

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica,
Mecánica Eléctrica y Mecatrónica



**DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN MÓDULO DE MEDICIÓN
DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO TRANSITORIO
DEL HILO CALIENTE**

Tesis presentada por el Bachiller:

Merello Portocarrero, Gonzalo

para optar el Título Profesional de

Ingeniero Mecatrónico

Asesor:

Dr. Alcazar Rojas, Herman Enrique

Arequipa – Perú

2021

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 25 de Enero del 2021

Dictamen: 002029-C-EPIMMEM-2021

Visto el borrador de tesis del expediente 002029, presentado por:

2013202731 - MERELLO PORTOCARRERO GONZALO

Titulado:

**DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN MÓDULO DE MEDICIÓN DE
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO TRANSITORIO DEL HILO
CALIENTE**

Nuestro dictamen es:

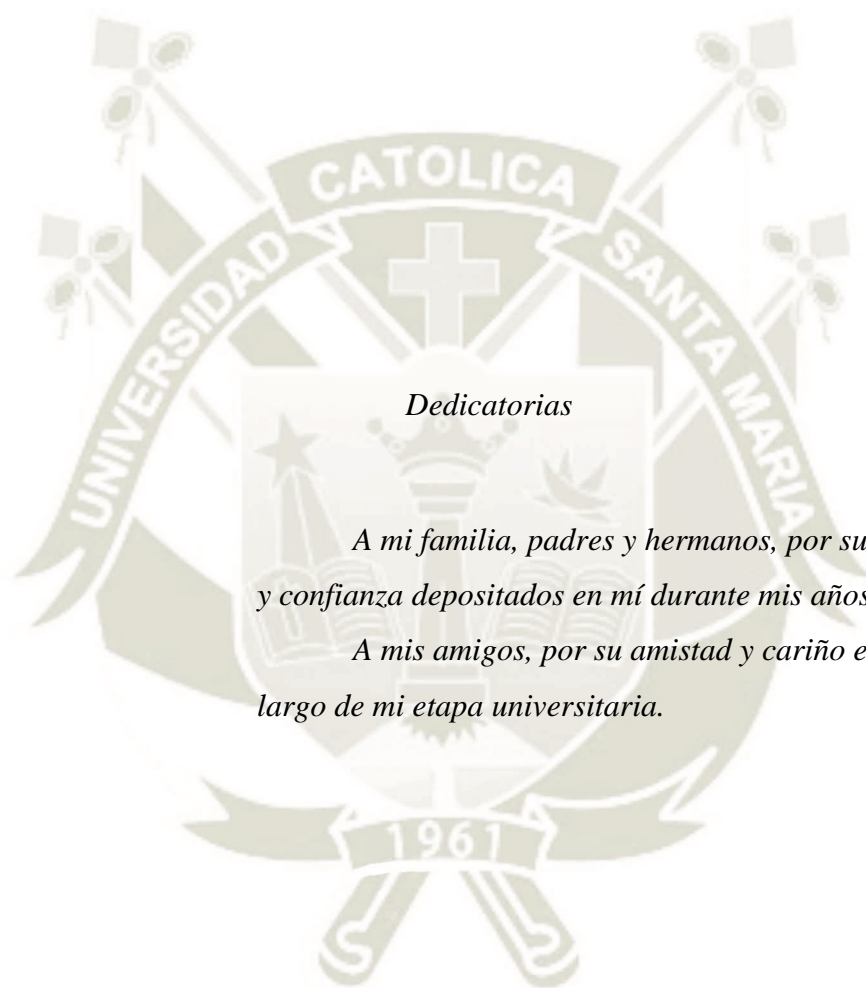
APROBADO

**1530 - FERNANDEZ BARRIGA CAMILO GRIMALDO
DICTAMINADOR**

**1828 - GORDILLO ANDIA CARLOS ALBERTO
DICTAMINADOR**

**2776 - COLLADO OPORTO CHRISTIAM GUILLERMO
DICTAMINADOR**





Dedicatorias

*A mi familia, padres y hermanos, por su amor, paciencia
y confianza depositados en mí durante mis años de estudio.*

*A mis amigos, por su amistad y cariño entregados a lo
largo de mi etapa universitaria.*

Agradecimientos

A mis padres, por su gran amor y apoyo incondicional, por darme la oportunidad de desarrollarme personal y profesionalmente.

Dr. Hermann Alcázar, por su guía continua a través de la elaboración de esta tesis, y al equipo de trabajo del Laboratorio de Investigación de Ciencia de los Materiales por el apoyo e instalaciones brindadas para la investigación.

A la Universidad Católica de Santa María, a la plana docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica, quienes orientaron mi aprendizaje y fomentaron mi pasión por la ingeniería.

RESUMEN

Un módulo de medición de conductividad térmica según el método transitorio del hilo caliente ha sido diseñado, implementado y calibrado en el laboratorio de investigación de ciencia de los materiales de la Universidad Católica de Santa María. El módulo presenta una interfaz de usuario programada en el software LabView, medio por el cual se facilita la adquisición y procesamiento de datos. Se empleó un hilo caliente de platino de diámetro $101.6\mu\text{m}$ que porta una capa aislante otorgándole la capacidad de medir propiedades térmicas en fluidos eléctricamente conductivos. Distintas correcciones del modelo ideal previamente estudiadas en la literatura son analizadas durante la implementación del módulo. Se realizaron mediciones empleando etilenglicol (EG) y agua destilada (DW) como fluidos muestra, aplicando distintos parámetros de medición como la longitud del hilo caliente, las dimensiones de la celda de medición, el tiempo de medición y tiempo de reposo entre otros. Los resultados obtenidos por el módulo demuestran una gran conformidad con datos reportados en la literatura, logrando incertidumbres estimadas de hasta 0.15% y 0.25% para las muestras de etilenglicol y agua destilada respectivamente. El módulo fabricado reportó valores eficientes y recomienda su uso para futuras mediciones en nanofluidos producidos en el laboratorio.

Palabras clave:

Módulo de medición, Conductividad térmica, Método transitorio del hilo caliente, LabView interfaz.

ABSTRACT

An apparatus for the measuring of thermal conductivity using the transient hot wire method has been designed, implemented and calibrated at the investigation laboratory of materials science at the Universidad Católica de Santa María. The apparatus presents a user interface designed in LabView software, through which data acquisition and processing is facilitated. A 101.6 μm platinum hot wire that carries an insulating coating grants the capacity of measuring thermal properties in electrically conductive liquid fluids. Different corrections of the ideal model previously discussed in the literature were analyzed during the module implementation. Measurements were performed using ethylene glycol (EG) and distilled water (DW) as sample fluids, applying different measurement parameters such as hot wire length, measurement cell dimensions, measurement time, resting time and others. The obtained results by the apparatus show great accordance with reported data in the literature, accomplishing estimated uncertainties of 0.15% and 0.25% for the samples of ethylene glycol and distilled water respectively. The fabricated apparatus reported efficient values and recommends it's use for future measurements in nanofluids produced in the laboratory.

Key words:

Measurement apparatus, Thermal conductivity, Transient hot wire method, LabView interface.

Introducción

Como un medio de transferencia de calor con potenciales mejoras en su conductividad térmica, los fluidos tienen un gran campo de aplicaciones en la industria térmica. La conductividad térmica en los fluidos es una propiedad de gran interés, que permite su caracterización en sus distintas aplicaciones. Precizando las características térmicas de cada fluido, se puede lograr mejorar la eficiencia en sistemas cuyos principios de funcionamiento se basan en la transferencia de calor.

Para reconocer estas características se han propuesto una variedad de métodos capaces de medir las propiedades termodinámicas de fluidos líquidos. Los métodos para la medición de la conductividad térmica han sido divididos en técnicas de estado estable y técnicas transitorias.

A través de los años, los métodos más empleados que aplican la técnica transitoria, han sido el analizador de constantes térmicas (Jiang, Ding, & Peng, 2008), el método de omega-3 (Karthik, Harish Nagarajan, Raja, & Damodharan, 2012) y método de fuente de plano transitorio (Zhu, y otros, 2009). Estos métodos fueron ganando importancia midiendo las propiedades basadas en soluciones de estado inestable, pero el diseño y construcción de estos dispositivos son complejos y reservados. Adicionalmente, otro método es el del hilo caliente que utiliza un hilo delgado como fuente de calor y sensor de temperatura en una muestra de fluido, el cual es uno de los métodos más empleados extensamente. (Paul, Chopkar, Manna, & Das, 2010)

Este proyecto presenta el diseño, implementación y calibración de un módulo capaz de medir la conductividad térmica de fluidos líquidos de forma rápida y precisa aplicando el método transitorio del hilo caliente.

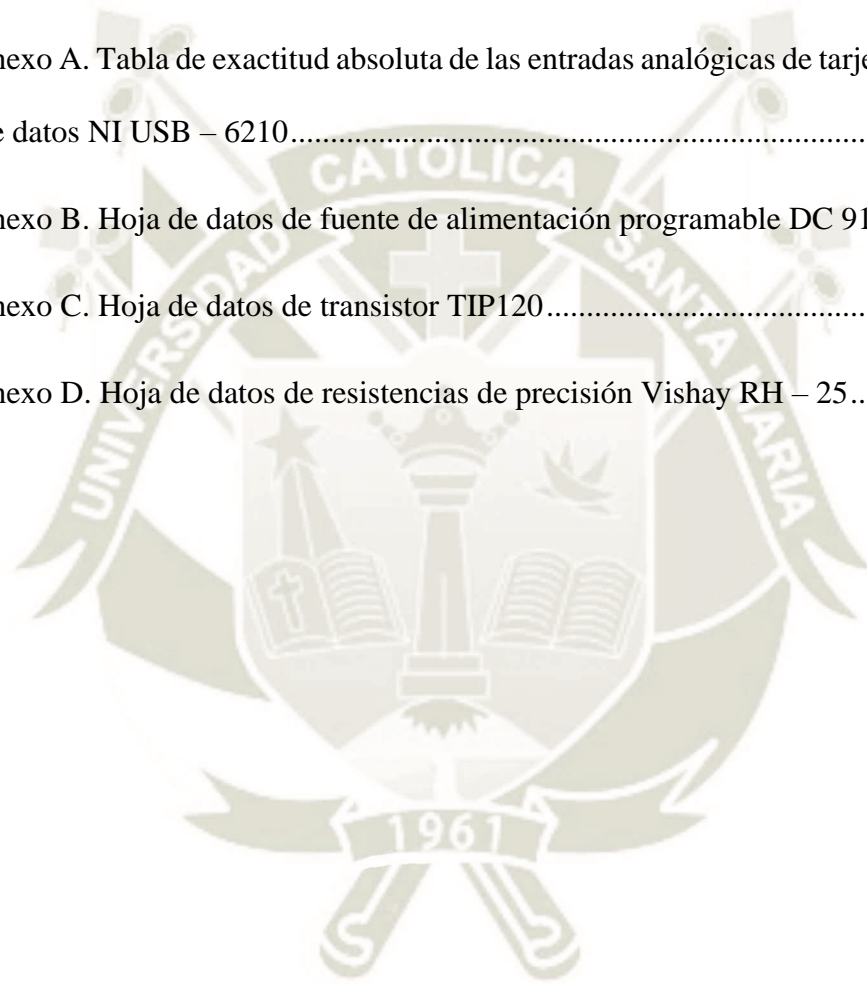
Índice de Contenidos

| | |
|---------------------------------------|------|
| DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR | ii |
| Dedicatorias..... | iii |
| Agradecimientos..... | iv |
| Resumen | v |
| Abstract | vi |
| Introducción | vii |
| Índice de Contenidos | viii |
| Índice de Tablas | xii |
| Índice de Figuras | xiii |
| Lista de Símbolos | xv |
| CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES | 1 |
| 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 1 |
| 2. HIPÓTESIS..... | 5 |
| 3. OBJETIVOS..... | 5 |
| 3.1 Objetivo general | 5 |
| 3.2 Objetivos específicos..... | 5 |
| 4. ALCANCES..... | 6 |
| 5. JUSTIFICACIÓN..... | 7 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 2 DISEÑO CONCEPTUAL | 8 |
| 1. ESTADO DEL ARTE | 8 |
| 1.1 Mecanismos de transferencia de calor | 10 |
| 1.2 Conductividad térmica | 11 |
| 1.3 Técnica del hilo caliente | 15 |
| 1.4 Correcciones del modelo ideal | 19 |
| 2. LISTA DE EXIGENCIAS | 21 |
| 3. ESTRUCTURA DE FUNCIONES | 24 |
| 4. MATRIZ MORFOLÓGICA | 27 |
| 5. CONCEPTO DE SOLUCIÓN | 30 |
| 5.1 Solución 1 | 30 |
| 5.2 Solución 2 | 30 |
| 5.3 Solución 3 | 31 |
| 6. CONCEPTO ÓPTIMO | 32 |
| CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL MÓDULO | 35 |
| 1. DISEÑO MECÁNICO | 35 |
| 1.1 Diseño y ensamble de la celda de medición | 35 |
| 1.2 Diseño de la fuente lineal de calor | 40 |
| 2. DISEÑO ELECTRÓNICO | 41 |
| 2.1 Diseño del puente de Wheatstone | 41 |

| | | |
|-----|---|----|
| 2.2 | Cálculo de voltaje a entregar al circuito electrónico | 42 |
| 3. | DISEÑO DE CONTROL | 46 |
| 3.1 | Adquisición de datos | 47 |
| 3.2 | Cálculo de la conductividad térmica | 49 |
| 3.3 | Diseño de la interfaz de usuario | 50 |
| 3.4 | Diagrama electrónico..... | 51 |
| 3.5 | Diagrama de interfaz de usuario..... | 52 |
| 3.6 | Diagrama de flujo | 55 |
| | CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL..... | 56 |
| 1. | UBICACIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN..... | 56 |
| 2. | MATERIALES E INSTRUMENTOS | 56 |
| 2.1 | Materiales | 56 |
| 2.2 | Instrumentos | 56 |
| 3. | PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL..... | 57 |
| | CAPÍTULO 5 RESULTADOS | 64 |
| 1. | MEDICIONES REALIZADAS | 64 |
| 2. | COSTOS..... | 69 |
| 2.1 | Costos de componentes | 70 |
| 2.2 | Costos de fabricación..... | 70 |
| 2.3 | Costos de diseño | 71 |

| | |
|---|----|
| 3. OBSERVACIONES..... | 71 |
| Conclusiones | 73 |
| Recomendaciones..... | 75 |
| Referencias | 76 |
| Anexo A. Tabla de exactitud absoluta de las entradas analógicas de tarjeta de adquisición de datos NI USB – 6210..... | 80 |
| Anexo B. Hoja de datos de fuente de alimentación programable DC 9120 ^a | 90 |
| Anexo C. Hoja de datos de transistor TIP120..... | 93 |
| Anexo D. Hoja de datos de resistencias de precisión Vishay RH – 25..... | 95 |



Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 1. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISTINTOS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS | 2 |
| TABLA 2. CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS DE ALGUNOS MATERIALES A LA TEMPERATURA AMBIENTE | 12 |
| TABLA 3. DIFERENCIAS ENTRE CONDICIONES IDEALES Y REALES EN UNA CELDA DE HILO CALIENTE | 19 |
| TABLA 4. MATRIZ MORFOLÓGICA - ACONDICIONAMIENTO | 27 |
| TABLA 5. MATRIZ MORFOLÓGICA - CONTROL | 28 |
| TABLA 6. EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA. VALOR TÉCNICO (Xi)..... | 32 |
| TABLA 7. EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA. VALOR ECONÓMICO (Yi) | 33 |
| TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE CELDAS DE MEDICIÓN | 36 |
| TABLA 9. RELACIÓN DIÁMETRO DE CELDA – DIÁMETRO DE HILO CALIENTE..... | 37 |
| TABLA 10. RELACIÓN DE ERROR CAUSADO POR EL PERÍMETRO FINITO DE LA CELDA | 37 |
| TABLA 11. ALTURA MÍNIMA Y VOLUMEN DE LA CELDA DE MEDICIÓN | 39 |
| TABLA 12. RANGO DE VOLTAJES DE OPERACIÓN | 46 |
| TABLA 13. VOLTAJES DE ALIMENTACIÓN PARA FLUJO DE INTENSIDAD ELÉCTRICA EN HILO CALIENTE | 61 |
| TABLA 14. COMPARACIÓN DE CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS MEDIDAS Y REFERENCIAS | 65 |
| TABLA 15. RESULTADOS DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ETILENGLICOL Y AGUA DESTILADA..... | 66 |
| TABLA 16. LISTA DE PARTES | 69 |
| TABLA 17. COSTOS TOTALES..... | 69 |
| TABLA 18. COSTOS DE COMPONENTES | 70 |
| TABLA 19. COSTOS DE FABRICACIÓN | 71 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 1.1. NANOTUBOS DE CARBONO CON TRATAMIENTO QUÍMICO EN AGUA ULTRA PURA | 3 |
| FIGURA 1.2. COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA NANOFUÍDOS | 4 |
| FIGURA 2.1. INSTRUMENTO KD2 PRO – MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA | 9 |
| FIGURA 2.2. RANGO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DIVERSOS MATERIALES A LA TEMPERATURA AMBIENTE | 13 |
| FIGURA 2.3. DEPENDENCIA DE TEMPERATURA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS NO METÁLICOS OBTENIDOS BAJO CONDICIONES SATURADAS..... | 14 |
| FIGURA 2.4. GRÁFICA SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA OBTENER LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA | 18 |
| FIGURA 2.5. GRÁFICA TÍPICA DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA CONTRA EL TIEMPO PARA UN EXPERIMENTO DEL HILO CALIENTE..... | 20 |
| FIGURA 2.6. DIAGRAMA BLACK BOX DE SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA..... | 25 |
| FIGURA 2.7. ESTRUCTURA DE FUNCIONES | 26 |
| FIGURA 2.8. EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA | 34 |
| FIGURA 3.1. MODELO FÍSICO DEL MÉTODO SHW | 38 |
| FIGURA 3.2. PUENTE DE WHEATSTONE..... | 42 |
| FIGURA 3.3. RELACIÓN ENTRE EL CAMBIO DE TEMPERATURA Y EL ERROR CAUSADO POR LA FUENTE DE CALOR NO CONSTANTE..... | 43 |
| FIGURA 3.4. VALORES DE RESISTENCIAS EN PUENTE DE WHEATSTONE..... | 45 |
| FIGURA 3.5. DISPOSITIVO DAQ USB 6210..... | 47 |
| FIGURA 3.6. DIAGRAMA DE TRANSISTOR TIP120. | 48 |
| FIGURA 3.7. DIAGRAMA ELÉCTRICO | 51 |
| FIGURA 3.8. INTERFAZ DE USUARIO – PANEL FRONTAL | 53 |
| FIGURA 3.9. INTERFAZ DE USUARIO – DIAGRAMA DE BLOQUES..... | 54 |
| FIGURA 3.10. DIAGRAMA DE BLOQUES DE PROCESOS (SUBVI)..... | 54 |
| FIGURA 3.11. DIAGRAMA DE FLUJO DE CONTROL | 55 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.1. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN..... | 57 |
| FIGURA 4.2. PRESENTACIÓN DE A CELDA VACÍA, B CELDA LLENADA CON ETILENGLICOL (EG), C CELDA CON AGUA DESTILADA (DW) Y D HILO CALIENTE EN BUENAS CONDICIONES DESPUÉS DEL LLENADO DE LA CELDA DE MEDICIÓN..... | 58 |
| FIGURA 4.3. INGRESO DE PARÁMETROS INICIALES EN LA INTERFAZ DE USUARIO..... | 59 |
| FIGURA 4.4. FUENTE DE VOLTAJE CONFIGURADA PARA LA CALIBRACIÓN DEL PUENTE DE WHEATSTONE..... | 59 |
| FIGURA 4.5. CALIBRACIÓN DE PUENTE DE WHEATSTONE..... | 60 |
| FIGURA 4.6. VOLTAJE EN PUENTE DE WHEATSTONE VS LOGARITMO DE TIEMPO – CALIBRACIÓN DE PUENTE DE WHEATSTONE..... | 60 |
| FIGURA 4.7. SEÑAL DE INICIO DE MEDICIÓN..... | 61 |
| FIGURA 4.8. A CAMBIO DE TEMPERATURA VS LN(T) B VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN Y C VOLTAJE EN PUENTE DE WHEATSTONE..... | 62 |
| FIGURA 4.9. A RANGO SELECCIONADO DE CAMBIO DE TEMPERATURA B CONDUCTIVIDAD TÉRMICA CALCULADA..... | 63 |
| FIGURA 4.10. OPCIONES DE GUARDADO EN INTERFAZ DE USUARIO..... | 63 |
| FIGURA 5.1. PRESENTACIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO DURANTE MEDICIÓN DE ETILENGLICOL (EG) EN A INTERFAZ EN ESTADO DE ESPERA B INTERFAZ EN ESTADO DE MEDICIÓN..... | 67 |
| FIGURA 5.2. PRESENTACIÓN DEL MÓDULO FABRICADO A VISTA EXTERIOR: CAJA DE ALUMINIO Y BORNES DE CONEXIÓN B VISTA INTERNA: TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, COMPONENTES ELECTRÓNICOS Y CABLEADO..... | 68 |

