones según las condiciones ambientales. Otros factores, aunque en menor proporción, favorecen a la aparición de este tipo de error, son cuando la toma de lecturas se realiza por diferentes operadores, cuando se realiza la experimentación en días diferentes (cambio de condiciones ambientales en la temperatura), y cambio de las condiciones en el sistema de trabajo.

Para determinar si existe o no un error de repetibilidad, el análisis de varianza es el que mejor apoyo proporciona para dar a conocer las posibles variaciones. En la aplicación de dicha técnica es necesario se cuente con un medio isotérmico, donde el tiempo en la toma de datos entre lectura y lectura sea lo más largo posible, siendo recomendable entre 5 y 10 minutos.

El tiempo que dure la prueba puede variar, si se tiene la seguridad de contar con un

Instrumento de buena estabilidad, se aconseja realizar la prueba con la obtención de un máximo de 10 lecturas, por el contrario si se tiene un instrumento con una estabilidad dudosa, se recomienda la obtención de cuando menos 15 lecturas.

2.2.4 REPRODUCIBILIDAD

Como ya se ha visto anteriormente, los diferentes tipos de termopares responden a un comportamiento muy particular en su respuesta voltaje-temperatura, dichos comportamientos no son similares, y en tal caso la instrumentación que se maneja deberá ser para empleo exclusivo en cada tipo de termopar. El concepto de repetibilidad, empleando el mismo caso, se refiere a saber si la instrumentación utilizada para registro de temperaturas en un termopar tipo T, es también útil para reproducir las respuestas generadas por algún otro tipo de termopar, no importando que sólo fuera en un intervalo corto de temperaturas.

La prueba se realiza cuando se requiere comparar la respuesta entre uno y otro tipo de termopares, o cuando en un mismo tipo de termopar se requiere comparar su velocidad de respuesta con distintos medios, o bien determinar la respuesta de un tipo de termopar en sus diferentes presentaciones de trabajo, el análisis estadístico que apoya al desarrollo de la prueba de reproducibilidad puede ser el análisis de varianza, aunque uno más completo sería el análisis de bloques aleatorios, si se realiza la prueba queriéndose determinar la influencia del operador, el día u otros factores.

La prueba se realiza con la toma de lecturas ya sea en un sistema isotérmico, o en un sistema de temperatura ascendente o descendente bajo el mismo seguimiento de las pruebas de exactitud o linealidad respectivamente, empleando de igual forma los sistemas en las condiciones ahí descritos.

El procedimiento que se aplica en la calibración del instrumento de medición a construir, será por reproducción de sistemas en condiciones isotérmicas de temperaturas conocidas, como son el punto de congelación y punto de ebullición del agua, para lograr mantener los sistemas indicados, se emplea agua destilada (desmineralizada) en la

reproducción del punto de ebullición, y el punto de fusión en recipientes lo mejor aislados posible.

En la reproducción del punto de ebullición es importante tomar en cuenta la presión atmosférica de la localidad, de este modo no se depende de un segundo termómetro para verificar la temperatura del sistema.

2.2.5 ETAPA FINAL EN EL PROCESO DE VALIDACIÓN CON TERMOPARES

Una vez que se efectuaron las pruebas necesarias para seleccionar al termopar patrón, se continua con otro análisis de linealidad. El análisis de linealidad permite correlacionar de forma directa la respuesta de un conjunto de termopares, con respecto a la respuesta del termopar referido como patrón con el objeto de predecir el comportamiento de cada termopar, del conjunto a manejar, como si se tratase del propio termopar patrón, en pocas palabras, se estará considerando como si se trabajara con un sólo termopar, para llevar a cabo dicha relación se cumple con los siguientes pasos:

Con el apoyo del análisis de linealidad se toman las lecturas del termopar patrón a manera de variable dependiente, y a los valores del resto de los termopares como variables independientes, se espera obtener las diferentes ecuaciones del termopar patrón en función de cada uno del resto de los otros termopares,

La ecuación particular que se obtiene para cada termopar, presenta la siguiente forma lineal:

$$T_c = T_p = \alpha T_n + B$$

donde:

$T_c = T_p$, corresponde a la temperatura corregida referida al termopar patrón.

α = factor de proporcionalidad.

T_n , = temperatura n obtenida por otro termopar sin corregir.

B = ordenada al origen de cada relación obtenida.

Debe de tenerse bien claro que las ecuaciones obtenidas en cada relación termopar

patrón vs termopar X son sólo aplicables para los propios termopares que le dieron origen, así como los instrumentos con los que fueron obtenidos los datos.

También se podría contar con emplear el análisis de regresión, en los casos de no tenerse la posibilidad de realizar una calibración de la instrumentación, teniéndose en consecuencia, lecturas que no coincidan con la situación real del sistema que se este evaluando, aun teniéndose a los termopares en perfecto estado. Sin embargo, con el análisis de regresión, es posible también obtener una relación entre la lectura del termopar patrón y los valores del comportamiento térmico en el sistema lo más cercanos a la realidad.

Para la obtención de las mencionadas correcciones, es necesario realizar un prueba de linealidad donde se relacione a la temperatura real del sistema como variable dependiente, y la temperatura registrada con el termopar patrón como variable independiente.

2.3 CONSTRUCCIÓN DE INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

La primera etapa de construcción en el instrumento detector de temperaturas se tiene con la selección de las partes que conformarán el sistema de medición. Los elementos principales lo constituyen tres partes esenciales (amplificador, convertidor analógico digital y fuente de alimentación) donde cada una de ellas estarán interrelacionados con las características de funcionamiento de los termopares.

La primer elección que se debe realizar es con el fin elegir al amplificador que se encargara de recibir y amplificar la señal que produce el termopar, las características a cubrir deberán ser en base a la relación de amplificación lineal para el voltaje de entrada producidos por el termopar en el intervalo de temperaturas para el que será empleado.

Con la selección del amplificador se continua con la definición del circuito integrado que se adapte a las características que se planteen con el amplificador, con este paso se marca la pauta para definir las características eléctricas y funcionales del resto de las tarjetas.

Se continúa con la elección del convertidor analógico digital que se encargara de traducir la señal de salida analógica enviada por el amplificador a un visualizador de datos en su forma digital para registro de lecturas por el operador. Para la elección se tomara en cuenta la señal de entrada enviada por el amplificador y la señal digital de salida a cubrir acorde al intervalo de temperatura de los sistemas en los cuales se empleara el instrumento, de tal forma que cubra completamente la escala en las temperaturas de trabajo.

Al definirse las características de las dos piezas anteriores se puede definir el tipo de fuente de alimentación requerida para suministro de energía de los componentes en el sistema.

Ya obtenidas las características a desarrollar por las piezas se procede con los ensayos en la construcción del instrumento, es decir antes de la construcción formal de tarjetas se deberán hacer pruebas para verificar si cada tarjeta se adaptara a los planteamientos teóricos hechos en la selección de piezas, además de tenerse la posibilidad de realizar modificaciones que mejoren a dichos planteamientos.

Para la realización de pruebas con piezas electrónicas, se emplean tabletas de conexión rápida llamadas protovolts. Los protovolts consisten en tabletas con orificios que permiten un acoplamiento rápido de componentes de cada uno de los elementos que integran una tarjeta, introduciendo a presión sus patas o puntas de conexión, permitiendo tantas veces se requiera la fácil conexión o desconexión de piezas sin dañar los componentes y sin líos de soldar o crear tarjetas innecesarias.

Las conexiones de prueba se realizaran por separado para cada tarjeta de tal forma que cuando se tenga la seguridad de obtenerse el mejor funcionamiento de cada parte, se procederá a el acoplamiento global, en esta parte se tendrá la posibilidad de verificar el funcionamiento entre las tres partes de tal forma que se puedan hacer las últimas adaptaciones para mejoramiento de señal.

Ya obtenida la adaptación de los sistemas se continúa con el grabado de pistas para la construcción formal de tarjetas, para esto previamente se realizara el diseño de los circuitos con pistas que permitirán el acoplamiento fijo de piezas ya con tarjetas en forma y el circuito impreso (2.3.1).

Una vez hecho el mejor bosquejo en el trazo de líneas, se elaboraran las tarjetas en tabletas de acrílico, en el tamaño requerido y se procederá a efectuar el grabado o elaboración de circuito impreso (2.3.2).

Para el ensamble de piezas en las tarjetas, ya grabadas las tarjetas con el circuito impreso, será necesario hacer las perforaciones sobre el circuito impreso en donde irán montadas cada una de las piezas.

Las piezas como resistencias, capacitores, cables, diodos, se podrán soldar directamente en la tarjeta. En el acoplamiento de los circuitos integrados, se soldaran primero bases con el mismo número de patas correspondientes al tamaño del circuito con el fin de evitar el daño de estas piezas por efecto del calor.

Para fijar las piezas primero se introducen las patas en sus orificios correspondientes, hasta la altura que se considere sea la mas correcta considerando no ocupar espacio innecesario, se sueldan las piezas procurando sea la aplicación de calor por corto tiempo, con lo que se evita levantar pistas y dañar piezas por la aplicación prolongada de calor, también se debe procurar emplear el mínimo de soldadura y pasta para facilitar la extracción de piezas en caso de inserción equivocada, y evitar la unión (puenteo) de líneas. Después de terminar con la soldadura de todas las piezas de una tarjeta, se cortan los hilos restantes de las patas lo más al ras de la tarjeta posible, por último se retiran los residuos de pasta empleando solvente o bien agua y jabón.

Una vez montadas las piezas se prueba cada tarjeta para verificar que existe señal de forma similar que en el período de prueba, con lo que se estará verificando que existirá buena respuesta del circuito.

Por último una vez ensambladas totalmente cada una de las tarjeta se procede a efectuar el acoplamiento general, lo cual consiste del acoplamiento tanto del chasis como de la interconexión de tarjetas.

Primeramente se selecciona el tipo y tamaño de chasis a emplear, se continua con las perforaciones u adaptaciones necesarias para la fijación de piezas y se realiza la adaptación de servicios que contribuyen a la presentación del instrumento o mejoramiento de su funcionalidad.

2.3.1 TRAZO DE PISTAS

Existen diversos métodos para el trazo de las pistas, de los cuales sólo dos son los que se describen a continuación:

1) Con pistas "rapid circuit" (tipo calcomanía). Este método consiste en cortar y pegar cada una de las pistas de una plantilla tipo calcomanía, al tamaño (grosor y longitud) de las líneas requeridos para formación del circuito impreso. Las desventajas que presenta este método son el lento procedimiento de cortar y pegar una por una, todas las pistas, además de no estar limpia correctamente la superficie de adhesión se corre el riesgo de desprenderse al momento del grabado; y por último resultan ser muy costosas.

Por el contrario, se tiene la ventaja de proporcionar mejores espaciamiento y mejor definición en el grosor de las líneas, facilitando el ensamble de piezas.

2) Con tinta de plumón indeleble. El método consiste en realizar el trazado de pistas a mano, como si se tratase de un dibujo empleando un plumón de tinta indeleble con punta fina o mediana, se tiene la ventaja de ser un procedimiento mucho más rápido que el anterior en el trazo de las pistas, por el contrario, su desventaja se presenta en la habilidad que se posee para proporcionar los correctos espaciamiento y delíneamientos en el trazo de líneas y curvas, ya que en caso de equivocación es difícil borrar exactamente el lugar del error.

2.3.2 GRABADO DE TARJETAS

El grabado de tarjetas se realiza de la siguiente forma:

1) Se calienta una solución de cloruro férrico entre 50 y 70°C, preferentemente a baño maría para mejor control de la temperatura, donde la cantidad a adicionar de solución corresponde a 10 ml por cm² de superficie a grabar.

2) Al alcanzar la temperatura, se introduce la tarjeta donde se trazaron las

pistas de 10 a 15 min, durante ese tiempo se agita la tarjeta constantemente de forma moderada.

3) Se finaliza el proceso de grabado, cuando en la tarjeta no se noten o perciban residuos de cobre en las zona que no fueron cubiertas por las pistas.

4) Se saca la tarjeta de la solución y se enjuaga con agua para eliminar los residuos de solución, y así detener el proceso de disolución de cobre.

5) Se verificaba si el grabado se realizo correctamente, es decir, no se deben notar rastros de cobre entre las líneas del circuito, de ser así, se introducen nuevamente las tarjeta a la solución y se saca cuando se disuelve el residuo de cobre indeseado.

6) Para eliminar la pintura y/o pistas, se frota el circuito impreso con ayuda de una estopa y solvente, de esta forma queda completamente limpio el grabado, listo para efectuar la soldadura de partes.

7) Una vez retirados perfectamente los residuos de las pistas, se efectúa otra revisión para verificar por segunda ocasión si se realizo un buen grabado y así percatarse si no quedan líneas ya fuese entrecortadas o unidas, también se puede emplear un multímetro puenteando las líneas que llevaban continuidad de tal manera que el multímetro solo responda a las líneas individuales y no a las líneas ajenas.

8) Para efectuar un nuevo grabado, se reemplaza la solución anteriormente utilizada en la proporción ya citada.

Una vez se obtenido el grabado se le considera a la tarjeta como circuito impreso.

CAPITULO III

RESULTADOS

CAPITULO III

Este capítulo tiene como finalidad, establecer las indicaciones que describen paso a paso la construcción del instrumento detector de temperaturas con empleo de termopares, así como su respuesta en la toma de lecturas de temperatura, ventajas y desventajas que presenta el empleo del instrumento.