Lista de Símbolos

| | | |
|--|--|----------------------|
| \dot{Q} | Razón de transferencia de calor | [W] |
| k | Conductividad térmica | [W/mK] |
| A | Área perpendicular a la transferencia de calor | [m ²] |
| $\partial T/\partial x$ | Gradiente de temperatura | [K/m] |
| α | Difusividad térmica | [m ² /s] |
| r | Coordenada radial | [m] |
| q | Razón de transferencia de calor por unidad de longitud | [W/m] |
| ΔT | Cambio de temperatura | [K] |
| ρ | Densidad del medio | [kg/m ³] |
| c_p | Calor específico a presión constante del medio | [J/kgK] |
| g | Aceleración gravitacional | [m/s ²] |
| u, v | Componentes de velocidad | [m/s] |
| $\partial u/\partial x, \partial u/\partial y$ | Gradientes de velocidad | [1/s] |
| ν | Viscosidad cinemática | [m ² /s] |
| b | Diámetro interior de la celda de medición | [m] |
| h | Altura de celda de medición | [m] |
| $R_{S/V}$ | Relación superficie – volumen | [1/m] |
| a | Diámetro del hilo caliente | [m] |
| l_{min} | Longitud mínima del hilo caliente | [m] |
| l_w | Longitud del hilo caliente | [m] |

| | | |
|--------------|--|-------------------|
| V_{celda} | Volumen de la celda de medición | [m ³] |
| R_w | Resistencia eléctrica del hilo caliente | [Ω] |
| V_0 | Voltaje de alimentación | [V] |
| V_w | Voltaje eléctrico en el hilo caliente | [V] |
| I_w | Intensidad eléctrica en el hilo caliente | [A] |
| R_0 | Resistencia eléctrica inicial | [Ω] |
| TCR | Coefficiente térmico de resistividad | [1/K] |
| ΔT_w | Cambio de temperatura del hilo caliente | [K] |
| ΔV | Variación de voltaje | [V] |
| R_x | Resistencia eléctrica variable | [Ω] |
| I_b | Intensidad eléctrica de base | [A] |
| V_b | Voltaje eléctrico de base | [V] |
| VDC | Voltaje de corriente directa | [V] |
| GNDREF | Voltaje de referencia – Tierra | [V] |
| β | Coefficiente de expansión volumétrica | [1/K] |
| β | Constante de Euler | |
| E_1 | Integración exponencial | |
| subVI | Archivo VI – Subprograma | |
| AI | Entrada analógica | |

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el área térmica se presenta el desafío de mejorar la eficiencia en los sistemas de transferencia de calor, como por ejemplo la refrigeración industrial, que harían posibles grandes ahorros de energía y la considerable reducción de emisiones de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y dióxido sulfúrico.

Ocurre lo mismo en el campo automotriz, donde se requiere la remoción de calor en motores de combustión interna para implementar los diseños aerodinámicos de los vehículos. Asimismo, en el campo de la electrónica, donde la miniaturización de los dispositivos de refrigeración es beneficioso para optar por microchips más pequeños. Otro campo de aplicación es la biomedicina, donde se busca desarrollar sistemas de entrega de medicamentos con el fin de supervisar y controlar la actividad celular. (Wong & De Leon, 2009)

Para esto, es importante estudiar las propiedades de transferencia de calor de los fluidos compensando los bajos niveles de conductividad térmica que estos presentan y cumpliendo con los requerimientos del proceso, donde la aplicación de nanofluidos como un nuevo medio de transferencia de calor ha ganado atención por parte de investigadores desde la introducción de su concepto. (Choi & Eastman, 1995)

Con el avance de la nanotecnología se ha logrado producir partículas cuyo tamaño se encuentra en la escala de los nanómetros, llegando a alcanzar tamaños entre 1 y 100 nm. Estas partículas al ser dispersadas en un fluido base producen nanofluidos que reportan altos valores de conductividad térmica ante otros fluidos convencionales demostrando mejorar

significativamente los sistemas de transferencia de calor y masa al mantener un estado estable y homogéneo por largos periodos de tiempo. (Yazid, Sidik, & Yahya, 2017)

Se han realizado distintos estudios en los que se aplican pequeñas cantidades de nanopartículas de distintos materiales con altas conductividades térmicas, como cobre Cu, carburo de silicio SiC, óxido de aluminio Al₂O₃ y óxido de cobre CuO, en fluidos de sistemas de transferencia de calor para mejorar su conductividad térmica global. (Sabiha, Mostafizur, Saidur, & Mekhilef, 2015)

Los nanotubos de carbono son un nanomaterial cuyas propiedades térmicas, mecánicas y ópticas presentan gran potencial para su aplicación en nanofluidos con valores de conductividad térmica de hasta 3000 W/mK comparado a la plata (429 W/mK) y cobre (401 W/mK). Debido a su alto peso molecular son considerados insolubles en todos los solventes conocidos, por lo que tratamientos de dispersión son aplicados para obtener su conductividad térmica eficiente. (Rashmi, Ismail, & Mohammad, 2012)

Tabla 1. Conductividad térmica de distintos líquidos y sólidos

| Material | Form | Thermal Conductivity (W/m-K) |
|---------------------|-------------------|-------------------------------------|
| Carbon | Nanotubes | 1,800–2,000 |
| | Diamond | 2,300 |
| | Graphite | 110–190 |
| | Fullerenes (film) | 0.4 |
| Metallic Solids | Silver | 429 |
| | Copper | 401 |
| | Aluminum | 237 |
| | Nickel | 158 |
| Non-Metallic Solids | Silicon | 148 |
| | Alumina | 40 |
| Metallic Liquids | Sodium @644K | 72.3 |
| | Water | 0.613 |
| Others | Ethylene Glycol | 0.253 |
| | Engine Oil | 0.145 |

Fuente: (Marquis & Chibante, 2005).

En las instalaciones del laboratorio de investigación de ciencia de los materiales de la Universidad Católica de Santa María se tienen registros de la elaboración de nanofluidos a partir de nanotubos de carbono y agua desionizada, ver Figura 1.1. Estos nanofluidos fueron analizados en su dispersión y estabilidad de nanopartículas en el fluido base, además de ser tratados químicamente para reducir aglomerados. (Marron Matta, 2018)

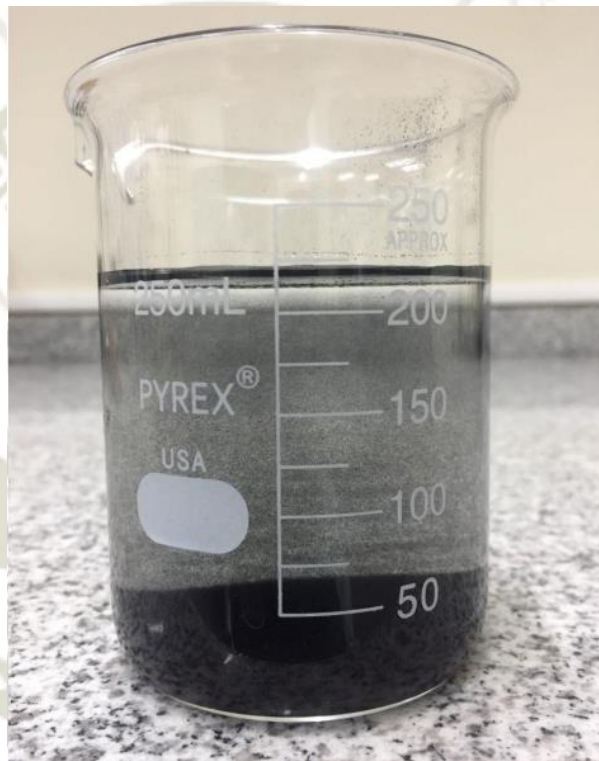


Figura 1.1. Nanotubos de carbono con tratamiento químico en agua ultra pura
Fuente: (Marron Matta, 2018).

Estudios continuos buscan analizar los nanofluidos producidos para medir su conductividad térmica en dichos líquidos y registrar mejoras en la capacidad de transferencia de calor ante otros fluidos no tratados como el agua comúnmente usada en los sistemas de transferencia de calor, por tanto, la medición de la conductividad térmica juega un rol importante en la caracterización de fluidos para escoger su aplicación adecuada. Sin embargo, el

equipamiento actual del laboratorio no cuenta con el medio necesario para medir dicha propiedad, por lo que no se puede registrar resultados sobre la eficiencia de los nanofluidos producidos.

Existen diversos enfoques para medir la conductividad térmica en nanofluidos, entre los cuales se mencionan la técnica del plato paralelo (STPPH), método de cilindros coaxiales (SSCCM), técnica de oscilación de temperatura (TOT) y método transitorio del hilo caliente (THW), siendo este último uno de los más empleados debido a sus cortos tiempos de medición y su simple operación. (Wenwen, Guoneng, Youqu, & Cong, 2018)

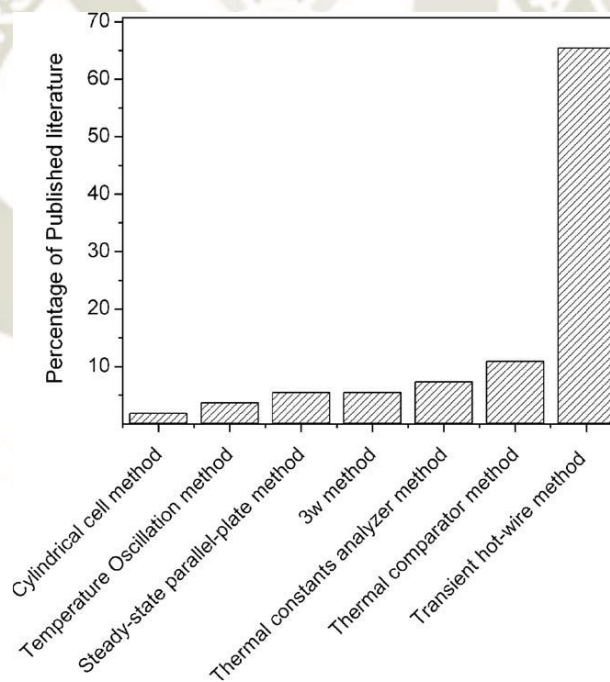


Figura 1.2. Comparación de técnicas de medición de conductividad térmica para nanofluidos
Fuente: (Paul, Chopkar, Manna, & Das, 2010).

El principio general del método transitorio del hilo caliente consiste en la generación de calor a través de una delgada fuente de calor que a su vez actúa como sensor de temperatura. Una limitación de este método es la realización de mediciones en líquidos eléctricamente

conductivos como es el caso de los nanofluidos. Para esto, se han empleado hilos delgados cubiertos con una capa aislante que harían posible realizar mediciones en líquidos eléctricamente conductivos. El uso de esta capa aislante tiene un impacto mínimo en las mediciones realizadas en tiempos relativamente largos. (Yu & Choi, 2006)

2. HIPÓTESIS

Un módulo implementado será capaz de medir la conductividad térmica de la muestra de fluido líquido. Con la aplicación de un método transitorio se podrá evaluar y analizar las propiedades térmicas de cada fluido muestra, permitiendo caracterizarlo de una manera eficiente. Para certificar la validez de la medición de la conductividad térmica de la muestra, se comparará con los valores ya establecidos para el mismo fluido como por ejemplo agua destilada (DW) y etilenglicol (EG), donde el margen de error oscilará entre rangos aceptables.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Implementar un módulo para la medición de conductividad térmica de fluidos líquidos para evaluar y analizar las propiedades térmicas de cada fluido muestra y generar su caracterización.

3.2 Objetivos específicos

- Obtención de mediciones a partir de la aplicación de técnicas dinámicas basadas en la medición del cambio de temperatura.

- Corroborar el funcionamiento óptimo del módulo comparando los resultados obtenidos con valores reportados en la literatura estudiada.
- Minimizar el margen de error de medición a partir de la adecuada selección y calibración de componentes e instrumentación para mediciones exactas.
- Elaborar un sistema de supervisión y adquisición de datos óptimo para la toma de mediciones según los parámetros planteados.

4. ALCANCES

En el proyecto presentado, se contempla las condiciones necesarias, por medio de la información obtenida en libros, publicaciones y artículos científicos, para la medición sistemática de la conductividad térmica a través del diseño e implementación de un módulo orientado para el trabajo con fluidos líquidos aplicando la técnica transitoria del hilo caliente. El módulo pretende su uso para la medición de conductividad térmica de nanofluidos de nanotubos de carbono producidos en el laboratorio.

El proyecto incluye la ejecución e interpretación de resultados para la caracterización de fluidos líquidos a partir de su conductividad térmica, además del análisis propio del método de medición a aplicar, modelos matemáticos, parámetros y calibración de la instrumentación necesaria para obtener resultados que concuerden con los valores reportados en la literatura estudiada.

5. JUSTIFICACIÓN

La conductividad térmica es una propiedad intrínseca de los materiales que condiciona la capacidad de conducir el calor a través de ellos. Esta es importante en la indispensable demanda de sistemas refrigerantes más eficientes. La aplicación de fluidos líquidos en su estado natural no es suficiente para cumplir con las expectativas de los procesos industriales deseados, debido a que su coeficiente de conductividad térmica es muy limitado.

Gracias al avance tecnológico, hoy en día se puede contar con fluidos líquidos con mejores propiedades térmicas como es el caso de los nanofluidos, que ha generado un gran impacto en todos los sistemas cuyo principio de funcionamiento es la transferencia de calor. Este mejoramiento atribuido por mayores coeficientes de conductividad térmica permite aumentar la eficiencia de la transferencia de calor. Además, los sistemas de enfriamiento deben ser lo suficientemente compactos y fáciles de manipular dado un ambiente de operación normal.

La mayoría de trabajos reportan la medición de la conductividad térmica por medio de la técnica del alambre o hilo caliente. Por tanto, como primer paso en esta investigación es diseñar e implementar un sistema basado en esta técnica, lo que constituye el objetivo de esta tesis. Una vez implementado, se realizarán mediciones en líquidos cuyos coeficientes de conductividad térmica son reconocidos en estudios ya realizados para validar el correcto funcionamiento del mismo. Más adelante se podrá obtener resultados que caractericen a los fluidos líquidos según su conductividad térmica como es el caso de los nanofluidos y registren mejoras en sus propiedades.

CAPÍTULO 2

DISEÑO CONCEPTUAL

En el diseño conceptual se evaluó las exigencias del módulo las cuáles son útiles para determinar las funciones que este mismo tendrá. Dado esto, se podrá analizar por medio de una matriz morfológica las diferentes soluciones disponibles para el diseño e implementación del módulo. Finalmente se describirán las soluciones planteadas de las cuales se elegirá el concepto solución óptimo a través de un análisis técnico-económico.

1. ESTADO DEL ARTE

Hoy en día existen instrumentos de diversos laboratorios diseñados para medir distintas propiedades térmicas como la conductividad térmica, la difusividad térmica, el calor específico y la resistividad térmica, entre otras. Estos instrumentos se basan en las diversas técnicas existentes para medir la conductividad térmica a través de sus modelos matemáticos integrados reservados al público. En la Figura 2.1 se puede apreciar un ejemplo.