3.1 ACOPLAMIENTO DE PARTES QUE INTEGRAN EL INSTRUMENTO

En la construcción del instrumento detector de temperatura, se emplea un amplificador operacional de instrumentación (amp-op) dado las ventajas que se tienen en su empleo, este tiene como función recibir la señal del termopar y amplificarla linealmente para su posterior lectura, el diagrama básico se muestran la figura 35A.

La ganancia que proporciona el tipo de amp-op seleccionado esta dada por:

$$A_c = \frac{V_o}{V_i} = \left[2 \frac{R_1}{R_2} + 1 \right] \frac{R_1}{R_3} \quad \dots 3.1.$$

Si se tiene que $R_1 = R_3 = R_2$, la expresión de ganancia en el circuito se reduce a

$$A_c = \frac{V_o}{V_i} = 2 \frac{R_1}{R_2} + 1 \quad \dots 3.2 \quad \text{o bien} \quad v_o = \left(2 \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) V_i \quad \dots 3.3$$

En este caso el resistor R, puede ser variable, y cuando se requiera ajustar la ganancia.

V_o corresponde al voltaje de salida, y V_i al voltaje de entrada.

Después de la selección del amplificador operacional de instrumentación, se definió el tipo de circuito integrado que cumpliera con los requisitos de conexión en entradas y salidas requeridos para realizar el acoplamiento de este primer sistema (se hace referencia al término de acoplamiento, a la adaptación que se tiene del amp-op teórico a su formación real empleando un Circuito Integrado).

En nuestro caso el Circuito Integrado elegido fue el LM324 para efectuar la adaptación, ya que su configuración interna cumple con lo requerido por el amplificador (fig. 35B); en las características de funcionamiento de este circuito integrado, se indica que trabaja a un voltaje en corriente continua de ± 12 Volts.

Así mismo en la construcción del amplificador, se adaptaron filtros pasivos dado que su empleo no requiere de un manejo delicado u adaptaciones laboriosas, lo que permitió un rápido y sencillo acoplamiento en el equipo con el fin de mejorar la estabilidad de lectura.

Como paso siguiente, para conseguir visualizar y facilitar la toma de datos en la señal que manda el termopar de forma directa y haciendo referencia a la escala centígrada, se empleó un convertidor analógico digital del tipo de integración, para selección de este elemento se tomó en cuenta el intervalo de temperaturas que se deseaba cubrir con el instrumento, y así determinar la capacidad de salida en la señal de respuesta. De esta forma se tomó en cuenta que en la práctica, la mínima temperatura a cubrir se tenía en el uso destinado a congelación, donde las temperaturas son en el orden de -25°C , por el contrario, en lo que se refiere a líneas de calor, se tienen temperaturas no mayores a 200°C , exceptuando al proceso de secado por aspersión. El elemento seleccionado que cumplió con tales requerimientos fue el convertidor Analógico Digital ICL7106 (C A/D), el cual controla una pantalla digital de cristal líquido de $3\frac{1}{2}$ dígitos con una correspondencia de lectura de 1 volt por 100°C , con intervalo de escala completa en la salida igual a ± 2 volts, y como requisito de funcionamiento maneja un voltaje en corriente continua de ± 9 volts, La sensibilidad del convertidor A/D corresponde a 0.001 volt, o lo que es lo mismo en detectar una variación de temperatura de 0.1°C (idealmente).

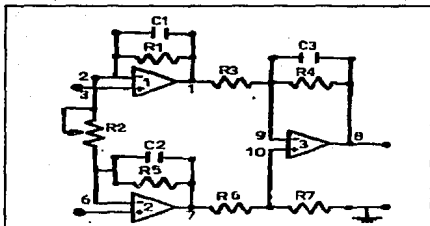


FIG. 35A DIAGRAMA BÁSICO DE AMPLIFICADOR OPERACIONAL

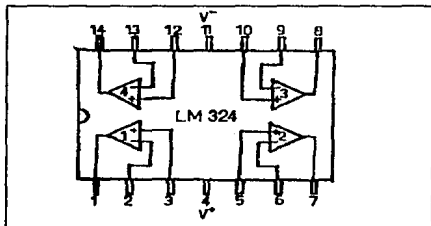


FIG. 35B CIRCUITO INTEGRADO LM324

Ya seleccionados el amplificador y el convertidor analógico-digital se pudieron definir las cualidades de la fuente de alimentación, se tuvo conocimiento que el tipo de voltaje a emplear era en corriente rectificada de alterna a continua, por lo que la fuente de alimentación requerida correspondió a el tipo conocida como fuente positivo negativo con línea a tierra fig. 36.

En el instrumento, el voltaje máximo necesario a cubrir en corriente continua fue de ± 12 volts con línea a tierra, correspondientes al Circuito Integrado LM324. Por lo que el transformador debía producir la disminución de 127 volts a 12 volts en corriente alterna, y con esto efectuar la rectificación a corriente continua.

Como paso previo en la construcción formal del instrumento, se verifico que todos los componentes seleccionados funcionaran acorde al planteamiento hecho teóricamente, por lo que fue necesario efectuar un prearmado o preacoplamiento con el fin de afinar detalles en la construcción, verificar posibles fallas, reajustar el diagrama básico y en general mejorar las cualidades del instrumento.

Cabe mencionar que en el período de prearmado se puso especial cuidado en la introducción de los elementos, ya que si alguno se introducía erróneamente se corría el riesgo de provocar calentamientos, cortos circuitos, daños en piezas delicadas o la confusión en el acoplamiento general, tal sería el caso de los reguladores de voltaje de la fuente rectificadora (fig. 37).

El término de tarjeta, se refiere al conjunto e interconexión de piezas que integran un sistema como son el amp-op, convertidor A/D, visualizador (display) y la fuente rectificadora, con la creación de circuitos impresos, haciendo un total de cuatro diferentes tipos de tarjeta los que se manejaron en el instrumento de medición.

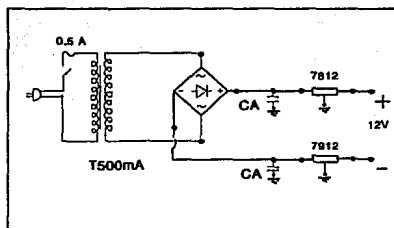


FIG. 36 FUENTE DE RECTIFICACIÓN

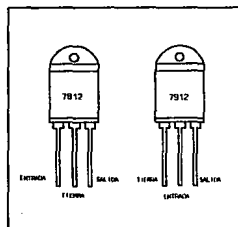


FIG. 37 REGULADORES DE VOLTAJE

3.2 CONSTRUCCIÓN

El armado de la fuente de rectificación en protovolts fue la primera etapa de construcción del instrumento y por tal motivo fue la parte de mayor importancia, debido a que de ella dependía que las partes restantes funcionaran de acuerdo a lo planteado. Se verificó que las salidas de voltaje correspondieran a las indicadas en el diagrama de la fig. 36, una vez que se obtuvo dicho acoplamiento fue posible armar las partes restantes.

Para el armado del amp-op, primeramente se determinaron los valores correspondientes a los resistores que integran el circuito de acuerdo a la ecuación 3.2.

donde:

V_i es el voltaje proporcionado por el termopar tipo T al alcanzar 200°C de

temperatura = 9.286mv

V_o = voltaje máximo alcanzado por el convertidor A/D = 2000mv

R_1 se fija a un valor de 100K Ω

Utilizando la ecuación rearrreglada 3.2 se calcula el valor correspondiente de R_2 ,

$$R_2 = \frac{2R_1}{\frac{V_o}{V_i} - 1}$$

sustituyendo los valores se tiene:

$$R_2 = \frac{2(100K\Omega)}{\frac{2000mv}{9.286} - 1} = \frac{200K\Omega}{214.378} = 0.932k\Omega \approx 1K\Omega$$

Dado que la resistencia R_2 es variable fue posible acoplar un resistor de 1K Ω (llamado trimpot) y ajustar a el valor calculado. En el armado con protovolts se verificó si se tenía respuesta entre el termopar y el amplificador para corroborar su acoplamiento, el grado de respuesta en el amplificador dependía del ajuste (calibración) que se lograba con la ganancia dada por la resistencia R_2 , y el voltaje de respuesta correspondientes a las temperaturas de referencia.

Por último en lo que corresponde al amplificador operacional, como adaptación especial que se realizó, se introdujo el acoplamiento de una resistencia variable de precisión, la cual tiene como objetivo fundamental el desplazar la ganancia de un valor mayor a uno menor o

viceversa, esto se logra conectando dos de sus puntas independientes a la fuente de voltaje en positivo y negativo respectivamente, y conectando la punta común al sistema sin alterar la relación de ganancia que proporciona la resistencia R_1 , en otras palabras, desde el punto de vista de una recta de respuesta voltaje-temperatura, la resistencia de precisión modifica la ordenada al origen mientras la resistencia R_1 (trimput) modifica el valor de la pendiente. La adaptación de la resistencia variable de precisión se hizo en la última etapa de amplificación del amplificador de instrumentación, y con el fin de no interferir en la señal que manda el termopar se introduce otra resistencia pero de valor fijo (R_2) de esta forma se logra manejar milivolts en la señal de la resistencia variable (fig. 38). La resistencia requerida fue de precisión ya que sólo así se consiguió el ajuste más fino.

Se hace énfasis en indicar que la resistencia R_2 se empleó para calibrar el instrumento en función a la relación de ganancia que proporciona el amplificador por el tipo de termopar a emplear; mientras que la resistencia de precisión se empleó para calibración de termopares de un grupo determinado que pertenecen al mismo tipo.

En lo que respecta al armado del convertidor A/D el único ajuste que se hizo al diseño original, fue para disminuir el voltaje de alimentación de ± 12 volts a ± 9 volts. Para esto se empleó un elemento llamado diodo zener, el cual tiene como función permitir el paso de corriente sólo en el valor deseado, el valor disponible comercialmente del diodo correspondió a 9.1 volts, y en su acoplamiento se tomó en cuenta que estos poseen polaridad (fig. 39).

Posteriormente en el acoplamiento de la pantalla de cristal líquido, dado que no se contó con un diagrama de referencia, se chequeó cada una de sus cuarenta patas, de tal forma que se lograron definir cuáles son las puntas que conformaban los dígitos correspondientes a las unidades, decenas y centenas (fig. 40). Por último, ya ensamblados en protovolts los cuatro sistemas que conformaban el instrumento detector de temperatura, se procedió a efectuar un acoplamiento preliminar entre ellos, para verificar el funcionamiento general, en este punto fue posible (teniéndose la disponibilidad de un osciloscopio) adaptar los sistemas de filtrado, con el fin de eliminar, en lo mayor posible, los niveles de ruido, principalmente los provenientes de la fuente rectificadora y amplificador operacional, de esta manera mejoró la estabilidad en la lectura de la señal.

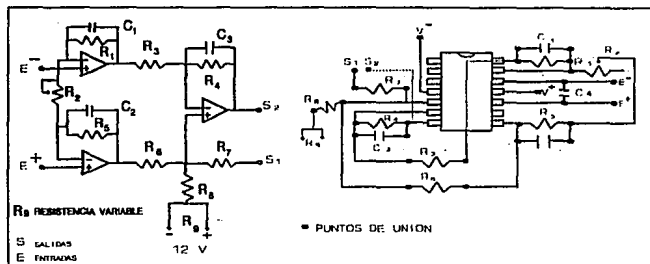
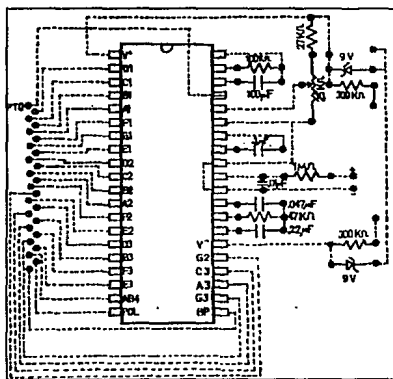


FIG. 38 ACOPLAMIENTO DE RESISTENCIA VARIABLE EN CIRCUITO DE AMP-OP



TAMANO REAL DE TARJETA 10X10cm
FIG. 39 CIRCUITO DE CONVERTIDOR ANALOGICO DIGITAL.

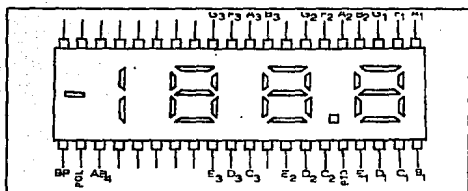


FIG. 40 PANTALLA DE CRISTAL LIQUIDO.

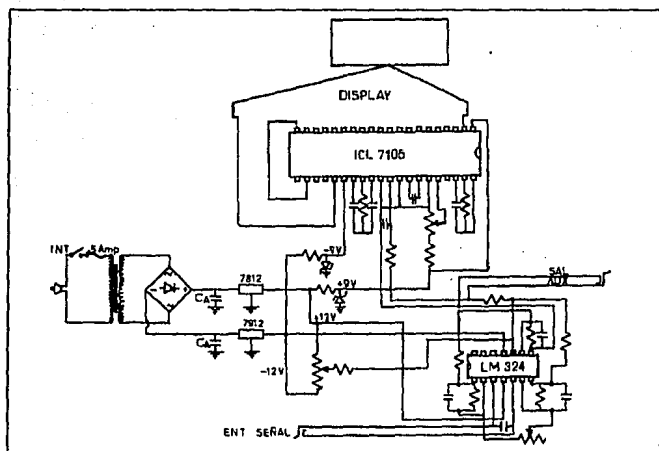


FIG. 41 ACOPLAMIENTO GENERAL DEL INSTRUMENTO

3.2.1 CREACIÓN DE TARJETAS

La secuencia que se cita a continuación, se aplicó a la formación de todas las tarjetas que integran el instrumento de medición, se hace mención que para llegar a este punto, ya se contaba con el diagrama de cada una de las tarjetas así como el de conexión general incluyendo el planeamiento de servicios como los dispositivos de protección, conexiones para termopar y osciloscopio (RVT), selector y sistema de apagado-encendido, esperando hacer sólo pequeñas modificaciones si se llegasen a presentar fig.41.

Una vez que se corroboró el correcto funcionamiento de las tarjetas armadas en protovolts, se procedió a la creación de las tarjetas formales en plantillas de acrílico-cobre.

Primeramente se plantearon diseños con opciones para trazar las líneas de interconexión o pistas de los elementos que integraban el circuito, de tal forma que no se cruzaran entre sí y fueran específicos para cada una de las partes del circuito; ya obtenido el mejor bosquejo se trazaron las pistas en la plantilla de cobre con el tamaño real a ocupar por la tarjeta, el tamaño de la tarjeta estuvo a criterio tomando en consideración los espacios a ocupar por los elementos que integraban cada tipo de tarjeta. Las plantillas de cobre debían de estar perfectamente limpias, por lo que se decidió pulir ligeramente con lija de agua, y con esto facilitar el trazo de líneas.

En la construcción del instrumento se empleó la combinación de dos técnicas de grabado para obtener mayor calidad en la definición de pistas, en lo que se refiere a los espaciados de las pistas para conexión de los Circuitos Integrados, en su trazo se emplearon pistas "rapid circuit", las pistas restantes como líneas rectas, uniones, etc. se trazaron con tinta de plumón indeleble.

Se recomienda que en el trazo de las líneas empleando el plumón con tinta indeleble, no se han muy tenues, por lo que se sugiere emplear tintas oscuras de preferencia color negro, de esta manera se logra un grabado con mayor definición.

De acuerdo a la cantidad de elementos a construir se elaboraron cuatro tipos diferentes de tarjetas:

a) En lo que respecta a la tarjeta de la fuente de alimentación (fig. 42) se indican cuales son los lugares en donde se incorporan las piezas, es decir:

CP corresponde al lugar donde se sitúa el circuito puente

C corresponde al lugar donde se sitúan los capacitores

Ra corresponde al lugar donde se sitúa el regulador 7812

Rb corresponde al lugar donde se sitúa el regulador 7912

b) En lo que respecta a la tarjeta del amplificador (fig.43), el acoplamiento de los componentes esta completamente descrito en la figura 35 (la simbología de los componentes se tiene en el anexo B).

c) En la tarjeta del visualizador (fig. 44), solo se indican 2 puntos, en los cuales se deben introducir las puntas de la pantalla, las conexiones de las puntas restantes se tiene en el orden de acuerdo a lo indicado en la figura 40.

d) Así mismo la tarjeta del convertidor (fig. 45) debe coincidir con las salidas en la tarjeta de la pantalla de cristal líquido, finalmente la interconexión de ambas partes se logro con la conexión de cables que van de tarjeta a tarjeta y que se acoplaron al tamaño requerido (tipo interfase) logrando obtener una posición perpendicular en fijación de ambas tarjetas.



FIG. 42 TARJETA DE FUENTE

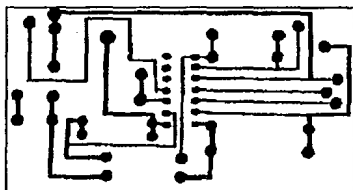


FIG. 43 TARJETA AMP-OP (TAMAÑO REAL 5X10 cm)

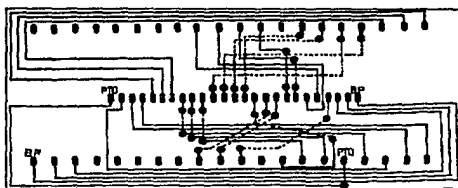


FIG. 44 TARJETA DE VISUALIZADOR (TAMAÑO REAL 4.5X10 cm)

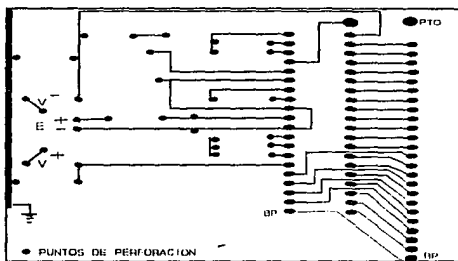


FIG. 45 TARJETA DE CONVERTIDOR A/D (TAMAÑO REAL 10X10 cm)

3.2.2 ENSAMBLE DE TARJETAS.

Para el ensamble de piezas fue necesario primero hacer perforaciones en el circuito impreso en los lugares indicados por los diagramas con pequeñas circunferencias, empleando un taladro (para este fin se empleo un taladro vertical, aun que uno de mano era también buena opción), y una broca que corresponde a 1/32in de grosor. Las perforaciones para fijar las tarjetas al chasis se hicieron con una broca de 1/8in y por consecuencia los tornillos empleados fueron de igual medida. También se requirió para fijar las piezas de un cautín de lápiz, soldadura de estaño (60/40) y pasta para soldar.

Las piezas como resistencias, capacitores, cables, diodos, y pantalla de cristal líquido, se soldaron directamente en la tarjeta. En cambio para el acoplamiento de los circuitos integrados, se soldaron primero unas bases con el mismo numero de patas y tamaño correspondiente al Circuito Integrado, con el fin de evitar el daño de estas piezas por efecto del calor.

De cada pieza que se soldó, se cercioró al momento que permaneciera sin movimientos en las uniones, ya que manteniéndose completamente firme se evitaban falsos contactos. Después de terminar con el ensamble de todas las piezas en una tarjeta se cortaba el restante de las patas lo mas al ras de la tarjeta posible para ahorrar espacios y por último se retiraban los residuos de pasta empleando solvente (thiner).

La interconexión de las tarjetas del convertidor analógico a la pantalla de cristal líquido, fueron las más laboriosas, para realizar dicha adaptación fue necesario soldar primeramente los cables (a manera de interfase) sólo en la tarjeta del visualizador, posteriormente se fijo la pantalla de cristal líquido de tal forma que se cercioraba que no hubiera interferencias entre línea y línea, de ser así se indagaba la fuente de interferencia. Finalmente se unió la tarjeta del convertidor A/D conectando cada uno de los cables correspondientes a los orificios de la pantalla.

Las perforaciones destinadas a la fijación de tarjetas en chasis no se muestran en los diagramas, estas se elaboraron según se considero el lugar mas propicio para ello.

En el cuadro 16 se resumen el total de las piezas que integran a cada una de las tarjetas elaboradas.

CUADRO 16 PIEZAS QUE CONFORMAN LAS TARJETAS

TARJETAS	#	PIEZAS Y CLAVES	DESCRIPCIÓN
FUENTE RECTIFICADORA TAMAÑO 5X5 cm	1	TRANSFORMADOR	12V 500 MA*
	2	CAPACITORES	4700 μ F 25V
	1	PUNTE DE DIODOS	3A*
	2	REGULADORES DE VOLTAJE	7812 Y 7912
AMPLIFICADOR 5X10 cm	1	TRIMPUT (R2)	2 k Ω *
	1	BASE PARA C.I.	14 PATAS
	2	CAPACITORES (C1 Y C2)	.1 μ F*
	1	CAPACITOR (C3)	.01 μ F
	1	CAPACITOR (C4)	2pF
	7	RESISTENCIAS (R1,R3,R4,R6, ,R7,R8)	100 k Ω
	1	RESISTENCIA PRECISIÓN (R9)	10 K Ω
	1	C.I.	LM324
VISUALIZADOR 4.5X10cm			
CONVERTIDOR ANALOGICO 10X10cm	1	CONVERTIDOR ANALÓGICO	ICL7106
	1	BASE PARA C.I.	40 PATAS
	1	CAPACITOR	100 pF
	1	CAPACITOR	0.1 μ F
	1	CAPACITOR	0.01 μ F
	1	CAPACITOR	0.047 μ F
	1	CAPACITOR	0.22 μ F
	1	TRIMPUT	25 K Ω
	1	RESISTENCIA	27 K Ω
	1	RESISTENCIA	1 M Ω
	1	RESISTENCIA	470 K Ω
	2	RESISTENCIA	300 K Ω
2	DIODO ZENER	9.1 V	

* SIMBOLOGÍA EN ANEXO B

3.2.3 ACOPLAMIENTO GENERAL Y VERIFICACIÓN DE SEÑAL EN TARJETAS.

Para la interconexión de tarjetas y acoplamiento general se cumplió con los siguientes pasos:

1) Se seleccionó el tipo y tamaño de chasis a emplear, en este caso se eligió una caja de aluminio con dimensiones de 25x16x5cm

2) Se acondicionó el chasis haciendo perforaciones destinadas a la fijación de las piezas, asegurando hacer un número exacto de orificios, ya que de ello dependía la presentación formal del instrumento. Las perforaciones se realizaron con brocas de 1/4in y se dio el tamaño exacto con una lima redonda.

Las piezas que necesitaban de orificios para ser fijadas y que contribuyeron al aspecto externo del instrumento, son las correspondientes a:

-Para la parte posterior del instrumento conexión RVT (conexión para osciloscopio), conexiones plug hembra (para conexión de los termopares), porta fusible y cable de extensión fig. 46.

-En la parte frontal del instrumento perillas de la resistencia de precisión, selector (por la introducción de 5 amplificadores), pantalla de cristal líquido e interruptor de encendido y apagado fig. 46.

-Las perforaciones restantes para fijación de tarjetas se realizaron en la parte inferior del chasis.

3) Se cercioró la respuesta en la señal de entrada y salida, de cada una de las tarjetas ensambladas junto con las piezas mencionadas en la siguiente secuencia:

A) Teniéndose como prioridad a la tarjeta de la fuente de alimentación, se hizo la conexión en serie del fusible e interruptor de apagado-encendido a la toma de corriente, como sistema de protección, y se verificó la salida de voltaje según lo indicado en el diagrama de la fig. 36.

B) En la tarjeta del amplificador se acoplo el circuito integrado LM 324, introduciéndolo a presión sobre la base destinada para su uso, se conecto la corriente de alimentación, se fijaron las líneas de la conexión plus hembra y se ajusto la resistencia 2 a un valor aproximado al requerido con ayuda del acoplamiento informal de un termopar tipo T, de tal forma que se cercioraba que hubiese respuesta y para ello se visualizaba la lectura ya sea con un osciloscopio, en el mejor de los casos, o un galvanómetro. No fue necesario calibrar en este momento la tarjeta para efectuar el chequeo, simplemente importaba que al variar el valor de la resistencia hubiera respuesta al calentamiento y enfriamiento del termopar cerciorandose así que se efectuó un buen acoplamiento de las partes, de esta manera no se continuaba hasta no tenerse la seguridad de que la tarjeta funcionaba correctamente. Por último se continuo con la introducción de la resistencia de precisión la cual podía producir variaciones en la señal de salida del amplificador en el intervalo de los -12 a +12 volts, y se conectaron las salidas de señal a un selector, dado que se introdujeron 5 amplificadores.

En esta etapa fue posible percibir que la señal de respuesta en el amplificador sin termopar era de 12 volts, al introducir el termopar la respuesta se ajustaba automáticamente acorde al ajuste que se daba en la resistencia 2. De lo contrario se sospechaba que el circuito integrado no funcionaba y esto implicaba su reemplazo.

C) Por último, en la tarjeta del convertidor analógico digital con especial cuidado se introdujo el circuito integrado ICL 7106 en su base correspondiente, se procuro no tocarlo directamente con las manos debido a la estática que se le pudiera inducir; y se verificó el funcionamiento de la tarjeta. En este caso fue necesario calibrar la tarjeta con ayuda del amplificador empleando la resistencia de precisión para ajustar al valor deseado, preferentemente se empleó el osciloscopio para lograr mayor precisión en la calibración, de tal

forma que la respuesta era de 200 para la pantalla correspondientes a 2 volts en la señal de entrada.