Figura 2.1. Instrumento KD2 Pro – Medidor de conductividad térmica
Fuente: Decagon Devices Inc.

Estos instrumentos proporcionan su propia interfaz e instrumentación diseñados para muestras de tipos específicos, donde el estado de la materia, rango de temperaturas de operación entre otras influyen en las medidas del instrumento. Algunos tienen la ventaja de cumplir con estándares de medición de conductividad térmica como la IEEE y ASTM entre otras. Sus desventajas consisten en un elevado costo de adquisición, su incapacidad de acondicionarlos a condiciones más críticas ya que son instrumentos compactos y presentan una escasa popularidad de su uso en fuentes de investigación.

En literatura tanto reciente como pasada, existe una tendencia por parte de los autores a fabricar sus propios módulos de medición de conductividad térmica, esto les permite aplicar modificaciones a sus módulos dependiendo de las propiedades físicas de la muestra a medir, así como mostrar resultados a partir de instrumentos con parámetros diferentes como dimensionamiento o el tipo de material de los cuales están hechos. En lo que respecta a muestras de fluidos líquidos, la técnica transitoria del hilo caliente es la más empleada entre otras debido a sus diversas ventajas como lo indican diversos autores.

Finalmente, el trabajo de investigación presentado por Alvarado (2011) aplicando la técnica del hilo caliente fomenta la investigación a partir de nuevos experimentos que permitan establecer criterios de comprobación.

1.1 Mecanismos de transferencia de calor

Cuando se tienen dos cuerpos o medios que tienen temperaturas diferentes, siempre se presenta un flujo de calor. La transferencia de calor se realiza desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura, hasta alcanzar un punto de equilibrio térmico. La transferencia de calor se puede realizar por tres mecanismos físicos: conducción, convección y radiación.

1.1.1 Transferencia de calor por convección

La convección es un modo de transferencia de calor basado en dos mecanismos. Puede ser natural, que es producida por las variaciones de densidad, debido a cambios de temperatura o el movimiento molecular aleatorio (difusión); o forzada, a causa de movimientos macroscópicos de un fluido, donde a mayor velocidad y diferencia de temperatura, mayor será la transferencia de calor. Es común emplear el término “convección” en presencia de ambos mecanismos y el término “advección” cuando se refiere al movimiento macroscópico del fluido.

1.1.2 Transferencia de calor por radiación

La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada. Se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas. Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa. De hecho, la transferencia

de calor por radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío. (P. Incropera & P. De Witt, 1999)

1.1.3 Transferencia de calor por conducción

La conducción considera conceptos de actividad atómica y molecular, dado que existen procesos en estos niveles que sustentan este mecanismo de transferencia de calor. La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas.

En los fluidos líquidos, las moléculas están menos espaciadas a comparación de un fluido gaseoso y sus interacciones moleculares son más fuertes y frecuentes. Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados. Estos modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. El modelo para la conducción de calor se conoce como ley de Fourier. Se tiene la ecuación (2.1).

$$\dot{Q} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \text{ [W]} \quad (2.1)$$

Donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor por unidad de tiempo t , por unidad de área A , y por la gradiente de temperatura $\partial T/\partial x$. El signo negativo en la ecuación garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva (perpendicular al área) sea una cantidad positiva. (Cengel & Ghajar, 2007)

1.2 Conductividad térmica

La conductividad térmica es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. De la ecuación planteada anteriormente para la razón de la transferencia de calor por

conducción en condiciones estacionarias, también se puede concebir como la ecuación de definición para la conductividad térmica. Por lo tanto, la conductividad térmica de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área, por unidad de diferencia de temperatura. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante.

En la Tabla 2 se muestra que las conductividades térmicas de los materiales varían sobre un amplio intervalo. Las conductividades térmicas en gases varían en un factor de 104 con respecto a los metales puros como el cobre. Se pueden apreciar estos valores en la Figura 2.2.

Tabla 2. Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente

| Material | $k, W/m^{\circ}C$ |
|------------------------|-------------------------------------|
| Diamante | 2300 |
| Plata | 429 |
| Cobre | 401 |
| Oro | 317 |
| Aluminio | 237 |
| Hierro | 80.2 |
| Mercurio | 8.54 |
| Vidrio | 0.78 |
| Ladrillo | 0.72 |
| Agua | 0.607 |
| Piel humana | 0.37 |
| Madera | 0.17 |
| Helio | 0.152 |
| Caucho suave | 0.13 |
| Fibra de vidrio | 0.043 |
| Aire | 0.026 |
| Uretano, espuma rígida | 0.026 |

Nota. Los cristales y metales puros tienen las conductividades térmicas más elevadas y los gases y los materiales aislantes, las más bajas. Fuente: Adaptado de Cengel & Ghajar (2007) *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones*

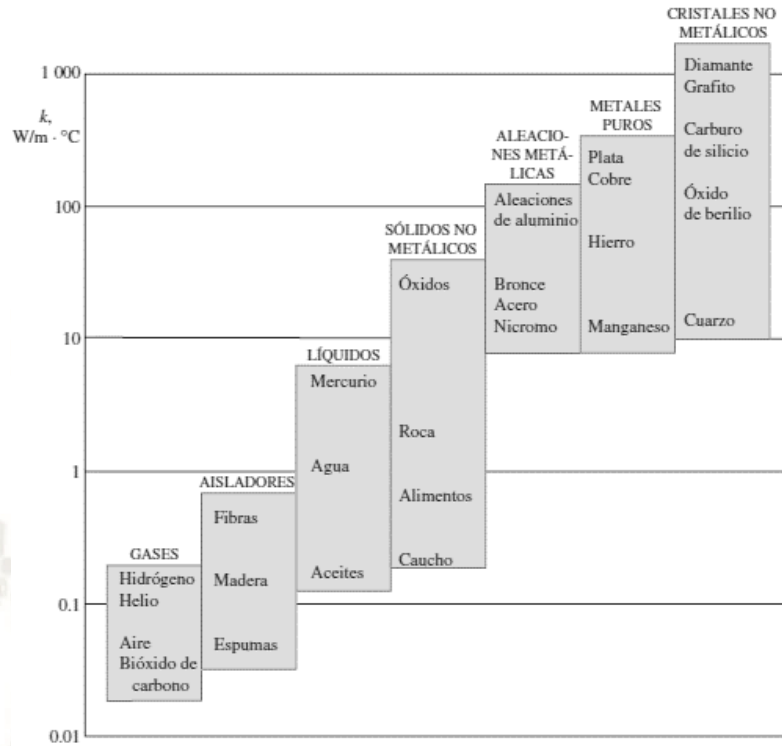


Figura 2.2. Rango de la conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente
Fuente: (Cengel & Ghajar, 2007).

El mecanismo de conducción de calor en un líquido se complica por el hecho de que las moléculas están más cercanas entre sí y ejercen un campo de fuerzas intermoleculares más intenso. Las conductividades térmicas de los líquidos suelen encontrarse entre las de los sólidos y las de los gases. (Cengel & Ghajar, 2007)

Dicho lo anterior, en la Figura 2.3 se muestra que la conductividad térmica de líquidos no metálicos por lo general disminuye al aumentar la temperatura; las excepciones notables son la glicerina y el agua. Esta propiedad es insensible a la presión excepto cerca del punto crítico. También, por lo común se sigue que la conductividad térmica disminuye con el aumento en el peso molecular. Los valores de la conductividad térmica normalmente se tabulan como función de la temperatura para el estado saturado del líquido.

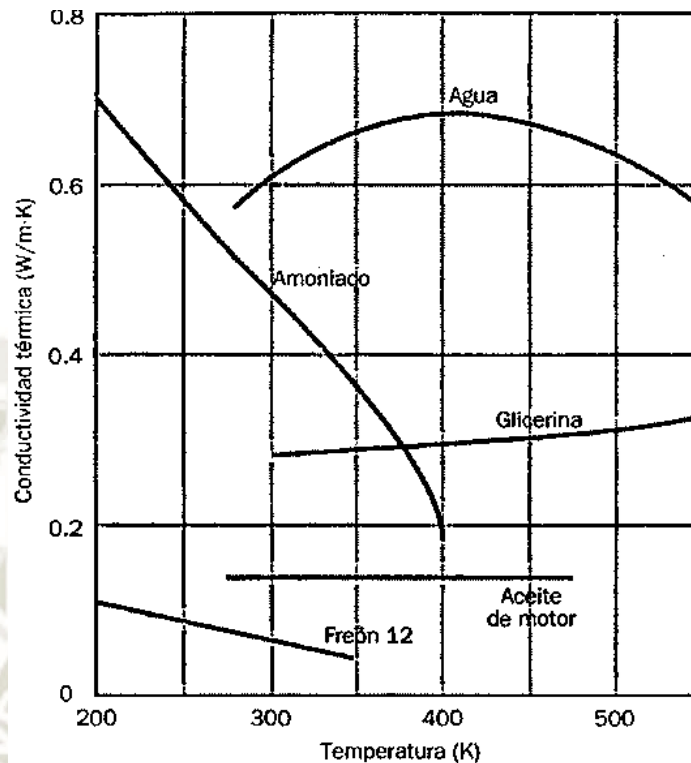


Figura 2.3. Dependencia de temperatura de la conductividad térmica de líquidos no metálicos obtenidos bajo condiciones saturadas
Fuente: P. Incropera & P. De Witt (1999).

1.2.1 Medición de la conductividad térmica por métodos transitorios

Los métodos dinámicos que no emplean fuentes de calentamiento periódicas caen en la categoría de métodos transitorios. En este grupo, la muestra a medir en el momento inicial presenta una temperatura uniforme y se encuentra en equilibrio con el medio que lo rodea y posteriormente es sometida a un flujo de calor. La técnica transitoria del hilo caliente es un método dinámico que emplea una fuente lineal de calor, como el caso de un hilo de diámetro pequeño calentado eléctricamente. Este tipo de métodos se emplea para medir una gran variedad de materiales como son polvos, metales, gases y líquidos; entre los cuales destaca el método transitorio del hilo caliente, cuyos resultados reportan gran exactitud y fiabilidad en mediciones

de conductividad térmica en diferentes experimentos con nanofluidos. (Shijo & Choondal, 2011; Lee, y otros, 2008)

1.3 Técnica del hilo caliente

Según Horrocks & McLaughlin (1963), en el año 1931, Stalhane & Pyk emplearon por primera vez el método transitorio del hilo caliente (THW) para medir la conductividad térmica absoluta en polvos. Futuros investigadores realizaron modificaciones a este método para mejorar su exactitud. La ventaja más atractiva de este método para la aplicación de fluidos es su capacidad para eliminar experimentalmente el error causado por la convección natural. Otras ventajas de este método es su velocidad y los arreglos necesarios para armar un módulo de medición comparado ante otras técnicas de medición de conductividad térmica. (Paul, Chopkar, Manna, & Das, 2010)

La técnica del hilo caliente se clasifica dentro de los métodos dinámicos transitorios ya que emplea un flujo transitorio de calor para determinar la conductividad térmica. Este método se basa en la transferencia de calor de una fuente controlada hacia un material y la medición del cambio de temperatura provocado por la disipación del calor a través de la muestra para determinar las propiedades térmicas de transporte del material.

El modelo matemático desarrollado para el método del hilo caliente considera una fuente lineal de calor, delgada, infinitamente larga y con una distribución de temperatura uniforme, que disipa un flujo de calor por unidad de longitud en un medio homogéneo e infinito. (Robles S., R., Lozano M., & Gutierrez V., 2016)

En la realidad se aproxima estas condiciones mediante el uso de un hilo delgado de platino como fuente de calor. Este hilo es configurado para que la corriente circule a través de éste mismo generando calor, como lo describe el efecto Joule, y sufriendo una variación en su

valor resistivo. Como el hilo es muy delgado, se puede asumir que su conductividad térmica es infinita y capacidad térmica nula. (Ebrahimi & Saghravani, 2017)

Por medio de un sistema de adquisición de datos, se registrará el cambio de su resistencia en función del tiempo, donde finalmente el valor de la conductividad térmica es determinado a partir de la potencia disipada por el hilo y la pendiente de la diferencia de temperatura ΔT contra $\ln(t)$. La ecuación que gobierna este fenómeno se deriva de la ecuación general de difusión de calor de Fourier, que, en coordenadas cilíndricas para la componente radial, r , se expresa como:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.2)$$

Donde T es la temperatura del medio a cualquier tiempo t y ΔT es la diferencia de temperatura entre el medio y la temperatura inicial. Las condiciones de frontera en las que se basa la solución de la ecuación (2.2) en este caso son:

$$t = 0, r = 0 \rightarrow \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ r \frac{\partial T}{\partial r} \right\} = -\frac{q}{2\pi k} \quad (2.3)$$

$$t \geq 0, r = \infty \rightarrow \lim_{r \rightarrow \infty} \{ \Delta T(r, t) \} = 0 \quad (2.4)$$

En la condición $r \rightarrow 0$ la variación de temperatura en dirección es proporcional al calor que genera la línea e inversamente proporcional a la circunferencia de la línea y a la conductividad térmica del fluido. Si el valor de conductividad térmica del fluido es grande, la variación de temperatura en la línea fuente será pequeña, por el contrario, si la conductividad térmica es pequeña, la variación de temperatura será grande. (García, Lira, & Méndez, 2010)

La difusividad térmica del medio α es definido por la ecuación (2.5), donde ρ es la densidad del medio y c_p es el calor específico a presión constante del medio.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.5)$$

Se demostró que la solución de la ecuación (2.2) es:

$$\Delta T(r, t) = \frac{-q}{4\pi k} E_1\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) = \frac{-q}{4\pi k} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} \quad (2.6)$$

Donde E_1 se define por la ecuación (2.7) y puede ser aproximada por las series mostradas, donde β es la constante de Euler (0.5772).

$$-E_1(-x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx = -\beta - \ln x - \frac{x^2}{4} + \dots \quad (2.7)$$

Los términos después de $\ln x$ en la expansión de las series de Ei se tornan pequeñas para grandes valores de tiempo, especialmente cuando el radio r es pequeño y la difusividad térmica α es grande. De esta forma la ecuación (2.6) se puede aproximar como:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \left[-\beta - \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \right] = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln t + \ln\left(\frac{4\alpha}{r^2}\right) - \beta \right] \quad (2.8)$$

Donde k y α son la conductividad y la difusividad térmica del medio respectivamente y q es el flujo de calor por unidad de longitud de la fuente (Carslaw & Jaeger, 1959).

Simplificando la anterior expresión se obtiene:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \ln t + \frac{q}{4\pi k} \ln \frac{4\alpha}{r^2} - \frac{q}{4\pi k} \beta \quad (2.9)$$

Cuya derivada respecto a $\ln t$ resulta en:

$$\frac{d\Delta T}{d(\ln t)} = \frac{q}{4\pi k} \quad (2.10)$$

Seguidamente despejando la conductividad térmica k se obtiene:

$$k = \frac{q}{4\pi A} = \frac{q}{4\pi} \left[\frac{d\Delta T}{d(\ln t)} \right]^{-1} \quad (2.11)$$

Finalmente, si la temperatura del fluido se mide en función del tiempo en cualquier posición radial fija, inclusive en contacto con la fuente, la conductividad térmica del medio es proporcional al flujo de calor de la fuente e inversamente proporcional a la pendiente de la gradiente de temperatura en relación con el logaritmo natural del tiempo, como se muestra en la ecuación (2.11) y en la Figura 2.4.

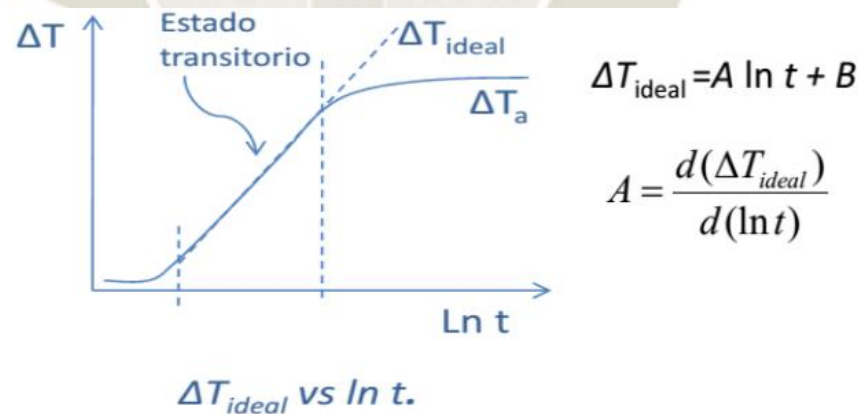


Figura 2.4. Gráfica sobre el comportamiento del modelo matemático para obtener la conductividad térmica
Fuente: (Robles S., R., Lozano M., & Gutierrez V., 2016).

1.4 Correcciones del modelo ideal

Con diversas correcciones aplicables y diseños con criterio conocidos, la ecuación puede producir una base sólida para la determinación precisa de los coeficientes de la conductividad térmica. En algunos casos se demuestra que el efecto del modelo real en el resultado final es despreciable comparado a la precisión del experimento (mucho más pequeño que el 0.1%) bajo ciertas condiciones experimentales. En otros, para obtener la forma ideal de incremento de temperatura ΔT se multiplica por una corrección para la fuente particular de error.

Se presenta en la Tabla 3 los orígenes de las correcciones a aplicar al método transitorio del hilo caliente, donde se indican las diferencias entre el modelo ideal y la situación real en el módulo, siendo las más significativas los ítems 2 y 4.

Tabla 3. Diferencias entre condiciones ideales y reales en una celda de hilo caliente

| Ítem | Fuente lineal ideal | Fuente real de hilo caliente |
|------|--|--|
| 1 | Radio cero, $r = 0$. | Radio finito, $r = a/2$. |
| 2 | Longitud infinita, $l = \infty$, no efecto de extremos. | Longitud finita, $l = l_1$, efecto de extremos. |
| 3 | Conductividad térmica infinita. | Conductividad térmica finita, $k_w = cte$. |
| 4 | Capacidad calorífica nula. | Capacidad calorífica finita, $C_{p,w} = cte$. |
| 5 | Medio infinito. | Contornos de celda de medición, $r = b/2$. |
| 6 | Continuidad térmica radial desde fuente axial de calor. | Discontinuidad térmica entre hilo caliente y medio. |
| 7 | Medio incompresible – Propiedades físicas constantes. | Medio compresible – Propiedades físicas variables en $r = a$. |
| 8 | Conducción – único medio de transferencia de calor. | Contribución de radiación + Convección en tiempos mayores. |

Nota. Fuente: Adaptado de Johns, Scott, Watson, Ferguson, & Clifford (1988). *Measurement of the Thermal Conductivity of Gases by the Transient Hot-Wire Method*

En el ítem 2 se indica que al emplear un hilo cuya longitud es finita, este hilo presentará ligeros cambios de temperatura y una disipación de calor diferente frente a otro hilo del mismo material con diferente longitud, por la tanto será necesario especificar la longitud del hilo a emplear como un parámetro inicial en el modelo matemático para la medición de la conductividad térmica.

En el ítem 4 se indica que el modelo ideal cuenta con una fuente de calor con capacidad calorífica nula lo cual genera un gran cambio de temperatura con una mínima cantidad de calor, mientras que en el modelo real existe una capacidad calorífica finita que modifica el incremento de temperatura mayormente en los primeros tiempos de medición.

Se presenta la Figura 2.5, donde se muestran el incremento de temperatura de un hilo de platino y cómo se desvía este de la solución de la fuente lineal ideal. Las porciones centrales de la curva son casi idénticas y en esta zona es donde se pretende aplicar el método transitorio del hilo caliente.

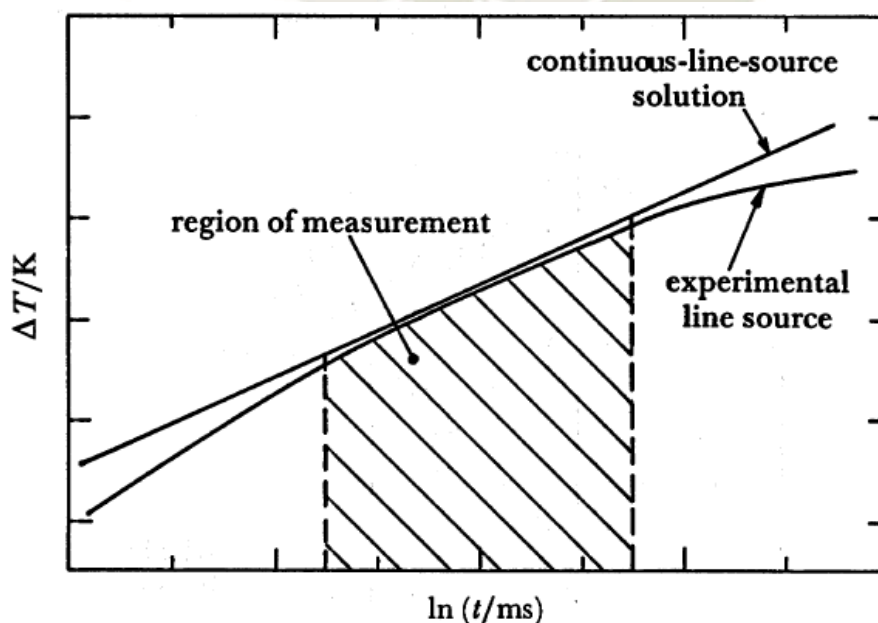


Figura 2.5. Gráfica típica del incremento de temperatura contra el tiempo para un experimento del hilo caliente
Fuente: (Johns, Scott, Watson, Ferguson, & Clifford, 1988).

En tiempos pequeños de medida, el incremento de temperatura es menor que el ideal por la capacidad calorífica finita del hilo. En tiempos largos de medida, ocurre lo mismo pero esta vez es debido al efecto de las fronteras exteriores de la celda y a la convección natural.

2. LISTA DE EXIGENCIAS

Según la metodología de diseño, el módulo requiere contemplar ciertas exigencias que debe cumplir el propio sistema con el fin de cumplir con el objetivo general, la medición exacta de la conductividad térmica de fluidos líquidos.

Cabe resaltar que algunos requerimientos presentados serán obligatorios que posea el módulo para su óptimo funcionamiento, mientras que otros serán catalogados como deseos que fueron planteados para la elaboración satisfactoria del diseño del módulo.

- **Función principal:** El módulo analizará un fluido líquido contenido en la celda de medición empleando el método transitorio del hilo caliente, obteniendo la conductividad térmica del fluido a partir de la adquisición de datos de la variación de temperatura del fluido, la variación de la resistencia del hilo caliente y la función logarítmica del tiempo.
- **Geometría:** El módulo que comprende diferentes componentes debe situarse cómodamente en un área de trabajo de laboratorio de investigación. Espacio deseado del módulo: 400mm x 450mm x 150mm.
- **Material:** Para la celda de medición, su material deberá contener a la muestra sin posibilidad a filtraciones, ni modificar la composición de la muestra. Deberá operar entre un rango medio de temperaturas (0 – 50°C) y adaptarse al modelo matemático planteado por el método transitorio del hilo caliente.

Para el hilo caliente, el hilo puede ser de un material cuyas propiedades geométricas y termofísicas tengan semejanza al modelo de una fuente ideal de calor lineal continua como lo son el platino, paladio, nicromo o incluso cobre (Azarfar, Movahedirad, Sarbanha, Norouzbeigi, & Beigzadeh, 2016).

- **Materia:** La materia manipulada son las muestras de fluidos líquidos que se deseen analizar para su caracterización respecto a su conductividad térmica. Las muestras ocuparán un volumen deseado de hasta 150 cm^3 .
- **Componentes:** La mayoría de los componentes del módulo deben adquirirse en el mercado local para futuros repuestos o modificaciones aplicables al módulo.
- **Fuerzas:** El llenado de las muestras en la celda de medición deberá ser delicado para evitar esfuerzos innecesarios que puedan comprometer la tensión del hilo caliente debido a su finura.
- **Energía:** La energía eléctrica suministrada al módulo comprenderá de una fuente de voltaje DC para la alimentación de componentes electrónicos. Por otro lado, se requerirá de 220VAC/60Hz para la alimentación de la fuente de voltaje DC y del ordenador.
- **Software:** El sistema de supervisión y adquisición de datos deberá garantizar el correcto funcionamiento del módulo a partir de una interfaz de usuario, así como el procesamiento y registro de datos en cada medición.
- **Ergonomía:** El módulo pretende una intervención regular del usuario debido al cambio de muestras en la celda de medición y del control del proceso por medio del ordenador.

- **Comunicación:** El usuario contará con una comunicación intuitiva con el módulo a través de la interfaz de usuario. La comunicación entre los componentes del módulo deberá ser segura y aislada para no comprometer el funcionamiento del mismo.
- **Automatización:** El módulo seguirá una secuencia de trabajo automatizada una vez el usuario emita la señal de inicio del proceso desde la interfaz de usuario.
- **Datos e información:** La interfaz de usuario deberá mostrar al usuario los parámetros iniciales ingresados y la información adquirida durante la medición, como la variación de temperatura, el tiempo transcurrido y la variación de voltaje.
- **Señales:** El sistema mostrará señales que indiquen el estado del proceso de medición. Estas incluyen señales de inicio, señales de parada y señales de fin del proceso. Adicionalmente la interfaz deberá mostrar las señales de variación de temperatura y voltaje, al igual que la señal del tiempo de prueba.
- **Uso:** El uso del módulo debe ser realizado en un laboratorio seguro ante las diferentes muestras a manipular y a condiciones de temperatura y presión ambiente.
- **Control:** Se requiere de un control secuencial en las pruebas de medición donde se pueda asignar un tiempo fijo de alimentación del circuito y un tiempo de reposo, además del número de mediciones a realizar.
- **Seguridad:** El proceso de transferencia de calor del módulo no comprometerá la seguridad del usuario debido a que la cantidad de energía aplicada es pequeña. Sin embargo, se requiere un aislamiento óptimo para las conexiones eléctricas entre componentes.
- **Montaje:** El montaje del módulo no deberá presentar mayor dificultad y su diseño permitirá el reemplazo de componentes que requieran mantenimiento o renovación.

- **Mantenimiento:** Siendo un módulo de laboratorio y teniendo en cuenta el tipo de instrumentación, su mantenimiento consistirá de la limpieza total del mismo cada vez realizada la medición.
- **Fabricación:** La fabricación de los componentes del módulo deberá estar disponible en localidades que faciliten el mantenimiento y la renovación de estos mismos. Es posible que algunos componentes tengan que ser importados debido a su indisponibilidad en el mercado local.
- **Costo:** El diseño y la implementación del módulo deberá presentar un costo estimado de S/.11000.00. El costo se estimó teniendo como referencia los módulos fabricados en otras investigaciones cuya instrumentación puede ser omitida para reducir los costos y obtener resultados similares.

3. ESTRUCTURA DE FUNCIONES

Por medio de una estructura de funciones se presentarán las funciones específicas y generales acorde a las señales de entrada y salida que tendrá el módulo. Estas funciones se obtendrán en base a la lista de exigencias anteriormente descrita para reconocer los procesos que realizará el módulo.

En forma general, sin hacer un análisis interno del sistema, en la Figura 2.6 se presenta un diagrama “BLACK BOX” indicando las señales de entrada y salida del módulo a implementar.

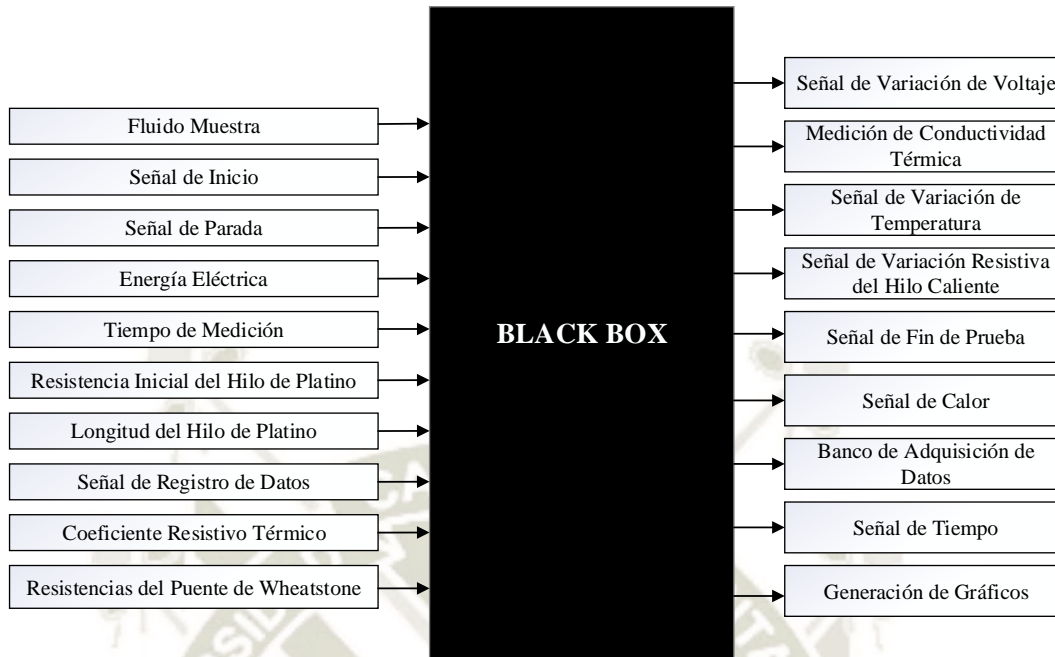


Figura 2.6. Diagrama BLACK BOX de señales de entrada y salida
Fuente: Elaboración propia

Del diagrama mostrado en la Figura 2.6, se presenta la estructura de funciones en la Figura 2.7, donde se indica cada función a realizar con las señales de entrada y salida. Se organizan en grupos de control, actuadores, sensor y acondicionamiento.

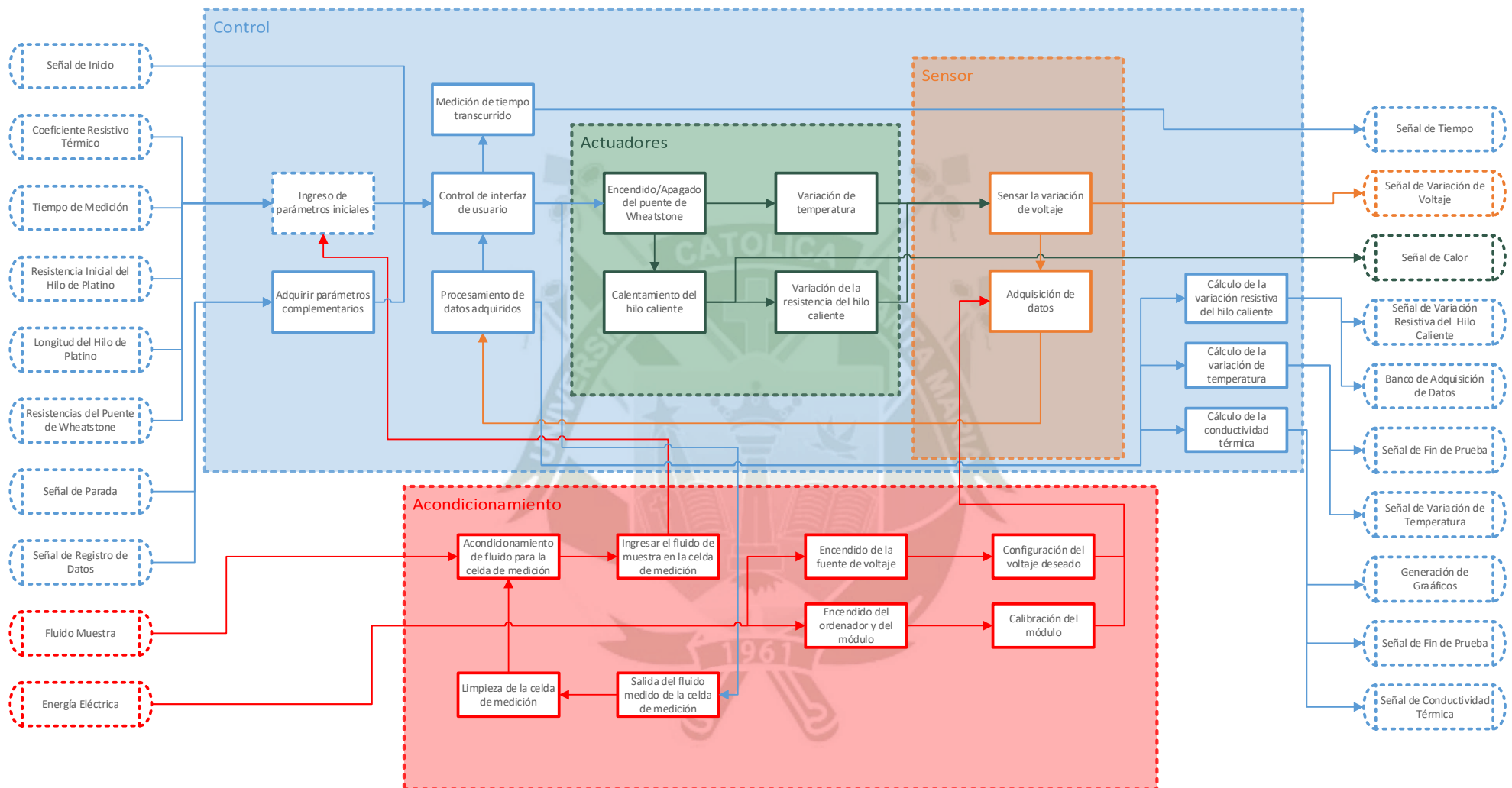
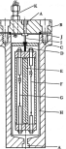



















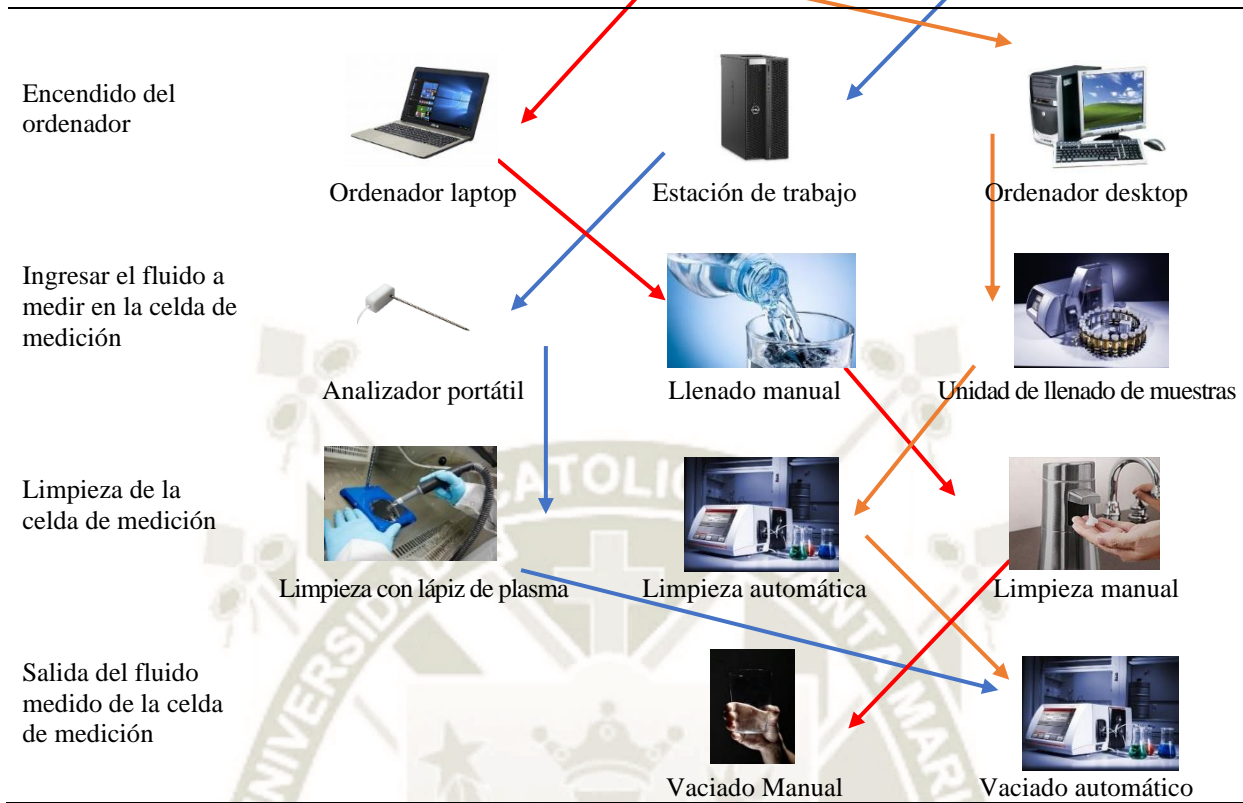
Figura 2.7. Estructura de funciones
Fuente: Elaboración propia

4. MATRIZ MORFOLÓGICA

En esta sección se tiene la Tabla 4 y la Tabla 5, presentando las matrices morfológicas de acondicionamiento y control respectivamente, que muestra tres opciones para satisfacer las funciones anteriormente especificadas.