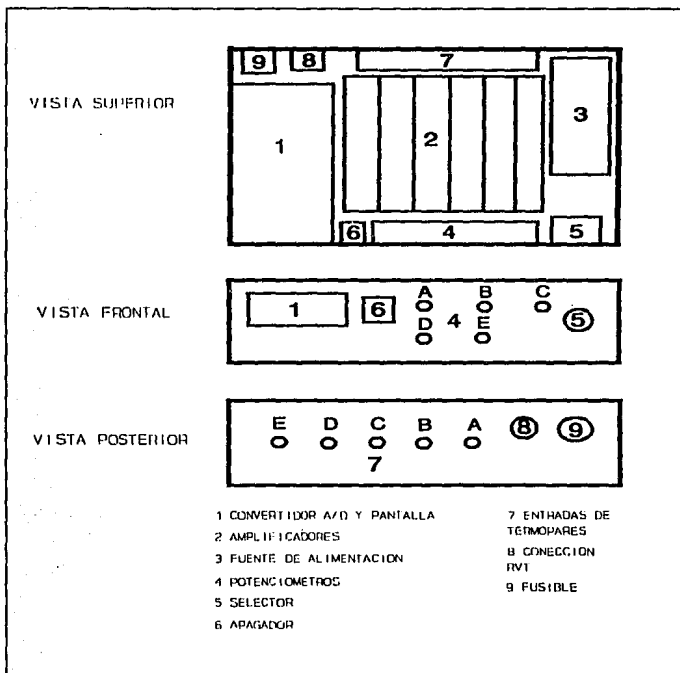
La tarjeta de la pantalla de cristal líquido se fijó a presión verticalmente por medio de un doble que presenta el propio chasis.

Para lograr la calibración de la tarjeta con ayuda del osciloscopio, se hizo el acoplamiento de la conexión RVT en paralelo a la entrada de señal en la tarjeta.

4) La fijación de las tarjetas al chasis se hizo aproximadamente con una inclinación de 60° para los amplificadores para facilitar la extracción de ellas en caso de la sustitución futura, las piezas restantes se fijaron horizontalmente (fig. 46). Con el fin de que el circuito impreso no hiciera contacto con el metal del chasis y esto produjera un corto circuito, se instaló en el piso un aislante plástico.

Una vez montadas las tarjetas se puso en funcionamiento la tarjeta del convertidor A/D para realizar la calibración formal de los amplificadores, en esta calibración fue necesario emplear un termopar validado previamente, cumpliendo principalmente con los atributos de exactitud, precisión y linealidad: Ya seleccionado el termopar se le adaptó una conexión plug macho.

FIG. 46 DISTRIBUCIÓN DE TARJETAS EN CHASIS.



3.3 VALIDACIÓN DE TERMOPARES

Para efectuar la calibración del instrumento detector de temperaturas construido, se requería de efectuar la selección de un termopar el cual presentara muy buena confiabilidad de lectura, llámese patrón, de tal forma que permitiera referir la respuesta del termopar de un sistema experimental, a la lectura de temperatura en el instrumento lo más cercano a la realidad posible. Para esto se realizaron pruebas de validación, las cuales permitieron seleccionar al termopar que cumpliera con las mejores cualidades solo en cuanto a las pruebas de linealidad, exactitud, y precisión. Para la realización de dichas pruebas se emplearon tres termopares tipo T certificados con camisas de bajo nivel de inercia, además de emplearse un instrumento detector de temperaturas comercial.

Las primeras pruebas que se realizaron fueron la de exactitud y precisión, estas se desarrollaron en sistemas isotérmicos con temperaturas de fusión y ebullición del agua de 0°C y 92.8°C (presión de Cuatitlán) respectivamente, realizándose tres replicas para cada sistema, obteniéndose los resultados promedio que se muestran en los cuadros 17 y 18.

CUADRO 17 TEMPERATURAS OBTENIDAS EN SISTEMA ISOTERMICO A 0°C

TEMPERATURAS °C		
TERMOPAR 1	TERMOPAR 2	TERMOPAR 3
-0.1	-1.5	0
-0.3	-1.4	0.2
-0.3	-1.3	0.4
-0.4	-1.1	0.5
-0.4	-1.1	0.5
-0.6	-1.0	0.8
-0.8	-0.7	0.9
-0.9	-0.7	1.2
-0.2	-0.4	1.4
-0.3	-0.4	1.4
$\bar{x} = 0.430$	0.960	0.730
$s = 0.258$	0.395	0.490

CUADRO 18 TEMPERATURAS OBTENIDAS EN SISTEMA ISOTERMICO A 92.8°C

TEMPERATURAS °C		
TERMOPAR 1	TERMOPAR 2	TERMOPAR 3
91.4	91.3	92.1
91.3	91.3	92.0
91.4	91.3	91.9
91.2	91.1	91.8
91.0	91.0	91.6
91.2	91.1	91.8
91.2	91.1	91.3
91.2	91.0	91.7
91.0	91.1	91.7
91.2	91.1	91.5
$\bar{x} = 92.210$	91.14	91.74
$S = 0.137$	0.117	0.236

Los resultados de los tratamientos estadísticos se resumen en los siguientes cuadros:

CUADRO 19 RESULTADOS DE ESTADÍSTICOS EN LA PRUEBA DE PRECISIÓN.

TERMOPAR	SISTEMA A 92.8°C		SISTEMA A 0°C	
	C.V	ORDEN	s	ORDEN
1	0.13	I	0.258	I
2	0.15	II	0.395	II
3	0.25	III	0.490	III

Se hace notar que para el sistema a baja temperatura en la prueba de precisión se toma el valor de la desviación estándar, debido a que la media en los tratamientos presenta valores muy pequeños provocando que el valor del coeficiente de variación se incremente de tal forma que indicaría que ninguno de los termopares es preciso.

CUADRO 20 RESULTADOS DE ESTADÍSTICO EN LA PRUEBA DE EXACTITUD.

TERMOPAR	SISTEMA A 92.8°C		SISTEMA A 0°C	
	t	ORDEN	t	ORDEN
1	-36.7	II	0.527	II
2	-38.3	III	0.768	III
3	-14.2	I	0.470	I

El valor de t obtenido de tablas es:

$$t(0.05, 9) = 2.2$$

De los resultados obtenidos se aprecia que los termopares en ambos sistemas obtienen un muy buen intervalo de aceptación para haber sido considerados como precisos, sin embargo en cuanto a exactitud los termopares obtuvieron mayor aceptación en el sistema a baja temperatura. Cabe indicar que es de mayor peso la prueba de precisión, ya que es en esta, donde sobre salen las cualidades de los termopares sin tenerse en cuenta la influencia del instrumento utilizado para registro de las temperaturas.

Por otro lado, la prueba de linealidad se efectuó en un sistema a temperatura ascendente, experimentalmente se realizó una réplica tomando datos de temperaturas cada minuto hasta completar un total de 15 puntos, se partió de una temperatura inicial de 11°C , los resultados y comportamiento gráfico se muestran en la fig. 47.

Los resultados en el desarrollo del análisis de regresión se presentan en el cuadro 20.

CUADRO 21 RESULTADOS EN LA PRUEBA DE LINEALIDAD

ATRIBUTOS	TERMOPAR 1	TERMOPAR 2	TERMOPAR 3
r	0.997	0.998	0.998
m	1.69	1.69	1.76
r^2	0.994	0.996	0.996

Con la tabla 21 de resultados se observa que existe una muy buena correlación lineal entre todos los termopares empleados, además de tenerse una muy baja dispersión de datos, sin embargo, se hace notar que la pendiente del termopar 3 presenta una variación en su velocidad de respuesta alejándose del comportamiento general para el tipo de termopares empleados, lo anterior implica que se dude en su calidad de respuesta dada la desviación que presenta.

Para selección del termopar patrón con las mejores características de trabajo, después de efectuadas las pruebas de validación, se empleó un cuadro donde se resumieron los atributos de cada termopar empleado en las pruebas de forma que se realizó una ponderación con los resultados

CUADRO 22 SUMA DE ATRIBUTOS PARA SELECCIÓN DE TERMOPAR PATRÓN.

PRUEBA	TERMOPAR 1	TERMOPAR 2	TERMOPAR 3
EXACTITUD	II	III	I
PRECISIÓN	I	II	III
LINEARIDAD	II	I	III
SUMA DE ATRIBUTOS	5	6	7

Con la suma de atributos se puede apreciar que de los tres termopares empleados, se tuvo al termopar 1 con el mejor lugar de aceptación en las pruebas realizadas, lo que indica su buen nivel de aceptación para ser considerado confiable y con esto continuar su empleo en la calibración del instrumento.

3.4 ANÁLISIS Y RESULTADOS EN INSTRUMENTO CONSTRUIDO.

La calibración del instrumento se realizó al momento de calibrar las tarjetas correspondientes a los amplificadores, con apoyo de un termopar tipo T validado, un osciloscopio, y dos sistemas isotérmicos de referencia con temperatura de fusión y ebullición del agua a la presión de 585mm Hg.

Para calibración de los amplificadores se cumplió con los siguientes pasos:

1) Se acoplo una conexión plus macho en el termopar validado, colocando al termoelectrodo positivo respecto al centro de la conexión, para instalarse en el amplificador.

2) Se ajusto el valor de la resistencia 2, introduciendo al termopar en ambos sistemas continuamente, de tal forma que primero se busco establecer un intervalo en la respuesta del amplificador, de aproximadamente 0.9 volts en la señal de salida, no importando los valores en voltaje real que se producían en ese momento al conseguir el intervalo, incluso no importaba que la lectura en la pantalla de cristal líquido, mostrara o no, la lectura correspondiente a la temperatura de los sistemas de referencia, el intervalo se lograba visualizar con el osciloscopio.

3) Ya establecido el intervalo, se empleo la resistencia de precisión del amplificador para desplazar el intervalo establecido, de tal forma que esta vez sí se ajustaron los valores correspondientes a las temperaturas en los sistemas, acorde a la lectura percibida por la pantalla de cristal líquido.

Cuando el valor en la señal de entrada detectado por la pantalla de cristal líquido era mayor a +2 volts, en la parte izquierda de esta aparecía el numero uno, por el contrario si el valor era menor a -2 volts, se visualizaba el numero uno negativo, con esta información se sabía el sentido en el que debía girarse la perilla en la resistencia de precisión.

4) Por último se dio un ajuste nuevamente el intervalo de ganancia en el amplificador, pero ahora más preciso de tal forma que en esta ocasión sí se acoplaron exactamente los valores entre las temperaturas reales de los medios isotérmicos y la lectura indicada por la pantalla de cristal líquido.

Se hace la aclaración que para cuando se efectúa el ajuste de la resistencia dos, se esta realizando propiamente la calibración del equipo con respecto al tipo de termopar a emplear, por lo que solo se debe realizar una sola vez, mientras que al emplearse la resistencia de precisión se desarrolla la calibración propia del termopar.

Con el empleo del osciloscopio al efectuarse la calibración del instrumento, fue posible proporcionar mayor precisión en el ajuste de valores, además de dar a conocer que en la señal de salida de los amplificadores, presentaron una fluctuación de ± 0.4 milivolts, lo que indica que de entrada al emplearse el instrumento construido es de esperarse un error de precisión correspondiente a $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$, con la característica de comportarse como un error de linealidad de tipo independiente.

Para evaluar la respuesta y verificar su comportamiento del instrumento se desarrollaron pruebas de validación bajo las condiciones para las cuales esta destinado su empleo utilizando termopares de uso cotidiano en el laboratorio, obteniéndose los siguientes resultados:

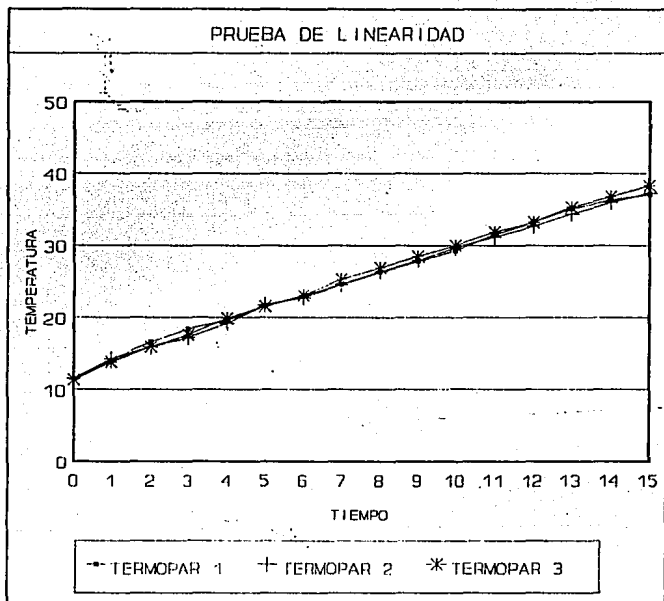


FIG. 47 RESULTADOS GRÁFICOS EN LA PRUEBA DE LINEARIDAD

En la prueba de precisión primeramente se calibraron cinco termopares, se realizaron dos replicas en un sistema isotérmico a temperatura de 0°C (273.16 K) con intervalos en la toma de lectura de 2 minutos para cada termopar, obteniéndose los datos promedio mostrados en el cuadro 23 referidos en grados Kelvin.

CUADRO 23 RESULTADOS EN LA PRUEBA DE PRECISI3N PARA EL INSTRUMENTO CONSTRUIDO

TEMPERATURA K					
mín	TERMOPAR A	TERMOPAR B	TERMOPAR C	TERMOPAR D	TERMOPAR E
2	273.0	274.9	271.5	272.2	273.0
4	273.1	274.8	272.1	273.1	273.0
6	273.1	274.8	272.6	273.4	273.1
8	273.2	274.8	273.0	273.8	273.1
10	273.2	274.8	273.2	274.2	273.1
12	273.2	274.8	273.5	274.3	273.2
14	273.3	274.8	273.6	274.4	273.2
16	273.3	274.8	273.4	274.5	273.2
18	273.3	274.9	273.5	274.6	273.3
20	273.4	274.9	273.9	274.9	273.3
C.V	0.044	0.017	0.275	0.301	0.039

Como se puede observar en el cuadro 23 la precisión no es mayor del 1% para ninguno de los amplificadores por lo que se considera que el instrumento presenta un muy aceptable nivel de precisión.