Tabla 4. Matriz Morfológica - Acondicionamiento

| Acondicionamiento | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 |
|---|---|--|--|
| Acondicionamiento de fluido para la celda de medición |  Celda de acero inoxidable |  Celda de vidrio y nylon |  Celda de cobre |
| Almacenamiento de energía |  Fuente DC regulable |  Fuente DC de alta potencia |  Fuente DC programable |
| Calibración de la tarjeta de adquisición de datos |  Arduino ethernet |  Tarjeta DAQ |  Controlador lógico programable |
| Configuración de software del módulo |  RSLogix 500 PLC software |  NI LabVIEW software |  Arduino IDE |
| Conversión de corriente alterna a directa |  Fuente de voltaje DC |  Circuito electrónico |  Circuito integrado AC-DC |
| Encendido de la tarjeta de adquisición de datos |  Fuente de Poder 24V |  Ordenador |  Módulo I/O digitales y analógicas |

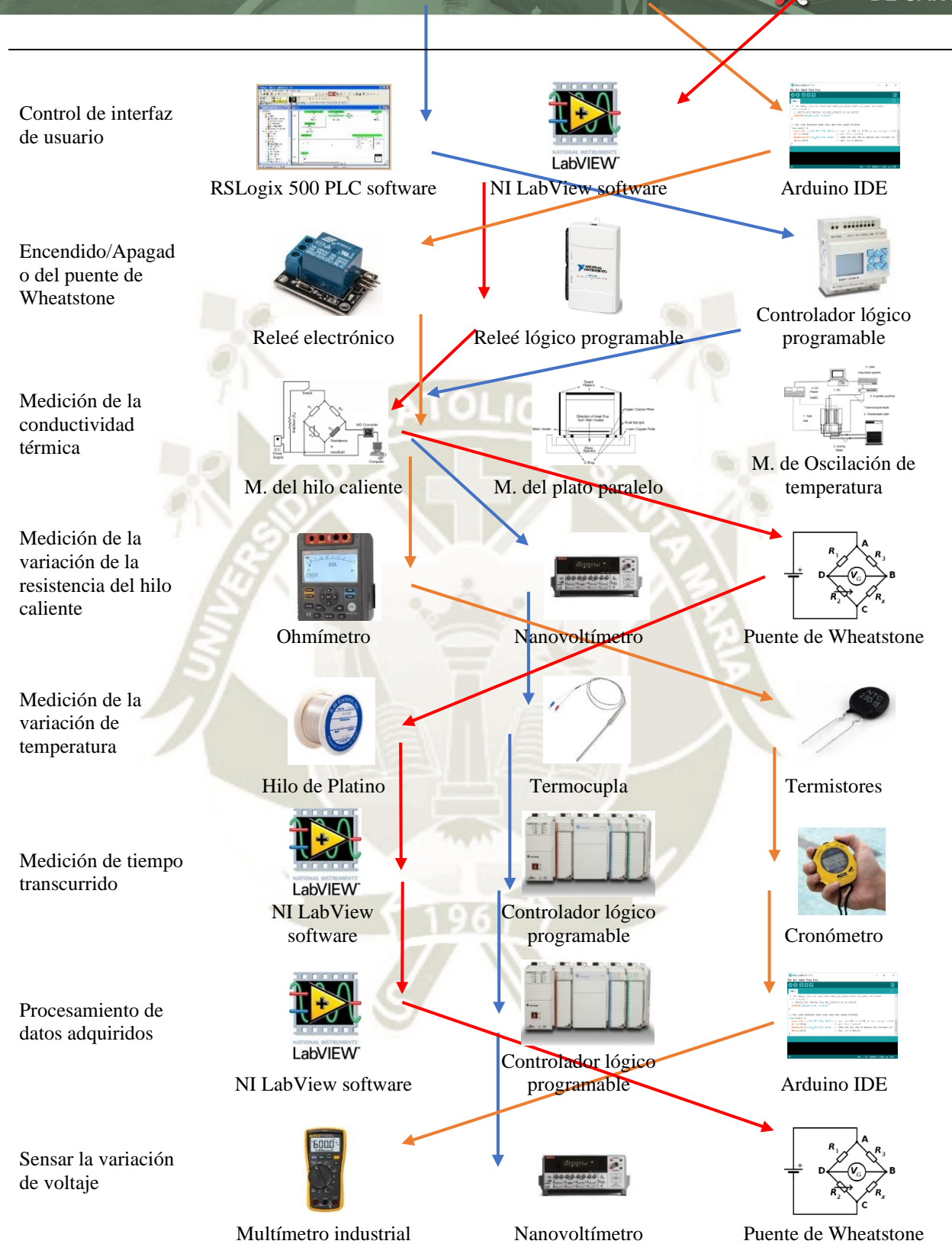


Nota. Solución 1, Solución 2, Solución 3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Matriz Morfológica - Control

| Control | Opción 1 | Opción 2 | Opción 3 |
|---|------------------|-----------------|--------------------------------|
| Adquirir parámetros iniciales y complementarios | Labview HMI | Digital display | Panel HMI PLC |
| Adquisición de datos | Arduino ethernet | Tarjeta DAQ | Controlador lógico programable |
| Calentamiento del hilo caliente | Hilo de Nicromo | Hilo de Cobre | Hilo de Platino |



Nota. Solución 1, Solución 2, Solución 3

Fuente: Elaboración propia

5. CONCEPTO DE SOLUCIÓN

A continuación, se hablará de las posibles soluciones cuyos conceptos se comprobarán más adelante en ser los más óptimos para la implementación de este módulo tanto en aspectos técnicos como económicos.

5.1 Solución 1

La solución contempla una celda de medición de acero inoxidable cuyo diseño permitiría hacer mediciones en líquidos y gases bajo presiones diferentes a la atmosférica. Emplea un controlador lógico programable (PLC) para el control del módulo que deberá ser programado en el software correspondiente al fabricante del PLC. Adicionalmente, se deberá adquirir un módulo de entradas analógicas para captar la señal de un hilo de nicromo, que actuará como la fuente de calor dentro de la celda de medición. Para la medición de la variación de temperatura se empleará una termocupla que será instalada dentro de la celda de medición.

La interfaz de usuario será diseñada en un software de automatización industrial suministrado por el fabricante del PLC. Para acondicionar la señal se empleará un puente de Wheatstone cuya señal será medida por un nanovoltímetro cuya precisión es idónea para captar la señal de voltaje generada por la fuente de calor.

5.2 Solución 2

En este diseño se emplea una celda de medición de cobre con soporte de nylon que sostendrá un hilo de cobre. Para la alimentación del módulo se empleará una fuente de voltaje regulable convencional que se comunicará con un microcontrolador Arduino encargado del control y la adquisición de datos a partir de sus entradas y salidas digitales/analógicas. La señal será acondicionada por un puente de Wheatstone.

El software a emplear será la aplicación Arduino IDE, en la cual se diseñará la interfaz de usuario. Para corroborar la información obtenida por el microcontrolador Arduino, se captarán las señales emitidas por el cambio de temperatura y de voltaje por medio de un termistor y multímetro respectivamente, cuyo posicionamiento deberá ser contemplado en el diseño de la celda de medición.

5.3 Solución 3

Esta solución emplea principios de transferencia de calor para simular un modelo de fuente de calor lineal ideal por medio de un hilo de platino que es conectado a un puente de Wheatstone para acondicionar la señal y poder captar las variaciones de temperatura por medio de una tarjeta de adquisición de datos con entradas y salidas digitales/analógicas que trabaja en sincronía con un ordenador que registra los datos enviados por el módulo a través de un cable de datos USB. La medición de la conductividad térmica se realizará en una celda de vidrio y nylon

La comunicación entre usuario y módulo se logrará por medio de un sistema básico de supervisión, control y adquisición de datos implementado en el software LabView. La alimentación del circuito electrónico se dará por una fuente de voltaje DC, mientras que la alimentación de la tarjeta de adquisición de datos se dará por el ordenador vía cable USB.

Finalmente, la información registrada en el ordenador es manipulada para calcular la conductividad térmica del fluido líquido por medio del modelo matemático planteado por el método transitorio del hilo caliente.

6. CONCEPTO ÓPTIMO

En esta sección se presenta la comparación de aspectos tanto técnicos como económicos de las diferentes soluciones presentadas relevantes al módulo a implementar. Una vez evaluadas se graficarán las opciones en una gráfica técnica-económica demostrando la opción óptima.

Tabla 6. Evaluación técnica-económica. Valor técnico (Xi)

| Variante de concepto | | Solución 1 | | Solución 2 | | Solución 3 | | Solución ideal | | |
|---------------------------|---------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-----|----|
| | | S ₁ | | S ₂ | | S ₃ | | S _i | | |
| Nº | Criterio | g | p | gp | p | gp | p | gp | p | gp |
| 1 | Volumen | 3 | 2 | 6 | 2 | 6 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 2 | Fabricación | 2 | 3 | 6 | 2 | 4 | 3 | 6 | 4 | 8 |
| 3 | Montaje | 2 | 2 | 4 | 1 | 2 | 3 | 6 | 4 | 8 |
| 4 | Peso | 2 | 1 | 2 | 3 | 6 | 3 | 6 | 4 | 8 |
| 5 | Uso | 4 | 3 | 12 | 2 | 8 | 3 | 12 | 4 | 16 |
| 6 | Complejidad técnica | 4 | 4 | 16 | 1 | 4 | 3 | 12 | 4 | 16 |
| 7 | Seguridad | 4 | 4 | 16 | 2 | 8 | 3 | 12 | 4 | 16 |
| 8 | Lista de exigencias | 4 | 3 | 12 | 3 | 12 | 3 | 12 | 4 | 16 |
| 9 | Uso de energía | 3 | 2 | 6 | 3 | 9 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 10 | Estabilidad | 3 | 4 | 12 | 2 | 6 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 11 | Rapidez | 3 | 4 | 12 | 3 | 9 | 4 | 12 | 4 | 12 |
| 12 | Mantenimiento | 3 | 3 | 9 | 2 | 6 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 13 | Confiabilidad | 3 | 4 | 12 | 2 | 6 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 14 | Transportabilidad | 2 | 2 | 4 | 2 | 4 | 3 | 6 | 4 | 8 |
| Puntaje máximo | | 41 | 129 | 30 | 90 | 43 | 129 | 56 | 168 | |
| Valor técnico (Xi) | | 0.73 | 0.77 | 0.54 | 0.54 | 0.77 | 0.77 | | | |

Nota. Peso del criterio (g): 1-Bajo, 2-Medio, 3-Alto, 4-Muy alto

Puntaje asignado (p): 1-Pobre, 2-Regular, 3-Muy bien, 4-Excelente

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Evaluación técnica-económica. Valor económico (Y_i)

| Variante de concepto | | Solución 1 | | Solución 2 | | Solución 3 | | Solución ideal | | |
|---|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-----|----|
| | | S_1 | | S_2 | | S_3 | | S_i | | |
| N° | Criterio | g | p | gp | p | gp | p | gp | p | gp |
| 1 | Número de piezas | 3 | 2 | 6 | 1 | 3 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 2 | Adquisición en el mercado local | 3 | 2 | 6 | 4 | 12 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 3 | Costo de materiales | 3 | 2 | 6 | 3 | 9 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 4 | Costo de la tecnología | 4 | 1 | 4 | 3 | 12 | 2 | 8 | 4 | 16 |
| 5 | Fácil mantenimiento | 3 | 3 | 9 | 2 | 6 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 6 | Costo de operación | 2 | 2 | 4 | 2 | 4 | 3 | 6 | 4 | 8 |
| 7 | Costo de montaje | 3 | 3 | 9 | 4 | 12 | 3 | 9 | 4 | 12 |
| 8 | Costos diversos | 2 | 1 | 2 | 3 | 6 | 2 | 4 | 4 | 8 |
| 9 | Productividad | 4 | 4 | 16 | 2 | 8 | 3 | 12 | 4 | 16 |
| Puntaje máximo | | 20 | 62 | 24 | 72 | 25 | 75 | 36 | 108 | |
| Valor económico (Y_i) | | 0.56 | 0.57 | 0.67 | 0.67 | 0.69 | 0.69 | | | |

Nota. Peso del criterio (g): 1-Bajo, 2-Medio, 3-Alto, 4-Muy alto
Puntaje asignado (p): 1-Pobre, 2-Regular, 3-Muy bien, 4-Excelente
Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los valores técnico-económicos X_i y Y_i de cada solución formulada, se presenta la Figura 2.8 donde se grafican las soluciones y una línea que representa el equilibrio entre el campo técnico y el campo económico que permitirá finalmente decidir la solución óptima de diseño.

Se tiene la solución 1 que presenta un valor técnico superior al de la solución 2 y semejante al de la solución 3, sin embargo, su valor económico resulta ser menor que este último debido al alto costo de adquisición de sus componentes.

La solución 2 presenta el mínimo valor técnico de las 3 soluciones, sin embargo, presenta un valor económico mayor al de la solución 1 y cercano al de la solución 3. Esto indicaría que las características técnicas de sus componentes no son las más adecuadas para el óptimo cumplimiento de las funciones especificadas, pero sí presenta un costo de adquisición más asequible.

Finalmente, la solución 3 presenta un valor técnico semejante al de la solución 1, cumpliendo con los requerimientos técnicos necesarios para un funcionamiento deseable y un valor económico ligeramente mayor al de la solución 2, reflejando un costo de adquisición de componentes más elevado. Se evidencia que la solución 3, con los mayores valores técnico-económicos que las soluciones 1 y 2, se encuentra más próxima a la línea de equilibrio, lo cual indica que es la solución óptima de diseño del módulo.

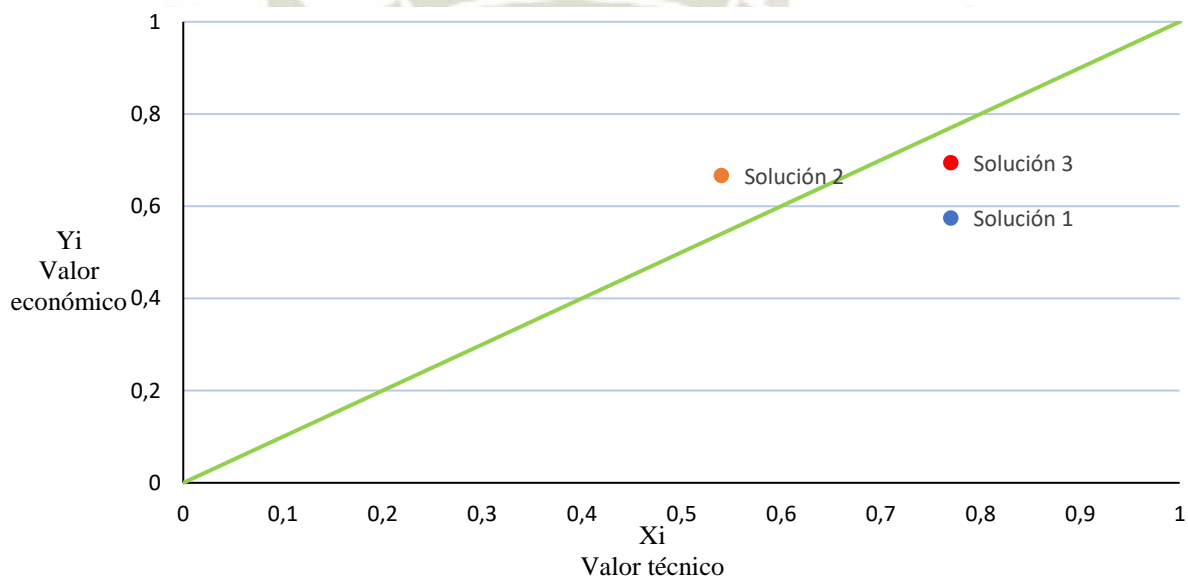


Figura 2.8. Evaluación técnico-económica
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL MÓDULO

En este capítulo se da a conocer los campos de diseño contemplados para implementar el módulo, donde se señalará sus principales características, alcances, medio de comunicación y modos de trabajo. Además, se describirán los criterios considerados para la selección de materiales, software y dispositivos que permitirán el funcionamiento óptimo del módulo.

1. DISEÑO MECÁNICO

El diseño mecánico abarca el diseño y ensamble de la celda de medición, cuya importancia reside en su semejanza al modelo planteado por el método del hilo caliente; y el diseño para la selección de la fuente de calor que requerirá de un material cuyas propiedades termofísicas se adecuen a modelos ideales.

1.1 Diseño y ensamble de la celda de medición

El diseño de la celda de medición comenzará por el dimensionamiento de esta misma. Se hará referencia a diseños y modelos matemáticos anteriormente planteados para la medición de la conductividad térmica (Donghoon, Joohyun, Byeongchan, Suyong, & Junemo, 2017).

La variación de temperatura entre la superficie del hilo y el fluido muestra provoca una fuerza de flotación que genera convección natural que podría sobreestimar la medición de la conductividad térmica. Para reducir este impacto, se presenta la ecuación de energía con la aproximación de Boussinesq (3.1), que sugiere el aumento de fuerzas viscosas ante las fuerzas de

flotación. En fluidos estáticos, el lado izquierdo de la ecuación se reduce a 0 y el lado derecho indicaría el balance entre las fuerzas de flotación y fuerzas viscosas.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_{\infty}) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.1)$$

En celdas de medición presentadas, las fuerzas viscosas fueron mejoradas a través del aumento en la relación superficie – volumen. Esta relación se encuentra entre los valores de 1.67 y 4.11; por lo que se pretende implementar una celda de medición cuya relación se aproxime a estos valores. Se tiene la ecuación (3.2) y la Tabla 8.

$$R_{s/v} = \frac{\pi b h + 2 \frac{\pi b^2}{4}}{\frac{\pi b^2}{4} h} = \frac{4}{b} + \frac{2}{h} \quad (3.2)$$

Tabla 8. Características de celdas de medición

| Celda | R_w, Ω | L_w, m | b, m | $R_{s/v}$ |
|-------|---------------|----------|---------|-----------|
| 1 | 5.7 | 0.09785 | 0.02865 | 1.60 |
| 2 | 4.4 | 0.08140 | 0.02865 | 1.64 |
| 3 | 5.3 | 0.09400 | 0.03025 | 1.54 |
| 4 | 5.4 | 0.09550 | 0.03425 | 1.37 |
| 5 | 6.9 | 0.12430 | 0.03900 | 1.34 |

Nota. La celda 1 y 2 presentan el mismo diámetro interno debido a que son dos envases iguales.
Fuente: Elaboración propia

Al encontrarse cerca a este rango se puede compensar con la relación $b/a \gg 1$ indicando que las condiciones básicas a cumplir mejoran según el aumento de la relación entre el radio de la pared y el hilo cuyos valores en celdas presentadas oscilan entre 200 y 512. (Healy, Groot, & Kestin, 1975)

Se tiene la ecuación (3.3) y la Tabla 9.

$$\frac{b}{a} \gg 1 \quad (3.3)$$

Tabla 9. Relación diámetro de celda – diámetro de hilo caliente

| Celda | b, mm | a, μm | b/a |
|-------|-------|------------------|--------|
| 1 | 28.65 | 101.60 | 281.99 |
| 2 | 28.65 | 101.60 | 281.99 |
| 3 | 30.25 | 101.60 | 297.74 |
| 4 | 34.25 | 101.60 | 337.11 |
| 5 | 39.00 | 101.60 | 383.86 |

Nota. Las 5 celdas fabricadas presentan un valor de relación b/a mucho mayor a la unidad por lo que cumplen con sus condiciones básicas de manera óptima.

Fuente: Elaboración propia

Para los primeros valores de t , las paredes de la celda no alterarán considerablemente el incremento de temperatura en la medición y su corrección será negligible (De Groot, Kestin, & Sookiazian, 1974).

El error causado por el diámetro finito del recipiente será menor a 10^{-4} si se cumple la condición de $b^2/\alpha t > 5.783$ (Wenwen, Guoneng, Youqu, & Cong, 2018).

Para el agua destilada ($\alpha = 1.43 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$) y un tiempo de prueba de $t = 10\text{s}$ se presenta los valores de la Tabla 10.

Tabla 10. Relación de error causado por el diámetro finito de la celda

| Celda | b, mm | $b^2/\alpha t$ |
|-------|-------|----------------|
| 1 | 28.65 | 574.00 |
| 2 | 28.65 | 574.00 |
| 3 | 30.25 | 639.90 |
| 4 | 34.25 | 820.32 |
| 5 | 39.00 | 1063.64 |

Nota. En todas las celdas fabricadas se presenta una relación $b/\alpha t$ mucho mayor a la indicada, por lo que se podrá prescindir del error causado por el perímetro finito del recipiente.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.1 se presenta el esquema con el que trabaja el diseño de una celda de medición, cuyo método particular es del hilo caliente pequeño (SHWM). Este esquema nos permitirá determinar una altura mínima para los diámetros internos de las celdas señaladas.

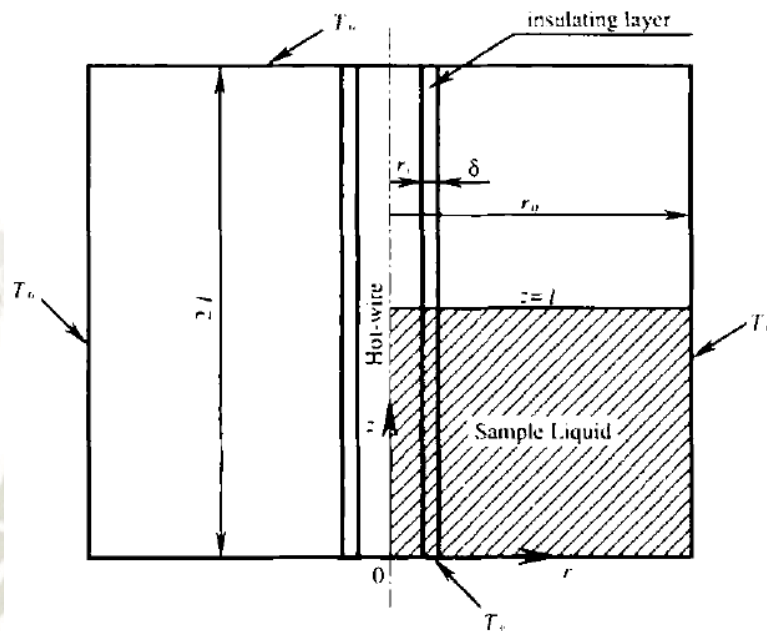


Figura 3.1. Modelo físico del método SHW
Fuente: Fujii, Zhang, Imaishi, Fujiwara, & Sakamoto (1997).

Según el esquema se presenta la ecuación (3.4) para la altura mínima de la celda y la ecuación (3.5) para el volumen de la celda de medición. Se tiene la Tabla 11.

$$\frac{l_{min}}{b} > 2 \tag{3.4}$$

$$V_{celda} = \frac{l_w \pi b^2}{4} \tag{3.5}$$

Tabla 11. Altura mínima y volumen de la celda de medición

| Celda | b, mm | l_w , cm | l_{min} , cm | V_{celda} , cm^3 |
|-------|-------|------------|----------------|----------------------|
| 1 | 28.65 | 9.79 | 5.73 | 63.113 |
| 2 | 28.65 | 8.14 | 5.73 | 52.476 |
| 3 | 30.25 | 9.40 | 6.05 | 67.557 |
| 4 | 34.25 | 9.55 | 6.85 | 87.986 |
| 5 | 39.00 | 12.43 | 7.80 | 148.488 |

Nota. La altura real de las celdas fabricadas supera la altura mínima requerida. Mientras mayor longitud del hilo se emplee, mayor será la cantidad de fluido muestra a emplear. Fuente: Elaboración propia

Para el ensamble de la celda se emplearon entre una y dos tapas de nylon sólido que previamente fueron trabajadas en un proceso de torneado para cumplir con las dimensiones presentadas. Se empleó este material debido a sus propiedades que facilitan el aislamiento eléctrico del fluido muestra, además de su dureza, alta resistencia al desgaste, facilidad de mecanizado y óptima resistencia a temperaturas relativamente elevadas. La función de las tapas es proporcionar una celda hermética junto con el cuerpo de vidrio de la celda para no permitir filtraciones de líquido muestra.

Adicionalmente, en la tapa superior de la celda se ubicaron los bornes de conexión, los cuales fueron soldados a ambos extremos del hilo de platino empleando segmentos de cobre y considerando que el hilo debe quedar tenso a lo largo de toda su longitud.

El diseño del ensamble consiste en tener el extremo inferior del hilo sujeto a una guía de vidrio y nylon por la cual recorre un filamento de cobre soldado a un borne y en el extremo superior se tiene otro segmento de cobre soldado al segundo borne de conexión. Algunas celdas presentan un desacople roscado de la tapa superior por donde ingresará el líquido muestra.

1.2 Diseño de la fuente lineal de calor

Según la teoría planteada para el método del hilo caliente, la fuente de calor necesaria es una fuente lineal ideal de calor continuo cuyo flujo de calor (q) a transmitir al medio sea constante, y su capacidad calorífica al igual que su longitud sea idealmente infinita por lo que se debe escoger un filamento lo suficientemente fino que se aproxime al modelo ideal. En el caso de calentamiento por disipación de calor eléctrico, q es dado por la ecuación (3.6).

$$q = \frac{V_w^2}{R_w} = I_w^2 R_w = \left(\frac{V_0}{R_1 + R_w} \right)^2 R_w \quad (3.6)$$

Esta presunción es indicada si el voltaje a través del puente (V_0) es constante. Se tiene que para un incremento de 10°C en temperatura del hilo, el cambio en q es menor al 0.003%. Si la corriente (i) a través del puente es constante, entonces el cambio en q es aproximadamente 3% para el mismo incremento de temperatura. Por tanto, el hilo es calentado por medio de la aplicación de un voltaje constante al puente de Wheatstone. (Glatzmaier & Ramirez, 1985)

Para la relación entre el cambio de temperatura del hilo caliente (ΔT_w) y su resistencia eléctrica (R_w) se presenta la ecuación (3.7).

$$R_w = R_0(1 + \text{TCR} * \Delta T_w) = R_0 + R_0 * \text{TCR} * \Delta T_w \quad (3.7)$$

Donde TCR representa el coeficiente resistivo de temperatura del hilo caliente y describe el cambio relativo en la resistencia de una sustancia por unidad de cambio en temperatura. El TCR promedio del platino (en un rango de temperatura de 20 a 50°C) es $3.31 \times 10^{-3} \Omega/\text{K}$, que es cerca a los valores $3.62 \times 10^{-3} \Omega/\text{K}$ y $3.52 \times 10^{-3} \Omega/\text{K}$. (Hong, Kang, Kleinstreuer, & Koo, 2011; Hong, Jung, Kang, & Koo, 2010)

A pesar de que el TCR del platino de más alta calidad conocido es $3.93 \times 10^{-3} \Omega/^{\circ}\text{C}$, el valor puede variar dependiendo de los estándares regionales y las impurezas en el hilo.

Finalmente, el hilo caliente escogido para este módulo es un hilo de platino puro cuyo diámetro es $50.8\mu\text{m}$ cubierto de una capa aislante de grosor $25.4\mu\text{m}$ dándole la capacidad de poder realizar mediciones en fluidos eléctricamente conductivos y su TCR corresponde a experimentos anteriormente reportados. (Donghoon, Joohyun, Byeongchan, Suyong, & Junemo, 2017)

2. DISEÑO ELECTRÓNICO

El diseño electrónico del módulo comprenderá la configuración adoptada para el acondicionamiento de la señal a medir por la tarjeta de adquisición de datos. Se explica la configuración del puente de Wheatstone, su función dentro del módulo y su modo de trabajo.

2.1 Diseño del puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es una configuración electrónica que se empleará para el acondicionamiento de señal antes de la adquisición de datos. En la Figura 3.2 se muestra un puente de Wheatstone tradicional que consiste de 4 brazos y en cada uno se instalan resistencias de un determinado valor.

Los valores de R_1 y R_2 serán iguales en este experimento. El valor de R_x será manipulado por el usuario para poder calibrar el módulo y brindar un equilibrio en el puente de Wheatstone antes de realizar mediciones de voltaje ΔV . El cuarto brazo estará conformado por el hilo de platino R_w en la celda de medición. El valor de R_w variará una vez se alimente el circuito del puente de Wheatstone, forzando a que la corriente eléctrica circule a través de hilo variando su temperatura y consecuentemente su resistencia como se mostró en la ecuación (3.7), dando paso a un

desequilibrio en el puente de Wheatstone y registrando una variación de voltaje que será captado por la tarjeta de adquisición de datos.

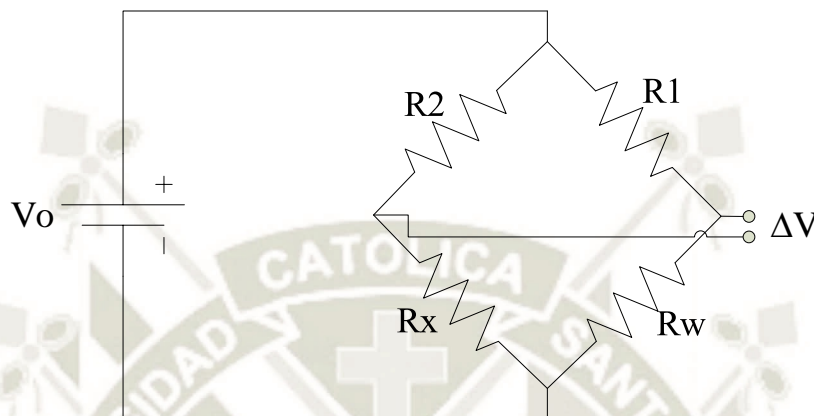


Figura 3.2. Puente de Wheatstone
Fuente: Elaboración propia

La variación de voltaje ΔV va a estar definida por la expresión en la ecuación (3.8).

$$\Delta V = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_x} - \frac{R_1}{R_1 + R_w} \right) V_0 \quad (3.8)$$

El valor de ΔV permitirá hallar el valor de R_w en la ecuación (3.7) cuyo resultado final permitirá despejar la variación de temperatura ΔT , dato que tendrá que ser graficado respecto al $\ln(t)$. La pendiente resultante de la gráfica permitirá despejar la conductividad térmica k según lo enunciado en la ecuación (2.11).

2.2 Cálculo de voltaje a entregar al circuito electrónico

La determinación del valor de voltaje a entregar al circuito se basa en el constante flujo de calor requerido por el modelo matemático. El valor de corriente a circular por el hilo de platino deberá proporcionar un flujo de calor que no genere cambios de temperatura muy altos, que

ocasionaría un error de medición considerable. Estos cambios de temperatura tampoco deberán ser muy bajos para que la señal de medición no sea interferida por señales ruido. (Wenwen, Guoneng, Youqu, & Cong, 2018)

Se pretende que el cambio de temperatura obtenido en las mediciones sea $<10^{\circ}\text{C}$ según resultados reportados previamente (Donghoon, Joohyun, Byeongchan, Suyong, & Junemo, 2017).

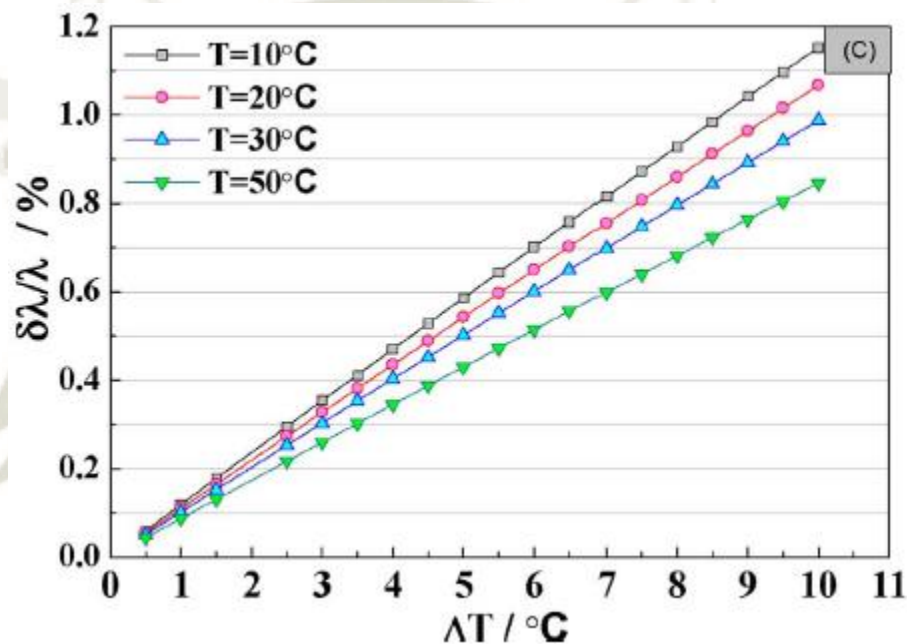


Figura 3.3. Relación entre el cambio de temperatura y el error causado por la fuente de calor no constante.
Fuente: Donghoon, Joohyun, Byeongchan, Suyong, & Junemo (2017).

En la Figura 3.3 se puede observar la relación entre el error causado por la fuente de calor no constante y el cambio de temperatura. Ésta demuestra que el cambio de temperatura debería ser controlado en un rango razonable durante el proceso de medición porque a mayor cambio de temperatura mayor será el error. Notar de igual manera que una mayor temperatura inicial contribuye a un menor error.

Un valor de corriente recomendado para el hilo caliente es 140mA (dependerá del fluido muestra). Para generar esta corriente se debe asignar el valor correspondiente a las resistencias identificadas en serie y paralelo R1, R2 y Rx en el puente de Wheatstone. Para generar un cambio de temperatura deseado, se aplicarán valores de corriente al hilo de platino entre 60 y 220mA; esto nos permitirá calcular los valores de voltaje de alimentación a aplicar en el puente de Wheatstone.

Como los valores de resistencias deben permanecer idealmente iguales durante la medición, se recurre a resistencias cuyo TCR presenten un valor bajo como lo es 20 PPM/°C. Esto permitirá reducir errores de medición a causa de la variación de las resistencias y la fuente de calor no constante. El impacto del tipo de resistencias en la medición de conductividad térmica se puede apreciar en la Figura 3.4, donde se demuestra que las resistencias con cubiertas de aluminio obtienen una menor variación resistiva que los otros tipos.