La prueba de linealidad se realizó en un sistema con temperatura ascendente y dos termopares validados, empleando un registrador comercial al par del instrumento construido con el fin de lograr visualizar alguna comparación en los niveles de respuesta de ambos instrumentos.

Los resultados obtenidos se muestran gráficamente (figura 48), de tal forma que se logra visualizar la diferencia en respuestas de los instrumentos empleados.

Para demostrar si estadísticamente existe alguna diferencia significativa entre los datos obtenidos por ambos instrumentos, se realiza una análisis de comparaciones pareadas.

CUADRO 24 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LINEARIDAD Y ANÁLISIS DE MUESTRAS PAREADAS EN INSTRUMENTO COMERCIAL Y CONSTRUIDO.

TEMPERATURAS EN INSTRUMENTOS (° C)			
TIEMPO min	CONSTRUIDO X_1	COMERCIAL X_2	DIFERENCIA $d_i=(X_2-X_1)$
0	11.3	11.6	-0.3
2	18.0	23.3	-5.3
4	25.9	30.8	-4.9
6	33.2	38.7	-5.5
8	40.9	46.7	-5.8
10	47.7	52.5	-4.8
12	53.6	58.6	-5.0
14	58.3	63.4	-5.1
16	62.4	67.9	-5.5
18	67.5	72.5	-5.0
20	73.5	76.7	-3.2
22	79.7	82.3	-2.6
24	83.6	85.5	-1.9
25	88.1	89.7	-1.6
28	92.4	91.7	0.7
30	93.1	92.6	0.5
	$r=0.993$ $m=2.778$ $r^2=0.986$	$r=0.983$ $m=2.639$ $r^2=0.967$	$\Sigma d_i = 55.3$

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n} = \frac{(-0.3) + (-5.3) + \dots + (0.5)}{16} = -3.45$$

$$s_d^2 = \frac{n \sum d_i^2 - (\sum d_i)^2}{n(n-1)} = \frac{16(269.29) - (-55.3)^2}{16(15)} = 5.21$$

Las hipótesis a probar, para saber si los datos no son diferentes parten del planteamiento:

$$\mu_d = \mu_2 - \mu_1$$

Por lo que las hipótesis a probar se tienen como:

$$H_0 = \mu_d = 0$$

$$H_a = \mu_d \neq 0$$

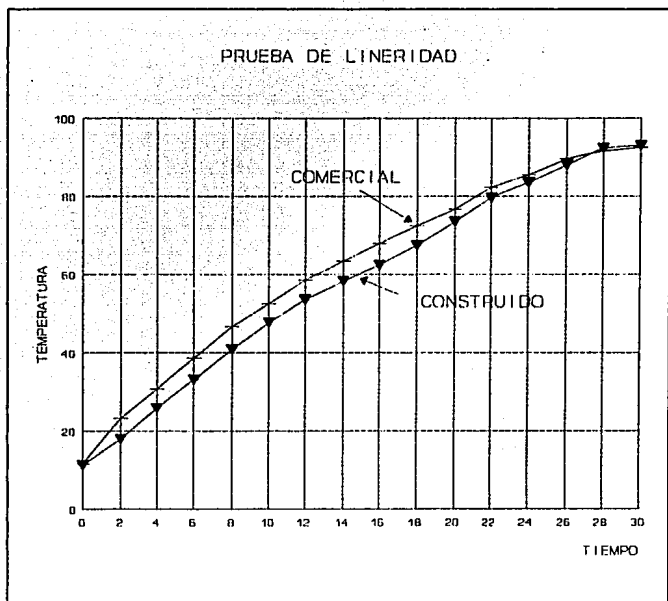


FIG. 48 COMPARACIÓN DE RESPUESTA INSTRUMENTO COMERCIAL Y CONSTRUIDO.

Para la toma de decisiones se obtiene que

$$t = \frac{\bar{d} - \mu_d}{s_d \sqrt{n}} = \frac{-3.45 - 0}{\sqrt{5.21/16}} = -8.04$$

de tablas se tiene

$$t_{(15, 0.05)} = 2.13$$

Al concluir con el tratamiento, se obtuvieron las bases para rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna, lo que implica que sí existe variación significativa en la respuesta de ambos instrumentos. No obstante, se hace notar que para el nivel de dispersión alcanzado en los resultados obtenidos por el instrumento construido, se presentan datos lo suficientemente aceptables para poder ser utilizados en sistemas experimentales y ser considerado como instrumento confiable de medición.

CONCLUSIONES

-En todo sistema experimental, el tipo de instrumentación a manejar esta directamente relacionado con la velocidad de respuesta, sencillez de manejo, versatilidad, y grado de confiabilidad que se desea obtener en la obtención de datos.

-Para marcar la diferencia entre validación y calibración se tiene que la calibración se refiere a un ajuste físico directo en el instrumento de trabajo para crear o asignar un comportamiento definido, mientras que la validación por su parte se refiere a un ajuste o corrección por medio de modelos o tratamientos que se aplican indirectamente sobre un comportamiento ya definido.

-En cuanto a la validación de termopares se concluye que para la obtención de datos confiables en la realización de las pruebas de exactitud y precisión, es necesario se implementen los sistemas de prueba, en condiciones lo más similar posible a la línea de trabajo donde se desempeñara la principal investigación.

-En cuanto a la construcción del instrumento que reduce tiempo en el proceso de validación, se logra construir el instrumento a muy bajo costo, en comparación a un aparato comercial en la siguiente proporción:

Instrumento digital comercial para empleo con 5 termopares tipo T, intervalo de lectura entre -100°C a 200°C , exactitud de $\pm 0.5\%$ en el intervalo del instrumento, pantalla de led's, la relación es de alrededor de 7.5 veces más caro el comercial a uno construido.

-El instrumento construido reduce el número de pruebas de validación, ya que al calibrarse los termopares individualmente, no es necesario realizar la prueba de exactitud, además al emplear la caja en un sistema experimental no es necesario la obtención de factores de corrección que hagan referencia a un solo termopar, ya que por tratarse de amplificadores individuales, la calibración de cada termopar es independiente del resto de los termopares empleados.

-En el siguiente cuadro se resumen las características que presenta el instrumento construido.

CUADRO 25 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE INSTRUMENTO CONSTRUIDO

V DE ALIMENTACIÓN EN INSTRUMENTO	120 VOLTS CA
V DE ALIMENTACIÓN A AMP-OP	±12 VOLTS CC
V DE ALIMENTACIÓN A PANTALLA	± 9 VOLTS CC
CAPACIDAD	CINCO TERMOPARES
TIPO DE LECTURA	GRADOS CENTÍGRADOS
INTERVALO DE LECTURA	±200
EXACTITUD	.1
PRECISIÓN	±0.4°C
DIMENSIONES	25 X 16 X 5 cm

- Se puede emplear el instrumento para trabajar con diferentes tipos de termopares, calibrando los amplificadores en referencia al tipo de termopar a utilizar siguiendo la misma metodología mencionada para el termopar tipo T.

- Es posible el acoplamiento de una interfase para su adaptación de señal a una computadora.

- Las piezas que conforman el instrumento son fácilmente desmontables en caso de requerirse la sustitución de alguna de ellas.

- La velocidad y confiabilidad de respuesta en el instrumento es tan aceptable como un instrumento comercial.

- En los datos obtenidos por el instrumento se sumara al error de precisión que se tiene con el instrumento y la que proporciona el tipo de termopar a emplear.

- Se debe calibrar cada termopar a utilizar, con un sistema de temperatura conocida como referencia, cada vez que se emplee el instrumento.

- Con la finalidad de lograr la rápida distinción e identificación entre los diferentes tipos de termopares que con mayor frecuencia se emplean en el laboratorio, se presenta el cuadro 26 donde se resumen las principales características que los diferencian.

CUADRO 26 CARACTERÍSTICAS DE USO EN TRES TIPOS DE TERMOPARES

TIPO	CALIBRACIÓN Y USOS	POLARIDAD, CÓDIGO DE COLOR Y DISTINCIÓN EN TERMoeLECTRODOS		CÓDIGO COLOR AISLANTE TÉRMIICO
		POSITIVO	NEGATIVO	
T	COBRE-CONSTANTAN BAJAS Y MUY BAJAS TEMPERATURAS	AZUL COBRE METAL AMARILLO	ROJO CONSTANTAN METAL PLATA	AZUL
INTERVALO DE TEMPERATURA RECOMENDABLE -200°C A 350°C PUEDE UTILIZARSE EN ATMOSFERAS OXIDANTES, REDUCTORES, INERTES O VACIO				
K	KROMEL-ALUMEL ATM. OXIDANTES ALTAS Y BAJAS TEM- PERATURAS	AMARILLO CROMEL NO MAGNETICO	ROJO ALUMEL MAGNETICO	AMARILLO
INTERVALO DE TEMPERATURA RECOMENDABLE -200 A 1260°C, ATM. OXIDANTES O NEUTRAS				
J	HIERRO-CONSTANTAN ALTA TEMPERATURA	BLANCO HIERRO MAGNETICO	ROJO CONSTANTAN NO MAGNETICO	NEGRO
INTERVALO DE TEMPERATURA RECOMENDABLE 0 A 760°C, ATM. OXIDANTES, REDUCTORAS, INERTES O VACIO				

RECOMENDACIONES

- Se debe tener mucho cuidado de no moverse las perillas de precisión después de calbrados los termopares ya que estas son muy sensibles, y no se recomienda instalar perillas de precisión ya que son muy costosas.

- Se deben adaptar conexiones pluf de un tamaño determinado a los termopares que se requieran emplear con el instrumento.

Como sugerencias en la validación de termopares se citan los siguientes puntos:

- En procesos donde se aplica calor como es el caso de esterilización, evaporación, secado por aspersión, microondas. Se recomienda implementar un sistema isotérmico con agua desmineralizada a ebullición. El agua se requiere desmineralizada para evitar el incremento en el punto de ebullición por incremento en la concentración de sólidos en el sistema aún cuando se evapore una gran cantidad de ella durante el largo período de prueba.

- En procesos donde se aplica frío como es el caso de refrigeración, congelación, preenfriamiento (por aspersión o convectivo). Se recomienda implementar un sistema isotérmico con agua y hielo, de tal forma que el hielo deberá estar lo más finamente molido para conseguir una temperatura homogénea y constante. De esta forma se asegura que la temperatura al introducir un conjunto de termopares sea la misma para todos, también se debe asegurar que la cantidad de hielo siempre sea mayor que la cantidad de agua para evitar cambios de temperatura.

- Si en el sistema experimental no se tiene un recipiente con aislamiento térmico, se aconseja introducir las puntas de los termopares lo más al centro posible del recipiente, procurando no tocar las paredes del mismo.

- Las líneas de trabajo que manejan temperaturas "intermedias" como son fluidización, celda de difusividad. Se recomienda emplear la mismas condiciones dadas en las líneas de calor.

- Se hace una amplia sugerencia, de evitar al máximo manejar a los termopares haciendo uso de torciones u otros esfuerzos mecánicos, en donde se unen los termoelectrodos y la cámara, de esta manera se evita el rompimiento de las líneas de los termoelectrodos.

- Si se llegase a dar el caso, que durante la experimentación se estropeará un termopar, el arreglo o cambio del mismo, amerita la realización nuevamente de las pruebas, sin embargo estas se pueden realizar sólo entre el termopar estropeado y el patrón.

Las ventajas que se tienen en manejar los sistemas de la forma indicada, favorecen al proceso de calibración por las condiciones aquí empleados, además, se elimina el hecho de manejar un termómetro adicional como instrumento de referencia, ya que es preferible tomar en cuenta las condiciones atmosféricas del lugar, cuando se mantiene un buen control en las condiciones manejadas de los sistemas implementados.

Se hace la recomendación que en la aplicación de las técnicas estadísticas, a los datos obtenidos en el sistema hielo-agua, dado que se trata de temperaturas muy cercanas a 0°C, es preferible manejarlas en grados Kelvin, para evitar se presenten resultados incoherentes, o complicaciones en los cálculos, que dificulten la toma de decisiones.

Se hace la sugerencia que para cumplir con las pruebas de exactitud y precisión, se lleven a cabo los cálculos, con los mismos datos obtenidos del sistema en prueba, ya que en lo único en que difieren, es en el tratamiento estadístico a aplicar.

En el desarrollo de la técnica de linealidad se recomienda cumplir con los siguientes aspectos.

- Si se requiere trabajar con líneas de calor, se recomienda realizar la prueba con calentamiento de agua (desmineralizada) empleando una fuente de calentamiento a temperatura constante (parrilla eléctrica o baño maría si se emplea mechero), la temperatura inicial del agua está en función a la cantidad de datos que se quiera obtener, dicho de otra manera, si se requiere la obtención de un considerable número de datos, la temperatura inicial del agua deberá ser baja, mientras que la temperatura final se recomienda sea la de ebullición.

- Se hace la recomendación de que al agua debe tener la misma temperatura inicial si es que se realizan replicas, con el fin de evitar futuros ajustes, los intervalos de tiempo en el que se tomaran las temperaturas dependen de la fuente de calentamiento, quedando esto a juicio de operador, aunque se aconseja si se tiene una buena fuente de calentamiento, realizarlo en intervalos de 1 y 2 minutos.