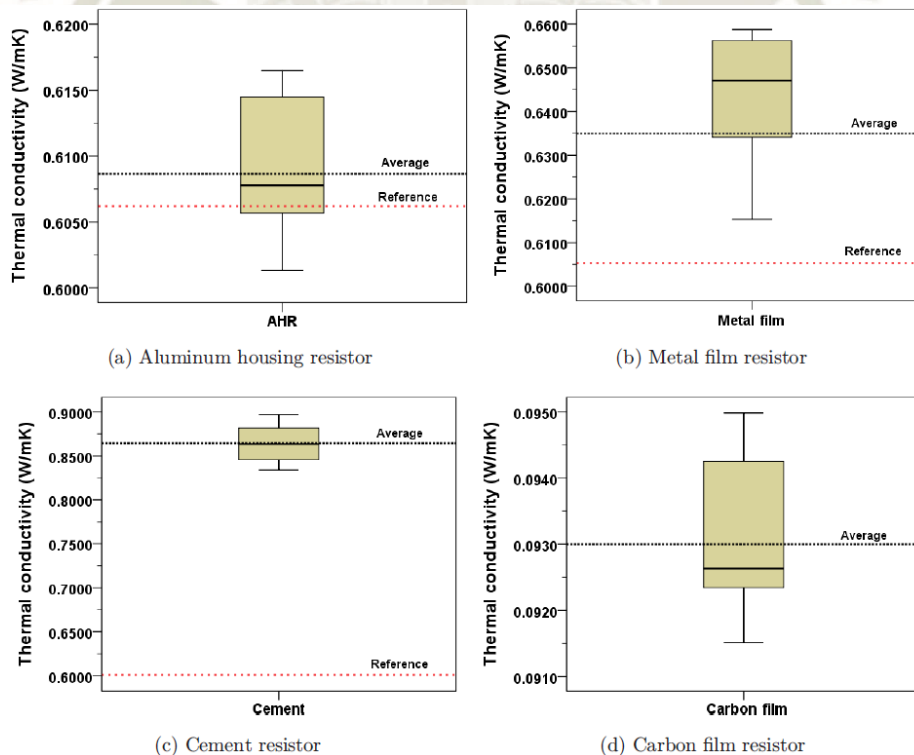


Figura 3.4. Efecto del tipo de resistencias en la medición de conductividad térmica
Fuente: (Hong, Jung, Kang, & Koo, 2010).

Por tanto, para hacer mediciones con diferentes valores de corriente solo se debería modificar el voltaje suministrado por la fuente de voltaje DC.

En la Figura 3.5 se muestra los valores de resistencias a entregar al puente de Wheatstone para obtener el rango de corrientes deseado con bajos niveles de voltaje.

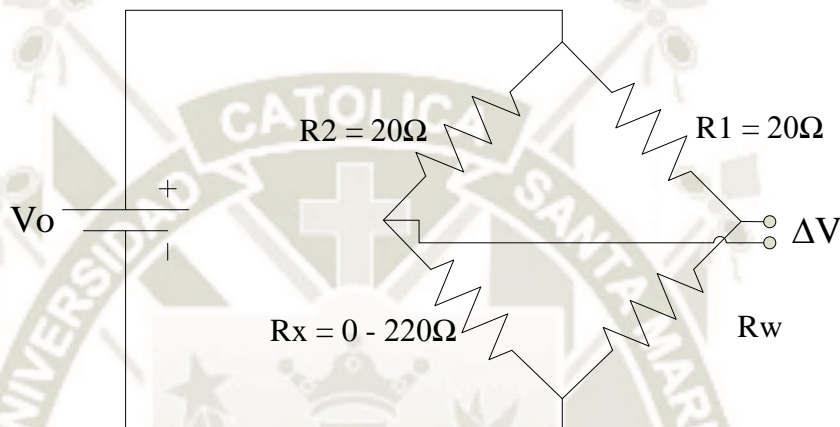


Figura 3.5. Valores de Resistencias en puente de Wheatstone
Fuente: Elaboración propia

Los valores de R_1 y R_2 serán de 20Ω , estas resistencias además de su valor, presentarán un TCR de $20\text{PPM}/^\circ\text{C}$ que asegurará un menor cambio de resistencia durante la medición. Para el valor de R_x se optará por una resistencia variable de $0 - 220\Omega$ cuya función será la de calibrar el puente de Wheatstone. Para considerar un puente calibrado o balanceado, se recomienda obtener una variación de voltaje de $10\text{-}15\mu\text{V}$ aplicando un bajo voltaje de alimentación de 0.1V antes de iniciar la medición. (Kostic & Kalyan, 2009)

Finalmente, el rango de voltajes a operar por el módulo es calculado por la ecuación (3.9) para el rango de corrientes de trabajo de 60 a 220mA .

$$V_0 = (R_1 + R_w)I_w = (R_2 + R_x)I_w \quad (3.9)$$

Tabla 12. Rango de voltajes de operación

| Celda | R_w, Ω | V_0, V | |
|-------|---------------|----------|--------|
| | | 60 mA | 220 mA |
| 1 | 5.7 | 1.54 | 5.65 |
| 2 | 4.4 | 1.46 | 5.37 |
| 3 | 5.3 | 1.52 | 5.57 |
| 4 | 5.4 | 1.52 | 5.59 |
| 5 | 6.9 | 1.61 | 5.92 |

Nota. Se deberá considerar los valores de voltaje requeridos por la configuración del circuito interruptor encargado de alimentar el puente de Wheatstone.

Fuente: Elaboración propia

El rango de voltaje a suministrar por la fuente de voltaje será de 1.5V a 6.0V, por lo que se demuestra que no se requiere altos niveles de voltaje, pero si una salida de voltaje precisa y constante para asegurar un flujo constante de calor.

3. DISEÑO DE CONTROL

Para el diseño de control se debió tener en cuenta los medios de comunicación entre los equipos empleados y las interacciones necesarias del operador con el módulo, como es la preparación de las muestras a medir con la celda de medición o la configuración de la fuente de voltaje programable.

3.1 Adquisición de datos

Como se trata de un módulo que deberá cumplir una determinada secuencia de pasos; uno de estos es el inicio del proceso de adquisición de datos el cual se dará al iniciar la medición. Para este proceso se eligió una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments USB-6210 cuyas características técnicas son ideales para medir magnitudes de alta precisión. Ver Anexo A.

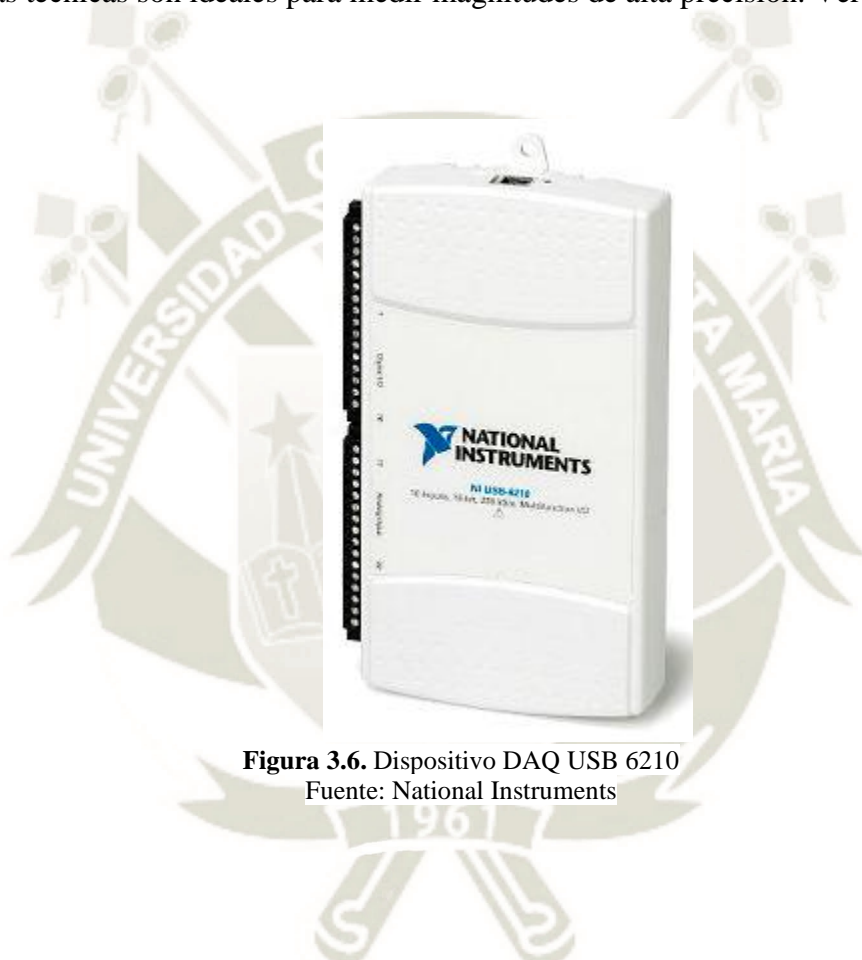


Figura 3.6. Dispositivo DAQ USB 6210
Fuente: National Instruments

El inicio de adquisición de datos se dará a partir de la señal enviada por el usuario por medio de la interfaz y que a la vez alimentará al puente de Wheatstone con el voltaje previamente configurado. Ahora, para alimentar el puente de Wheatstone se opta por un circuito simple basado en un transistor TIP120 NPN cuya función será de interruptor en el circuito electrónico. La señal para la activación de este circuito será controlada a partir de la salida digital P1.0 de la tarjeta de

adquisición de datos como se muestra en la Figura 3.7. Esta señal será activada simultáneamente con la señal de inicio a través de la interfaz en el software LabView.

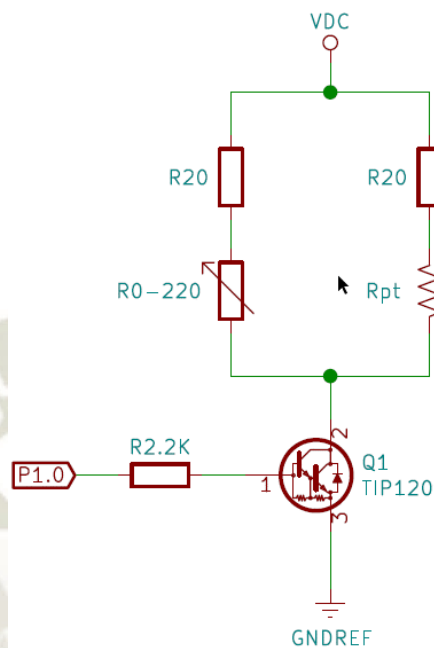


Figura 3.7. Diagrama de transistor TIP120.
Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la figura, el transistor permitirá el flujo de corriente a través del puente una vez alimentada la base. El valor de la resistencia empleada en la configuración de la base es $2.2k\Omega$ debido a la alta ganancia de corriente que presenta el transistor ($h_{FE} = 1000$). Ver Anexo C.

$$I_b = \frac{V_b}{R} \quad (3.10)$$

$$I_b = \frac{3.8V}{2200\Omega} = 1.72mA$$

La corriente de base del transistor a aplicar permitirá un valor de corriente colector – emisor de hasta $1.72A$, cuya magnitud es más que suficiente para alimentar el puente de Wheatstone.

3.2 Cálculo de la conductividad térmica

A partir de la ecuación (2.11) se puede obtener la conductividad térmica en función al cambio de temperatura del hilo caliente. Se tiene la conductividad térmica k :

$$k = \frac{q}{4\pi A} = \frac{q}{4\pi} \left[\frac{d\Delta T}{d(\ln t)} \right]^{-1} \quad (2.11)$$

El valor de q es calculado por la ecuación (3.6) en función de la resistencia del hilo caliente, el voltaje de alimentación al puente de Wheatstone y la corriente que fluye a través del mismo.

$$q = \frac{V_w^2}{R_w} = I_w^2 R_w = \left(\frac{V_0}{R_1 + R_w} \right)^2 R_w \quad (3.6)$$

La variación de temperatura puede ser despejada a partir de la ecuación (3.7) que es la relación entre la temperatura del hilo caliente y su valor de resistencia, dando como resultado la ecuación (3.11).

$$R_w = R_0(1 + TCR * \Delta T_w) = R_0 + R_0 * TCR * \Delta T_w \quad (3.7)$$

$$\Delta T_w = \frac{R_w - R_0}{R_0 * TCR} \quad (3.11)$$

El valor de la resistencia del hilo caliente R_w puede ser calculado a partir de la ecuación (3.12) que es la relación entre la variación de voltaje en el puente ΔV y el valor de la resistencia del hilo caliente R_w dando como resultado la ecuación (3.13).

$$\Delta V = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_x} - \frac{R_1}{R_1 + R_w} \right) V_0 \quad (3.12)$$

$$R_w = \frac{R_1((R_2 + R_x)(V_0 + \Delta V) - R_2 V_0)}{R_2 V_0 - \Delta V(R_2 + R_x)} \quad (3.13)$$

Finalmente podemos trabajar con las ecuaciones (3.6), (3.11) y (3.13) en (2.11) obteniendo la ecuación (3.14) para la conductividad térmica k .

$$k = \frac{\left(\frac{V_0}{R_1 + R_0} \right)^2 R_0}{4\pi L_w} \left[\frac{d \left(\frac{R_1 V_0 (R_2 + R_x) - (R_1 + R_0)(R_2 V_0 - \Delta V(R_2 + R_x))}{(R_2 V_0 - \Delta V(R_2 + R_x)) (R_0 * TCR)} \right)}{d(\ln t)} \right]^{-1} \quad (3.14)$$

Las expresiones matemáticas previamente presentadas deberán ser plasmadas al control encargado de adquirir, procesar y presentar la información deseada. Esto se verá en el diseño de la interfaz de usuario.

3.3 Diseño de la interfaz de usuario

Para la elaboración de la interfaz se está empleando un proyecto en el software LabView el cual proporciona las herramientas de adquisición y manipulación de datos necesarias para medir la conductividad térmica y otorga un medio simple de comunicación con el usuario.

La interfaz deberá mostrar de manera clara los parámetros ingresados por el usuario, lecturas adquiridas por los instrumentos empleados, datos procesados, gráficos dinámicos, indicadores de estado del proceso y una generación de banco de datos automático de cada medición realizada.

3.4 Diagrama electrónico

En la Figura 3.8 se presenta la configuración electrónica del módulo. La alimentación del módulo se suministrará por los terminales VDC y GNDREF. La salida digital P1.0 permitirá el flujo de corriente a través del puente de Wheatstone y las entradas analógicas AI 1, AI 9, AI 2 y AI 10 son conectadas en forma diferencial para adquirir datos de voltaje de puente y voltaje de alimentación respectivamente.

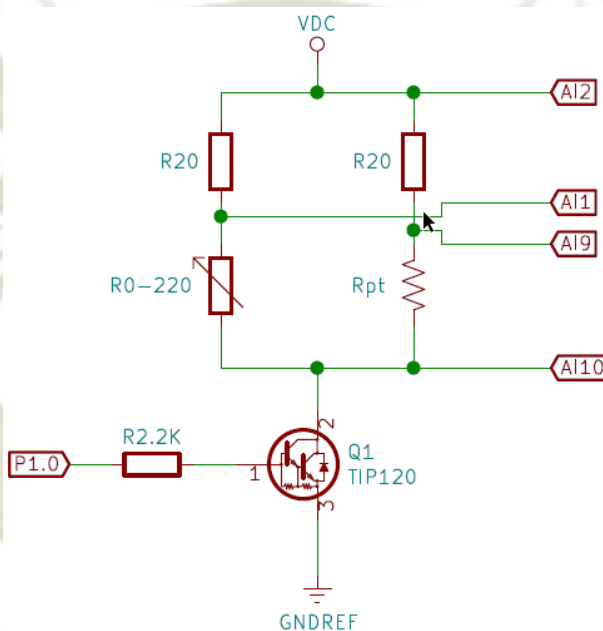


Figura 3.8. Diagrama eléctrico
Fuente: Elaboración propia

3.5 Diagrama de interfaz de usuario

De acuerdo al diagrama electrónico planteado y al procedimiento experimental a seguir, se desarrolló la interfaz de usuario, que está compuesta por un Panel Frontal y un Diagrama de Bloques presentados en la Figura 3.9 y Figura 3.10 respectivamente.

Durante el proceso de medición el usuario interactuará con el módulo por medio del Panel Frontal, en donde proporcionará los parámetros iniciales y seleccionará el número de muestras a emplear en la medición una vez generados los gráficos.

El Panel Frontal dispone de una tabla iterativa donde se presentarán los datos calculados, además de presentar variables de voltaje, cambio de temperatura y conductividad térmica en 5 gráficos.

En el Diagrama de Bloques se puede distinguir los parámetros iniciales y las salidas a presentar en el Panel Frontal, además de los subVIs que son los subprogramas que realizan distintas funciones en el proceso y proporciona una lectura simple al programador.

Dentro de los subVIs se pueden encontrar funciones como la configuración de inicio y fin de proceso, configuraciones de entradas analógicas, creación de registros, modelo matemático y limpieza de gráficos entre otros como se muestra en la Figura 3.11.