Durante el calentamiento del agua se debe tener cuidado de mantener durante toda la prueba el mismo nivel de agua para evitar que el calentamiento se lleve acabo con mayor rapidez.

- Si se requiere trabajar en líneas de frío, se recomienda efectuar la prueba ya sea por calentamiento o por enfriamiento de agua. Si se realiza por calentamiento, se recomienda empezar con el agua a una temperatura lo más cercana a 0°C sin ser necesario llegar a ebullición, además el sistema deberá permanecer exento de trozos de hielo, y empleando la fuente de calentamiento con una potencia intermedia o baja.

Si la prueba se realiza por enfriamiento, se recomienda tener la fuente de enfriamiento lo más constante posible, la temperatura de inicio queda a juicio del operador, recordando respetar las mismas condiciones iniciales y finales para efectuar las replicas.

- Para efectuar los análisis estadísticos, se recomienda la obtención de diez lecturas como mínimo en cada prueba, ya que de esta manera se asegura estadísticamente una mejor representación del sistema.

Con los resultados de la prueba también es posible la obtención de criterios que permiten determinar si es que un termopar esta trabajando correctamente o no, dichos aspectos se citan a continuación:

A) Como ya es conocida que la relación gráfica de respuesta para cada uno de los diferentes tipos de termopares es lineal a intervalos cortos de temperatura (ver figura 18), cuando se realiza la prueba de linealidad, en el mejor de los casos, es de esperarse se cumpla con el comportamiento ya conocido, o en su defecto, con un comportamiento aproximado o muy similar, sin embargo, cuando no se tiene tal respuesta, se tendrán indicadores que obliguen a efectuar una revisión en las posibles fuentes del error que afectan el equipo, considerándose como principales factores:

- a) La falta de un buen manejo tanto instrumental como manual en el sistema donde se realiza la prueba.
- b) falsos contactos en las uniones de conexión.
- c) ruptura de los termoelectrodos o líneas de extensión (en este caso se debe pensar en un reemplazo).
- d) falla general en el instrumento que visualiza la medición.
- e) el instrumento que registra las temperaturas no tiene una respuesta reproducible (extrapolable) en función a la respuesta de salida que presenta el termopar, solo es útil en cierto intervalo de temperatura.
- f) el instrumento que registra las lecturas, no esta calibrado para el tipo de termopar empleado.
- g) los termoelectrodos del termopar al no tener camisa de protección están expuestos a rápidas oxidaciones con lo cual cambian las propiedades originales del material.
- h) los cables del termopar están colocados en polaridad invertida.

Algunas de las recomendaciones practicas que se hacen para el manejo de termopares se citan a continuación:

- Si se trabaja con un equipo que maneja un selector manual, se recomienda realizar la prueba con un total de cinco termopares como máximo, de esta manera se asegura compartan el mismo intervalo de tiempo entre lectura y lectura durante alguna corrida experimental.

- Los intervalos de tiempo entre la toma de lecturas puede realizarse entre uno y cinco minutos con objeto de simplificar la experimentación. Se recomienda que entre mayor sea el número de termopares mayor sea el tiempo a manejar.

- No es recomendable efectuar las pruebas de validación con diferentes tipos de termopares, es preferible manejar termopares del mismo tipo y condiciones físicas, de lo contrario se obtendrá una gran variación en las lecturas, lo que puede acarrear se compliquen los cálculos e interpretación de resultados en los tratamientos estadísticos.

- Se recomienda el uso de termopares con camisas de diámetro muy pequeño (baja inercia), en sistemas de refrigeración, para mayor precisión en la lectura.

- Se recomienda que el empleo de termopares para sistemas de microondas, sean de tipo K con recubrimiento de acero inoxidable o aluminio, de esta manera no se presentan problemas de sobre calentamientos en equipo o daños al medio de prueba.

- Cuando se presente la necesidad de crear o hacer termopares, se recomienda formar la punta de trabajo torciendo los termoelectrodos en la punta con un máximo de tres vueltas y soldar, empleando una planta de luz con una potencia de entre 60 a 80 volts, dependiendo del diámetro en los termoelectrodos, para asegurar que la unión de los materiales es exactamente en la punta, además de proporcionar una punta resistente a el trato mecánico.

ANEXOS

A N E X O - A

TABLAS DE REFERENCIA PARA TERMOPARES

TERMOPAR TIPO T

COBRE - CONSTANTAN

VOLTAJE TERMOELECTRICO MILIVOLTS											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-20	-0.757	-0.794	-0.830	-0.867	-0.903	-0.940	-0.976	-1.013	-1.049	-1.085	-1.121
-10	-0.283	-0.421	-0.458	-0.495	-0.534	-0.571	-0.608	-0.646	-0.683	-0.720	-0.757
0	0.000	-0.039	-0.077	-0.116	-0.154	-0.193	-0.231	-0.269	-0.307	-0.345	-0.383
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.351	0.391
10	0.191	0.470	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.789
20	0.189	0.810	0.870	0.911	0.951	0.992	1.032	1.073	1.114	1.155	0.196
30	1.198	1.237	1.279	1.320	1.361	1.403	1.444	1.486	1.528	1.569	1.611
40	1.611	1.653	1.695	1.738	1.780	1.822	1.865	1.907	1.950	1.992	2.035
50	2.035	2.078	2.121	2.164	2.207	2.250	2.294	2.337	2.380	2.424	2.467
60	2.467	2.511	2.555	2.599	2.643	2.687	2.731	2.775	2.819	2.864	2.908
70	2.908	2.953	2.997	3.042	3.087	3.131	3.176	3.221	3.266	3.312	3.357
80	3.357	3.402	3.447	3.493	3.538	3.584	3.630	3.676	3.721	3.767	3.813
90	3.813	3.859	3.906	3.952	3.998	4.044	4.091	4.137	4.184	4.231	4.277
100	4.277	4.324	4.371	4.418	4.465	4.512	4.559	4.607	4.654	4.701	4.749
110	4.749	4.796	4.844	4.891	4.938	4.987	5.035	5.083	5.131	5.179	5.227
120	5.227	5.275	5.324	5.372	5.420	5.469	5.517	5.566	5.615	5.663	5.712
130	5.712	5.761	5.810	5.859	5.908	5.957	6.007	6.056	6.105	6.155	6.204
140	6.204	6.254	6.303	6.353	6.403	6.452	6.502	6.552	6.602	6.652	6.703
150	6.703	6.753	6.803	6.853	6.903	6.954	7.004	7.055	7.106	7.156	7.207
160	7.207	7.258	7.309	7.360	7.411	7.462	7.513	7.564	7.615	7.666	7.718
170	7.718	7.769	7.821	7.872	7.924	7.975	8.027	8.079	8.131	8.183	8.235
180	8.235	8.287	8.339	8.391	8.443	8.495	8.548	8.600	8.652	8.705	8.757
190	8.757	8.810	8.863	8.915	8.968	9.021	9.074	9.127	9.180	9.233	9.286
200	9.286	9.339	9.392	9.446	9.499	9.553	9.606	9.659	9.713	9.767	9.820
210	9.820	9.874	9.928	9.982	10.036	10.090	10.144	10.198	10.252	10.306	10.360

TERMOPAR TIPO K

KROMEL - ALUMEL

VOLTAJE TERMOELECTRICO MILIVOLTS											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-20	-0.777	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.005	-1.043	-1.081	-1.118	-1.156
-10	-0.392	-0.431	-0.469	-0.506	-0.547	-0.585	-0.624	-0.662	-0.701	-0.739	-0.777
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392
0	0.000	0.000	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.439	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.837	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570	1.611
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.775	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981	2.022
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394	2.436
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809	2.850
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224	3.266
80	3.266	3.307	3.348	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639	3.681
90	3.681	3.722	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054	4.095
100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467	4.508
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878	4.919
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287	5.327
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693	5.733
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097	6.137
150	6.137	6.177	6.218	6.258	6.298	6.338	6.378	6.419	6.459	6.499	6.539
160	6.539	6.579	6.619	6.659	6.699	6.739	6.779	6.819	6.859	6.899	6.939
170	6.939	6.979	7.019	7.059	7.099	7.139	7.179	7.219	7.259	7.299	7.339
180	7.339	7.379	7.419	7.458	7.498	7.538	7.578	7.618	7.658	7.697	7.737
190	7.737	7.777	7.817	7.857	7.897	7.937	7.977	8.017	8.057	8.097	8.137
200	8.137	8.177	8.216	8.256	8.296	8.336	8.375	8.416	8.456	8.497	8.537
210	8.537	8.577	8.617	8.657	8.697	8.737	8.777	8.817	8.857	8.898	8.938

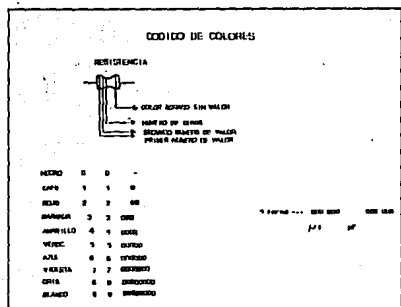
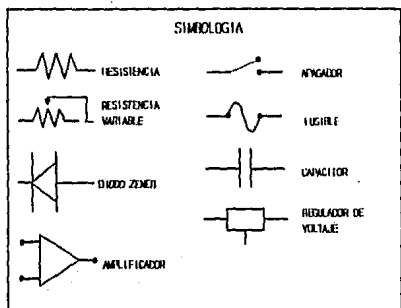
TERMOPAR TIPO J

HIERRO - CONSTANTAN

VOLTAJE TERMOCLECTRICO MILIVOLTS											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-20	-0.895	-1.064	-1.093	-1.141	-1.190	-1.239	-1.288	-1.336	-1.385	-1.433	-1.481
-10	-0.801	-0.930	-0.960	-0.950	-0.999	-0.748	-0.798	-0.847	-0.896	0.845	-0.895
0	0.000	-0.050	-0.101	-0.151	-0.201	-0.251	-0.301	-0.351	-0.401	-0.451	-0.501
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507
10	0.807	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.813	0.865	0.916	0.967	0.019
20	1.019	1.070	1.122	1.174	1.225	1.277	1.329	1.381	1.432	1.484	1.536
30	1.538	1.588	1.640	1.693	1.745	1.797	1.849	1.901	1.954	2.006	2.058
40	2.058	2.111	2.163	2.216	2.268	2.321	2.374	2.426	2.479	2.532	2.585
50	2.889	2.938	2.991	2.743	2.796	2.849	2.902	2.956	3.009	3.062	3.115
60	3.115	3.168	3.221	3.275	3.328	3.381	3.435	3.488	3.542	3.595	3.649
70	3.649	3.702	3.756	3.809	3.863	3.917	3.971	4.024	4.078	4.132	4.186
80	4.186	4.239	4.293	4.347	4.401	4.455	4.509	4.562	4.617	4.671	4.725
90	4.725	4.780	4.834	4.888	4.942	4.996	5.050	5.105	5.159	5.213	5.268
100	5.268	5.322	5.376	5.431	5.485	5.540	5.594	5.649	5.702	5.758	5.812
110	5.812	5.867	5.921	5.976	6.031	6.085	6.140	6.195	6.249	6.304	6.359
120	6.359	6.414	6.468	6.523	6.578	6.633	6.688	6.742	6.797	6.852	6.907
130	6.907	6.962	7.017	7.072	7.127	7.182	7.237	7.292	7.347	7.402	7.457
140	7.457	7.512	7.567	7.622	6.677	7.732	7.787	7.842	7.898	7.953	8.008
150	8.008	8.063	8.118	8.174	8.229	8.284	8.339	8.394	8.450	8.505	8.560
160	8.560	8.616	8.671	8.726	8.781	8.837	8.892	8.947	9.002	9.058	9.113
170	9.113	9.169	9.224	9.279	9.335	9.390	9.446	9.501	9.556	9.612	9.667
180	9.667	9.723	9.778	9.834	9.889	9.944	10.000	10.055	10.111	10.166	10.222
190	10.222	10.277	10.333	10.388	10.444	10.499	10.555	10.610	10.666	10.721	10.777
200	10.777	10.832	10.888	10.943	10.999	11.054	11.110	11.165	11.221	11.276	11.332
210	11.332	11.387	11.443	11.498	11.554	11.609	11.665	11.720	11.776	11.831	11.887

A N E X O - B

SIMBOLOGIA DE PARTES Y VALORES



A N E X O - C

PRUEBA DE HIPÓTESIS^{14,15}

La prueba de hipótesis es el procedimiento mediante el cual se determina cuando las muestras observadas difieren significativamente de los resultados esperados para posteriormente decidir si aceptar o rechazar una hipótesis. Las pruebas de hipótesis suelen emplearse como pruebas de significancia y reglas de decisión.

En el desarrollo de la prueba de hipótesis como regla de decisión, se debe procurar no cometer los siguientes errores: se dice cometer un error del tipo I, en una decisión estadística, cuando se rechaza una hipótesis estadística que debería aceptarse. Por el contrario, se tendrá un error del tipo II cuando se acepte una hipótesis estadística que debería rechazarse. En ambos casos una mala decisión se habrá tomado.

Con el fin de realizar eficazmente la prueba de hipótesis, debe procurarse que los dos tipos de error no se cometan o sean mínimos, y la única manera que existe para reducirlos, consiste en incrementar el tamaño de la muestra.

Por otro lado la prueba de hipótesis se desarrolla como prueba de significancia, cuando en el valor máximo de la probabilidad, el investigador, acepta tener error tipo I (representando con α al nivel de significación), en donde se tendrá por definición que :

$$\alpha = \text{máx } P (\text{ error tipo I })$$

El nivel de significancia de una prueba debe fijarse antes de obtener cualquier muestra, de manera que los resultados obtenidos no influyan en el criterio del investigador. En la práctica los niveles de significación más usuales son del 1% ($\alpha = 0.01$) y 5% ($\alpha = 0.05$).

El emplear una u otra depende de que tan estricto se requiera sea la prueba, siendo el nivel de significancia del 1% la más estricta, ya que se tiene 1 de 100 oportunidades de rechazar la hipótesis cuando debería aceptarse, la anterior se recomienda utilizar en casos donde se segura haber obtenido datos en las mejores de las condiciones experimentales.

En la prueba es suficiente aplicar un nivel de significancia, pero si se decide hacer las pruebas empleando los dos niveles puede suceder que la hipótesis que se prueba se acepte a los dos niveles, se rechace a los dos niveles, o se acepte en uno y se rechace en

el otro. Si se rechaza la hipótesis a los dos niveles, y para hacerlo basta con rechazarla al 5% del nivel de significación, se acostumbra a decir que los resultados son altamente significativos y se rechaza la hipótesis nula en definitiva. Si se rechaza la hipótesis al 1% y se acepta al 5%, se acostumbra decir, que los resultados son probablemente significativos; en este caso no se acostumbra tomar ninguna decisión con la muestra que se tiene, y sí ahondar la investigación para tener una decisión en definitiva.

Por último, si la hipótesis nula se acepta al 1% y por ende también al 5% de niveles de significación, se acostumbra decir que los resultados no son significativos y se acepta la hipótesis nula.

Para conocer si un valor es significativo supóngase que se tiene una población para la cual se establece alguna hipótesis que se desea probar. Supóngase además que si la hipótesis establecida es verdadera, se tiene un estadístico e asociado a las muestras con una distribución de probabilidad conocida. En base a este conocimiento se puede afirmar, por ejemplo, que en el 95% de los casos los valores de estadístico estarán comprendidos entre los valores críticos e_1 y e_2 , que se muestran en la figura 23 para aceptación de la hipótesis nula, fuera de ellos se rechazara la hipótesis nula y se aceptara la alterna.

A manera de resumen la prueba de hipótesis que goza de aceptación general figuran cinco pasos:

- paso 1 Formular una hipótesis nula H_0 ; de manera que pueda determinarse exactamente con α , la probabilidad de cometer un error tipo I
- paso 2 Formular una hipótesis alterna H_a ; de manera que el rechazo de la hipótesis nula signifique aceptar la hipótesis alterna
- paso 3 Establecer los criterios de prueba; es decir, precisar qué los valores del estadístico de prueba delimitan la aceptación o el rechazo de la hipótesis nula. La región de rechazo se llama región crítica. Los otros valores posibles del estadístico de prueba constituyen el intervalo de aceptación. Si en la experimentación el error es grave (o costoso), el valor de α suele ser bajo (0.01), si no es tan grave que pueda ocasionar consecuencias a futuro, α podrá ser más grande (0.05).

paso 4

Se determina el valor del estadístico de la prueba. En el cálculo del estadístico experimental para una muestra mayor a 20, se emplea z , y se obtiene como:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$$

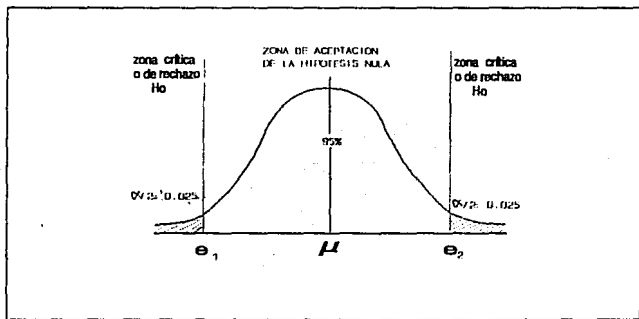
En el cálculo para una muestra menor a 20, se emplea t , y se obtiene como:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

paso 5

a) Se toma una decisión de rechazar o no rechazar la hipótesis nula probada, comparando el valor obtenido de tablas en base a los grados de libertad y nivel de significación.

b) se llega a una conclusión, donde se describe verbalmente la interpretación de la decisión adoptada en el inciso a).



ZONAS DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS.

COEFICIENTE DE VARIACIÓN,

Esta prueba es útil para comparar la dispersión en dos conjuntos de datos diferentes, puede ser que las dos variables que intervienen se midan en unidades diferentes, por ejemplo, es posible que se desee saber, para cierta lectura de temperatura de un espacio tomada con diferentes tipos de termómetros, cual de ellos proporcionará una lectura más precisa, cuando uno maneja la escala centígrada y el otro la escala fahrenheit.

Incluso es posible comparar aun cuando dos lecturas son diferentes aun cuando se use la misma unidad de medición en la toma de lecturas, por ejemplo, si se quiere comparar si un termopar es más preciso midiendo temperatura cercana a 0°C ó a 100°C.

Para lograr los tipos de comparación anteriores es necesario se refieran los resultados a una medida de variación relativa, y es por esto que se emplee al coeficiente de variación, el cual expresa a la desviación estándar como un porcentaje de la media.

La formula es dada como:

$$C. V = \frac{S}{X} * 100$$

donde: S = desviación estándar
X = media aritmética

Se puede hacer notar que la media y la desviación estándar deben expresarse en la misma unidad de medición de tal forma las unidades se cancelan en el cálculo

ANÁLISIS DE REGRESIÓN Y CORRELACIÓN LINEAL^{18, 19, 20}

El análisis de regresión se refiere a la predicción de datos a partir de la relación entre dos o más variables.

Una incógnita importante que debe despejarse en el análisis de regresión es la forma general de la expresión matemática que se piensa puede explicar el comportamiento del fenómeno en base a los indicativos seleccionados; la forma puede deducirse del conocimiento del propio fenómeno, o por consideraciones gráficas si hay una relación definida entre las variables, a tales diagramas se les conoce como diagramas de dispersión.

La curva de regresión es aquella a la cual tienden a aproximarse los puntos del diagrama de dispersión. En particular, la curva de regresión es una recta de regresión cuando la relación funcional entre las dos variables es lineal. La ecuación de la curva por lo tanto se llama ecuación de regresión y para una relación lineal se tiene la siguiente forma:

$$y = a_0 + a_1x$$

En el análisis de regresión es importante indicar explícitamente cual es la variable independiente y cual la dependiente, expresando que la curva de regresión o su ecuación de regresión es de " y sobre x " cuando sirva para predecir valores de la variable dependiente y dados los valores de la variable independiente x. Existen diversos métodos que permiten determinar estos parámetros; al que aquí se hace referencia es el conocido como el método de los mínimos cuadrados.

Para obtener la ecuación de regresión de un fenómeno en estudio, después de haber determinado la forma general de ésta en un diagrama de dispersión, deben de determinarse los valores de los parámetros desconocidos que definen el ajuste a una recta promedio.

El método de mínimos cuadrados supone se encuentre el mejor ajuste recurriendo a la ecuación de la forma

$$y = a_0 + a_1x$$

donde y representa el valor estimado de y que corresponde a un particular de x. El método de cuadrados mínimos requiere que encontremos las constantes a_0 y a_1 , tales que $\sum (y - \hat{y})^2$ sea tan pequeña como se pueda, en la figura 26 muestra una de esas diferencias $(y - \hat{y})$

como un segmento de recta y el posible mejor ajuste. La curva se traza buscando se obtengan las mínimas diferencias de todos los valores individuales ($y - \hat{y}$).

La ecuación de una línea de mejor ajuste está completamente determinada por su pendiente (a_1) y su intercepción en el eje de coordenadas y (a_0). Los valores de estas constantes, que satisfacen los criterios de cuadrados mínimos, se encuentran mediante dos fórmulas:

$$a_0 = \frac{(\sum y) (\sum x^2) - (\sum x) (\sum xy)}{n (\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$a_1 = \frac{n (\sum xy) - (\sum x) (\sum y)}{n (\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

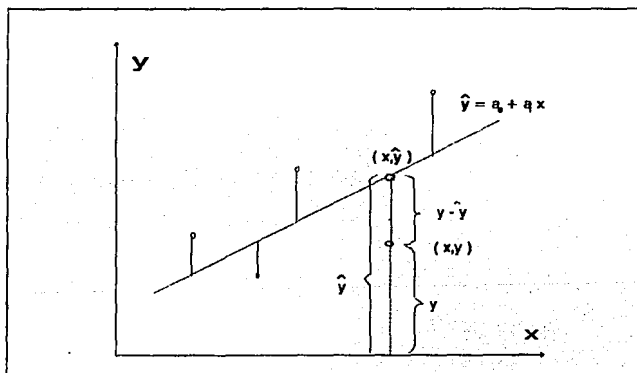
Por otro lado el análisis de correlación se dirige sobre todo a medir la fuerza de una relación entre variables, y es representado por coeficiente de correlación lineal r . La fortaleza de la relación se determina mediante la magnitud del efecto que cualquier cambio en una variable ejerce sobre la otra. Si al crecer x no se observan modificaciones definidas en los valores de y , se dice que no se encuentra correlación, en cambio, si cuando aumenta x observamos cambios definidos en los valores de y , se dice que la correlación es positiva (o negativa) cuando y aumenta (o decrece). La fuerza de la relación se determina a partir del grado de precisión con que se desplazan los valores de y cuando x cambia. Si los datos quedan en una recta horizontal o vertical, hablamos de una correlación cero, pues los cambios en una variable no tienen efecto sobre la otra.

El coeficiente de correlación lineal r , tendrá siempre un valor entre -1 y $+1$, por lo que un valor de r igual a uno, se referirá a una correlación perfecta: El coeficiente r se calcula de la siguiente forma:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}}$$

Una vez obtenido el coeficiente de correlación, es posible emplearlo para encontrar otra medida de referencia en el análisis de correlación, esta se conoce como coeficiente de determinación r^2 . El coeficiente de determinación mide la proximidad del ajuste de la

ecuación de regresión a los valores observados de Y. El valor máximo que puede tomar r^2 es 1, cuando r^2 es igual a 1 es por que todas las observaciones caen sobre la recta de regresión. Entonces cuando el valor de r^2 es grande, la regresión ha tenido en consideración una gran proporción de la variabilidad total de los valores observados de Y y se ve aceptable la ecuación de regresión. Por otra parte, un r^2 pequeño, indica una falla de la regresión para explicar una gran proporción de la variación total en los valores observados de Y, y tiende a arrojar dudas sobre la utilidad de la ecuación de regresión.



MÉTODO DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS.

ANÁLISIS DE VARIANZA^{19,20}

Se emplea en el caso de trabajar con un único factor, es el diseño más simple y se caracteriza porque las unidades experimentales (u.e.) se obtienen de una manera completamente aleatorizada. El propósito de este tipo de diseño es inferir sobre los efectos en la aplicación de un tratamiento a las distintas u.e., para estimar si existe o no diferencia significativa entre los tratamientos.

El análisis de varianza que a continuación se describe se cita mediante el siguiente

formato: 1 Modelo
 2 Suposiciones
 3 Hipótesis
 4 Cálculos
 5 Tabla ANDEVA
 6 Decisión

1 Modelo

$$x_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij} \quad \dots\dots(A)$$
$$i = 1, 2, \dots, n,$$
$$j = 1, 2, \dots, n_i$$

DONDE:

x_{ij} : j-ésima observación del i-ésimo tratamiento.
 μ : media general.
 τ_i : efecto del i-ésimo tratamiento.
 e_{ij} : error que difiere de los valores del grupo.
 n_i : número de observaciones por tratamiento.

2 Suposiciones

En el conjunto de suposiciones que se adopte en un caso particular depende de la manera en que se seleccionan los tratamientos. Se tienen dos casos, que por lo común se conocen como modelos de efectos fijos, o modelo I, y modelo de efectos aleatorios, o modelo II.

Los cálculos son los mismos para ambos modelos; la distinción sólo proviene de la interpretación de los resultados cuando los parámetros de interés son las medias.

En el modelo de EFECTOS FIJOS los efectos de los tratamientos se definen como desviaciones de la media general: $\sigma^2 = 0$, y el procedimiento sirve para probar la igualdad de los efectos de los t tratamientos:

$$\bar{x}_{..} = T_{..}/N, N = \sum_{j=1}^k n_j$$

5 TABLA DE ANDEVA

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón de varianza
Entre los grupos	$SC_{entre} = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_{.j} - \bar{x}_{..})^2$ $= \sum_{j=1}^k \frac{T_{.j}^2}{n_j} - \frac{T_{..}^2}{N}$	k - 1	$CM_{entre} = \frac{SC_{entre}}{(k-1)}$	$R.V. = \frac{CM_{entre}}{CM_{dentro}}$
Dentro de los grupos	$SC_{dentro} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}^2 - T_{.j}^2$ $= \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}^2 - \sum_{j=1}^k T_{.j}^2$	N - k	$CM_{dentro} = \frac{SC_{dentro}}{(N-k)}$	
Total	$SC_{total} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}^2$ $= \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}^2 - \frac{T_{..}^2}{N}$	N - 1		

6 Decisión.

Para llegar a una decisión debe compararse la R.V calculada con el valor crítico de F respecto a las suposiciones que se habían planteado en un principio, el valor se obtiene de tablas de distribución F

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2 \quad H_a: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 = \dots \neq \sigma_k^2$$

PRUEBA: si $C.M.T / C.M.E. \geq F(t-1, N-t)$ se rechaza H_0 . Si H_0 es cierta, cada observación se considera como la media general más una realización o valor aleatorio $x_{ij} = \mu + e_{ij}$.

Cuando se seleccionan aleatoriamente t tratamientos de todos los posibles de la población de tratamientos, se tiene el modelo de EFECTOS ALEATORIOS. En tanto los niveles de los tratamientos se escogen aleatoriamente, son válidas las inferencias sobre la población entera de los tratamientos. El modelo se diferencia de (A) en que tanto los σ_i y los e_{ij} son variables aleatorias. Además en este último caso se prueba:

$$H_0: \sigma_i^2 = 0 \quad H_a: \sigma_i^2 > 0$$

PRUEBA: si $C.M.T / C.M.E. \geq F(a, t-1, N-t)$ se rechaza H_0 .

3 Hipótesis.

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$ H_a : no todos los μ_j son iguales

En este punto, se elige el nivel de significación.

4 Cálculos

La discusión de los cálculos se facilitará si se preparan unas tablas

VALORES DE LA MUESTRA PARA EL ANÁLISIS DE VARIANZA

	Tratamientos			
	1	2	3	... k
x_{11}	x_{12}	x_{13}	...	x_{1k}
x_{21}	x_{22}	x_{23}	...	x_{2k}
x_{31}	x_{32}	x_{33}	...	x_{3k}
.
.
.
x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	...	x_{nk}
Total $T_{.j}$	$T_{.j}$	$T_{.j}$		$T_{.j} \quad T_{..}$
Media $\bar{x}_{.j}$	$\bar{x}_{.j}$	$\bar{x}_{.j}$		$\bar{x}_{.j} \quad \bar{x}_{..}$

Donde:

x_{ij} = la i -ésima observación que recibe el j -ésimo tratamiento.

$i = 1, 2, \dots, n_j, j = 1, 2, \dots, k$

$T_{.j} = \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}$ = total de la j -ésima columna

$\bar{x}_{.j} = T_{.j} / n_j$ = media de la j -ésima columna

$T_{..} = \sum_{j=1}^k T_{.j} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}$ = total de todas las observaciones

UTILIDAD Y VENTAJAS:

El análisis de varianza es útil cuando las u.e. son esencialmente homogéneas; esto es, cuando la variación entre ellas es pequeña; en tanto se asignan los tratamientos a las u.e. en forma totalmente aleatoria, cada unidad experimental tiene la misma probabilidad de recibir cualquier tratamiento. Su principal ventaja es que el número de repeticiones y tratamientos está limitado sólo por el número de u.e. disponibles. El número de repeticiones puede variar de tratamiento a tratamiento, aunque es deseable el mismo número para cada uno de los tratamientos.

El número de grados de libertad asociado con el cuadrado medio del error es mayor que en cualquier otro diseño con aleatorización restringida (como es el caso de bloques al azar). Además, las observaciones faltantes no crean problemas en el análisis de estudios de factores individuales. Por último, se debe mencionar que es el diseño que requiera menos supuestos.

DESVENTAJAS:

INEFICIENCIA: En tanto la aleatorización no tiene restricciones, el error experimental incluye la variación debida a las diferencias entre las u.e. Cuando las unidades experimentales son heterogéneas, los diseños con aleatorización restringida (por ejemplo con Bloques Aleatorios, explícitamente considera que existen diferencias entre las u.e.), pueden reducir el error experimental y obtener resultados más precisos.

DISÑO DE BLOQUES ALEATORIOS^{19,20}

El diseño de bloques aleatorios es un diseño en el que las unidades experimentales a las cuales se les aplican los tratamientos, se subdividen en grupos homogéneos llamados bloques, de modo que el número de u.e en un bloque es igual al número de tratamientos que se están estudiando, entonces se asignan los tratamientos a las u.e dentro de cada bloque. Debe hacerse resaltar de que cada tratamiento aparece en todos los bloques y cada bloque recibe todos los tratamientos. El diseño de bloques aleatorios es muy similar al de varianza, el objetivo de usar el diseño en bloques aleatorios es aislar y eliminar del término del error, la variación atribuible a los bloques, a la vez que se adquiere la seguridad de que las medias de los tratamientos se liberan de los efectos del bloque. La efectividad del diseño depende de la habilidad de lograr bloques homogéneos de u.e.

La forma de presentar el diseño de bloques aleatorios será muy simplificada pues los cálculos son muy similares a los del diseño anterior, presentándose sólo lo más relevante.

1 modelo

$$x_{ij} = \mu + \beta_i + \tau_j + e_{ij}$$
$$i = 1, 2, \dots, n;$$
$$j = 1, 2, \dots, k$$

Donde:

- x_{ij} = es un valor típico de la población en total
- μ = es una constante desconocida
- β_i = representa un efecto de bloque que refleja el hecho de que la unidad experimental cayó en el i-ésimo bloque
- τ_j = representa un efecto de tratamiento, que refleja el hecho de que la unidad experimental recibió el j-ésimo tratamiento
- e_{ij} = es un componente residual que representa todas las fuentes de variación que no sean los tratamientos y los bloques.

2 Suposición e hipótesis

M. Efectos fijos

M. efectos aleatorios

$$H_0: \Gamma_1 = \Gamma_2 = \dots = \Gamma_k$$

$$\sigma^2 = 0$$

$$H_a: \Gamma_i \neq \Gamma_j \text{ para alguna } i \neq j$$

$$\sigma^2 > 0$$

PRUEBA: si $C.M.T / C.M.E. \geq F [\alpha, t-1, (t-1)(r-1)]$ se rechaza H_0 .

VALORES DE LA MUESTRA PARA EL DISEÑO DE BLOQUES ALEATORIOS

Bloques	Tratamientos					Total	Media
	1	2	3	...	K		
1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	...	x_{1k}	T_1	\bar{x}_1
2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	...	x_{2k}	T_2	\bar{x}_2
3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	...	x_{3k}	T_3	\bar{x}_3
.
.
.
n	x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	...	x_{nk}	T_n	\bar{x}_n
Total	$T_{.1}$	$T_{.2}$	$T_{.3}$...	$T_{.k}$	$T_{..}$	
Media	$\bar{x}_{.1}$	$\bar{x}_{.2}$	$\bar{x}_{.3}$...	$\bar{x}_{.k}$		$\bar{x}_{..}$

TABLA DE ANDEVA PARA DISEÑO DE BLOQUES ALEATORIOS

Fuente	SC	g.l	CM	R.V
Tratamiento	SCtratamientos	(k - 1)	CMtrat= SCtr/(k-1)	CMT/ CMr
Bloques	Scbloques	(n - 1)	CMbloq= SCb/(n-1)	
Residual	SCresidual	(n-1)(k-1)	CMresidual= SC/(n-1)(k-1)	
Total	SCtotal	kn - 1		

$$SC_{total} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n x_{ij}^2$$

$$SC_{bloques} = \sum_{i=1}^n \frac{T_i^2}{k} - C$$

$$SC_{\text{tratamientos}} = \sum_{j=1}^k \frac{T_{.j}^2}{n} - C$$

$$SC_{\text{residual}} = SC_{\text{total}} - SC_{\text{bloques}} - SC_{\text{tratamientos}}$$

$$C = (\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n)^2 / Kn = T^2 \dots / kn$$

C es un término de corrección.

VENTAJAS:

- 1.- Si el agrupamiento -bloqueo- es efectivo, los resultados son sustancialmente más precisos que en un DCA de tamaño comparable.
- 2.- Puede acomodar cualquier número de tratamientos y repeticiones.
- 3.- El análisis estadístico es relativamente simple.
- 4.- La variabilidad de las u.e. puede introducirse deliberadamente para ampliar el rango de validez de los resultados experimentales sin sacrificar la precisión.

DESVENTAJAS:

- 1.- Las observaciones faltantes dentro de un bloque exigen cálculos adicionales: es un problema muy serio si existen muchas observaciones faltantes.
- 2.- Los grados de libertad para el error experimental no son tan grandes como en el análisis de varianza, por lo que se aumenta el cuadrado medio del error.
- 3.- Se requieren más supuestos para este modelo que para el de varianza:
 - No hay interacciones entre tratamientos y bloques.
 - Varianza constante de bloque a bloque.

APOYO BIBLIOGRÁFICO

1. Berry R. Ira and Nash A. Robert. Pharmaceutical process validation, U.S.A, 1993, Vol. 57. (Segunda edición).
2. B. Williams, Arthur. Amplificadores operacionales teoría y sus aplicaciones (Serie de circuitos integrados), Mc Graw-Hill, México, 1990.
3. B. Williams, Arthur. Circuitos lógicos y conversión de A/D y D/A, (Serie de circuitos integrados), Mc Graw-Hill, México, 1990.
4. Carleton F. V. and Agalloco V. P. Validation of aseptic pharmaceutical processes, Marcel Dekker Inc., U.S.A., 1986 (primera edición).
5. Doebelin, Ernesto. Measurement systems applications and design, McGraw-Hill, Washington, 1983.
6. Dossat J. Roy. Principios de refrigeración, CECSA, México, 1990 (Novena reimpresión).
7. Halliday David, et al. Fundamentos de física, Continental, México, 1987 (tercera impresión)
8. Holman P. Jack. Métodos experimentales para ingenieros, Mc Graw-Hill México, 1990 (Segunda edición).
9. Kramer Amihud. 1976. Testing of time - temperature indicating and defrost devices, Food technology, Vol. 30, No 2, Pag. 50.
10. Leblanc D. I. 1988. Time - Temperature indicating devices for frozen foods, Canadian institute of food science and Technology Journal, Vol. 21, No. 21, Pag. 236.
11. Lee L. Martin, et al. 1988. Statistical evaluation of quality control tests, Pharmaceutical technology, Septiembre, pag.108.
12. Manual de circuitos eléctricos , phillips. 1988
13. Manual INTERSIL, México, 1990.
14. Mutis E. Hernando. HERMUT paquete de estadística, Tesina instituto de investigación en matemáticas aplicadas y en sistemas (I.I.M.A.S.), UNAM, México 1992.
15. National Bureau of Standards, Reference Tables for Thermocouples, United States Department of Commerce 1955.

16. Olvera Arana, Pablo. Anteproyecto de un procedimiento para la verificación de instrumentos de termometría y manometría en un laboratorio de calibración, Tesina Facultad de Química, UNAM. México 1991.
17. Olivera S. Antonio, y Zuñiga B. Sergio. 1977. Serie de probabilidad y estadística, Impos editores, México, 1977
18. Omega Technologies Company Engineering. Temperature measurement, Handbook and Encyclopedia, USA, 1989.
19. Petros S. Taoukis, et al. 1991. Time - Temperature indicators, Food Thechnology, Vol. 45, No. 10, Pag. 68.
20. P. J. Rapín. Instalaciones frigoríficas, Marcombo, España, 1979 (Volumen II).
21. R. Johnson Robert. Estadística elemental, Trillas, México, 1990 (Segunda edición).
22. R. S. Sirohi. y H. C. Radha. Mediciones mecánicas, Limusa, México, 1986.
23. Secretaría de comercio y fomento industrial. Instrumentos de medición-termómetros industriales de vidrio, Norma Oficial Mexicana de Metrología, Dirección General de Normas, 1985.
24. Tippens E. Paul. Física, Mcgraw-Hill, México, 1988 (tercera edición)
25. Van de Voort R. F., et al. 1987. A practical thermocouple for temperature measurement in microwave ovens, Canadian Institute of food science and technology journal, Vol. 20, No. 4, Pag. 279.
26. V.P. Preobrazhenski. Mediciones termoeléctricas y aparatos para efectuarlas, Mir. Moscú, U. R. S. S., 1980, tomo I.
27. Wahl. Temperatura instruments, Handbook, USA, 1990.
28. Wayne W. Daniel. Bioestadística, Limusa, México, 1985 (sexta reimpresión)
29. Wells H. John and R. P. Singh. 1985. Performance evaluation of time-temperatura indicators for frozen food transport, Journal of food science, Vol. 50, No.2, Pag.369.
30. World health organization committee on specifications for pharmaceutical preparations, Good manufacturing practices for pharmaceutical products (guidelines on the validation of manufacturing processes), 32^{vo} Reporte, Geneva, 1992.
31. W. Cable, David and Saaski, E. 1990. Fiberoptic pressure measurement of spontaneous bumping / splattering of foods during microwaving, Food technology, Vol. 44, No. 6, Pag. 120.

32. W. Gruenwedel, Dieter et al. Food analysis (Physicochemical) Techniques, New York, 1987 (volumen 2)
33. W. Larry Paul. 1991. USP Perspectives on analytical methods validations, Pharmaceutical technology, marzo, pag. 130.
34. Yazbak Gene. 1990. Fiberoptic sensors solve measurement problems, Food technology, Vol. 44, No. 6.