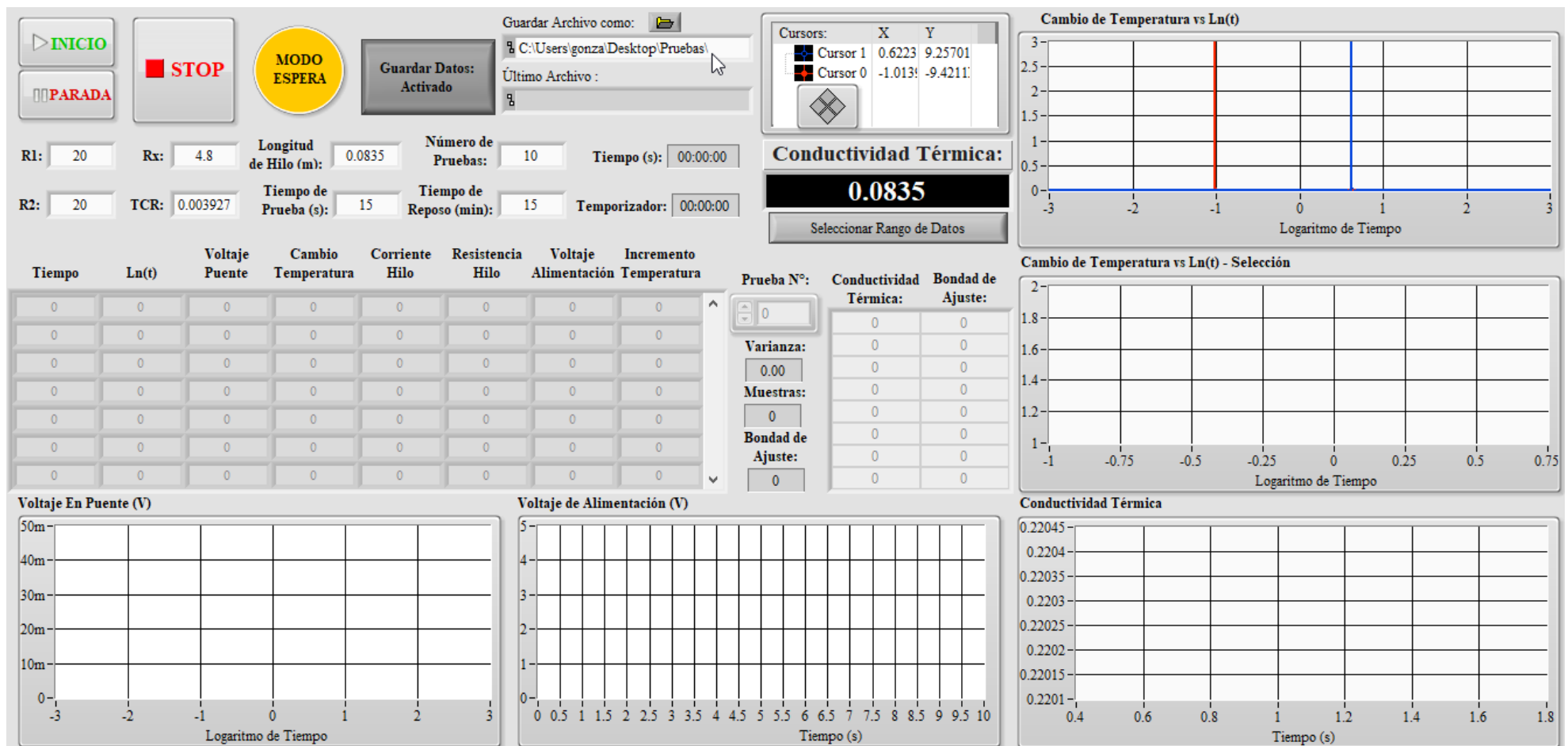


Figura 3.9. Interfaz de Usuario – Panel Frontal
 Fuente: Elaboración propia

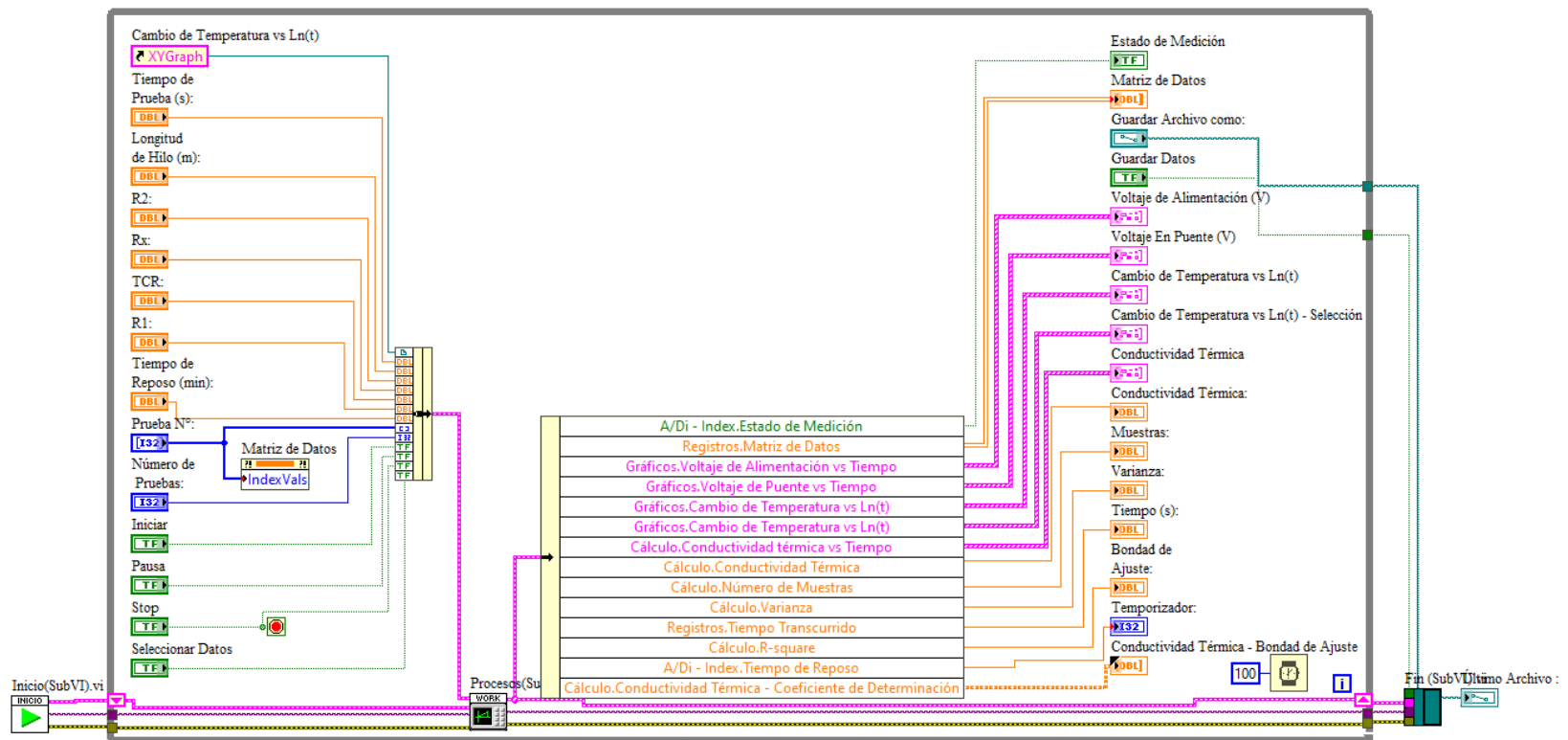


Figura 3.10. Interfaz de Usuario – Diagrama de Bloques
Fuente: Elaboración propia

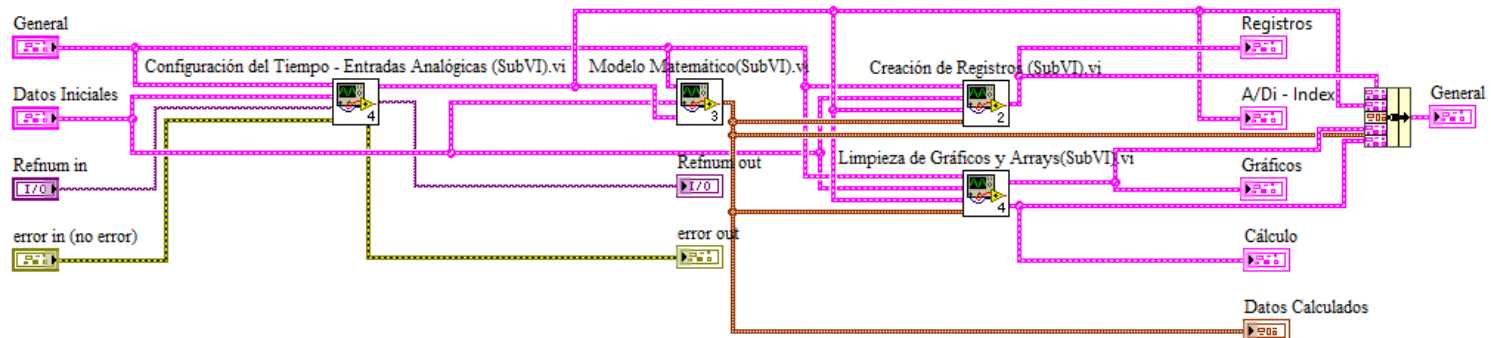


Figura 3.11. Diagrama de Bloques de Procesos (SubVI)
Fuente: Elaboración Propia

3.6 Diagrama de flujo

El diagrama de flujo de la medición de conductividad térmica en el módulo se presenta a continuación. Este está conformado por un programa principal y otros subprogramas que realizan tareas específicas en el programa principal. Se tiene la Figura 3.12.

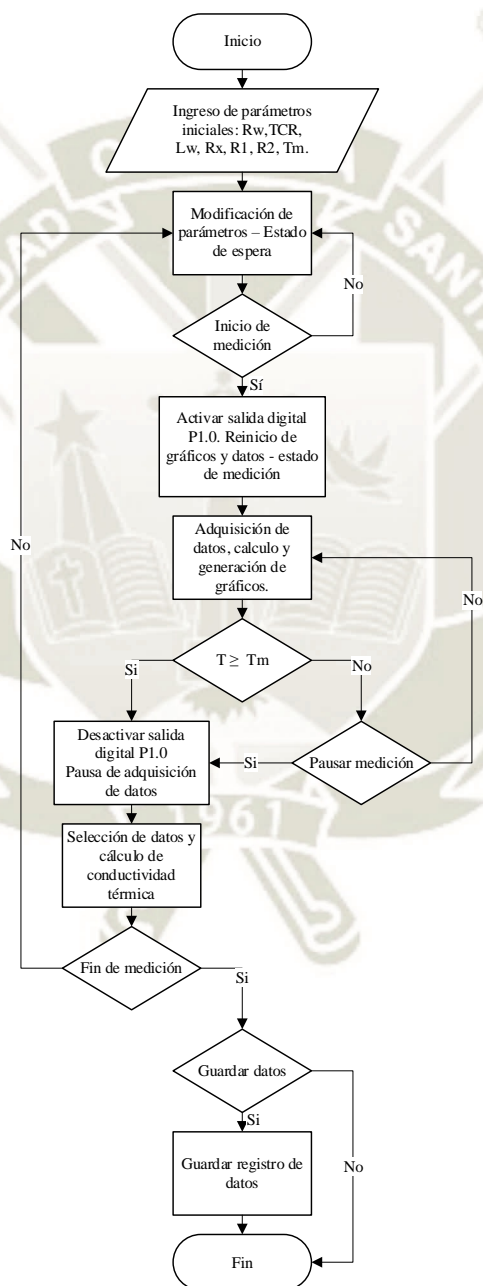


Figura 3.12. Diagrama de flujo de control
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN

Las mediciones de conductividad térmica de fluidos líquidos se realizarán en los laboratorios de la Universidad Católica de Santa María. El tipo de investigación es experimental aplicada.

2. MATERIALES E INSTRUMENTOS

2.1 Materiales

- Etilenglicol.
- Agua destilada esterilizada.
- Hilo de platino.
- Resistencias de precisión.
- Bagueta de vidrio.
- Probeta de vidrio.
- Celda de medición.
- Vaso de precipitado de vidrio.

2.2 Instrumentos

- Fuente de voltaje.
- Tarjeta de adquisición de datos.
- Ordenador.
- Multímetro.
- Cable de datos USB.
- Cables de conexión.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1.1 Metodología de medición

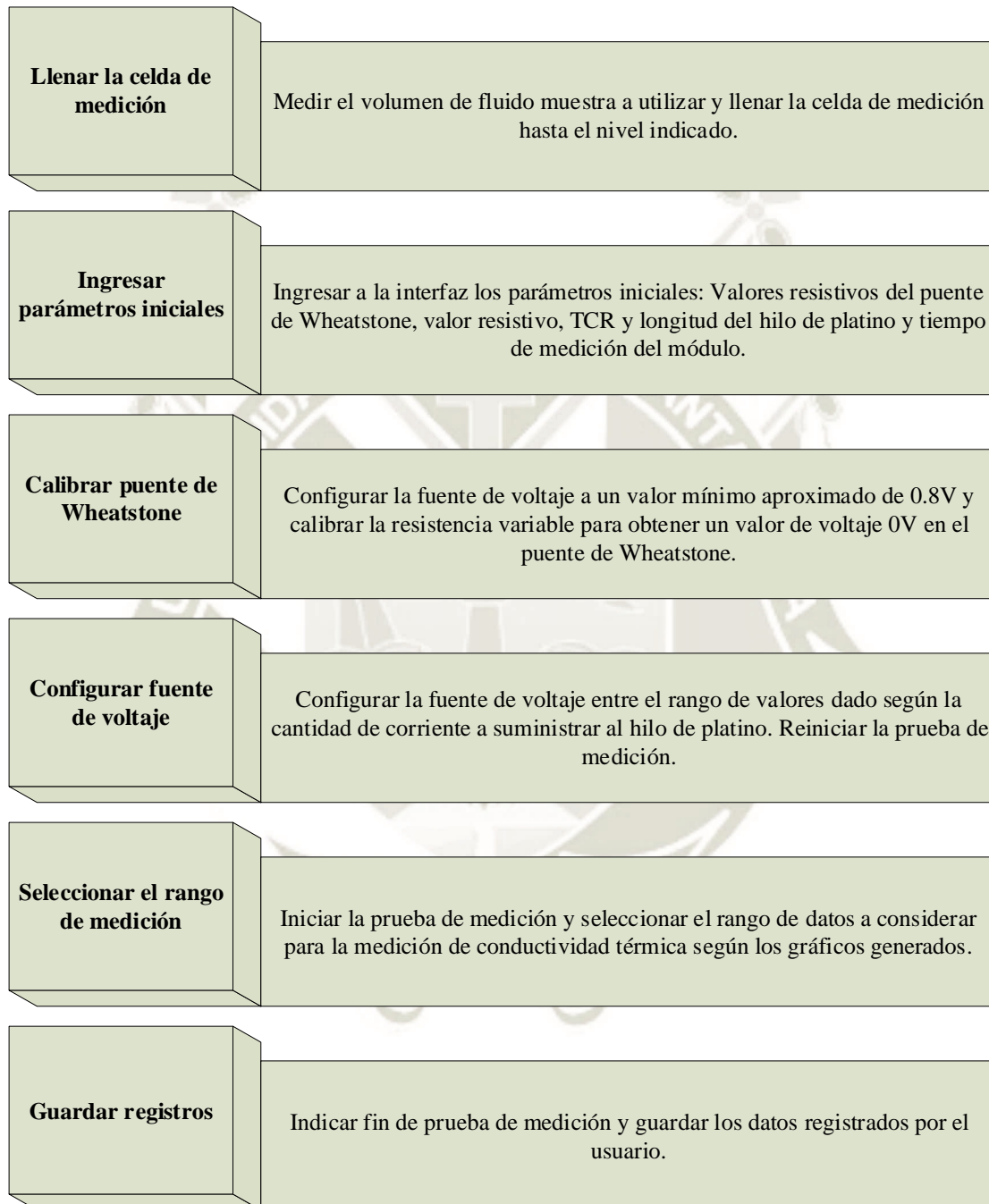


Figura 4.1. Metodología de medición

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Desarrollo de la metodología de medición de conductividad térmica por método transitorio del hilo caliente

Para la obtención de la conductividad térmica se procederá a realizar 5 a más mediciones con el fluido muestra en las mismas condiciones para reducir errores de exactitud. La temperatura ambiente será considerada como la temperatura inicial, de la misma forma las mediciones serán realizadas a presión atmosférica.

1. El desarrollo empieza con la medición de volumen de fluido muestra a emplear. Para este proceso se puede llenar la celda de medición hasta cubrir completamente la superficie del hilo de platino. Es importante que el fluido, en caso de ser eléctricamente conductivo, no roce los bornes de cobre con el fin de evitar filtraciones de corriente que podrían causar errores en la medición. Se tiene la Figura 4.2.

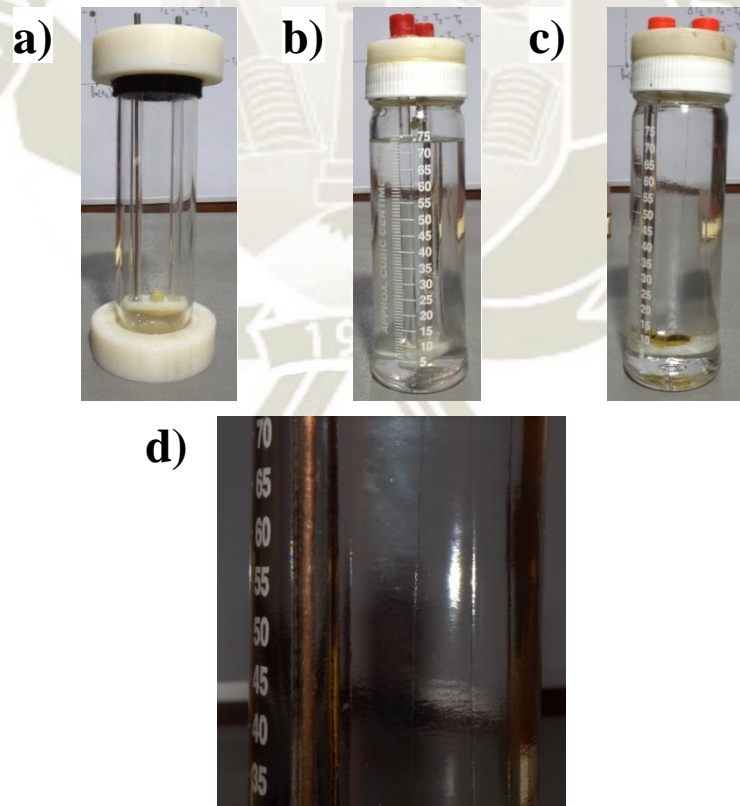


Figura 4.2. Presentación de **a** celda vacía, **b** celda llena con Etilenglicol (EG), **c** celda con Agua destilada (DW) e **d** hilo caliente en buenas condiciones después del llenado de la celda de medición

Fuente: Elaboración propia

- Al iniciar el programa, el usuario deberá ingresar los parámetros iniciales tales como los valores de resistencias del puente de Wheatstone, el valor resistivo inicial del hilo de platino, la longitud del hilo de platino, el coeficiente térmico resistivo del hilo de platino y los tiempos de medición. Se tiene la Figura 4.3.

| | | | | | | | |
|-----|----|------|----------|-----------------------|---------|-------------------------|----|
| R1: | 20 | Rx: | 5.3 | Longitud de Hilo (m): | 0.09525 | Número de Pruebas: | 5 |
| R2: | 20 | TCR: | 0.003927 | Tiempo de Prueba (s): | 13 | Tiempo de Reposo (min): | 10 |

Figura 4.3. Ingreso de parámetros iniciales en la interfaz de usuario
Fuente: Elaboración propia

- Para calibrar el puente de Wheatstone se requerirá configurar la fuente de voltaje a un nivel bajo, lo suficiente para activar el transistor y permitir un flujo mínimo de corriente a través del puente y no produzca un cambio de temperatura considerable en la celda de medición. En la Figura 4.4 se presenta la fuente de voltaje configurada en 0.75V que permite un flujo de corriente de 0.017A a través del puente de Wheatstone. Estos valores son adecuados para calibrar el puente.

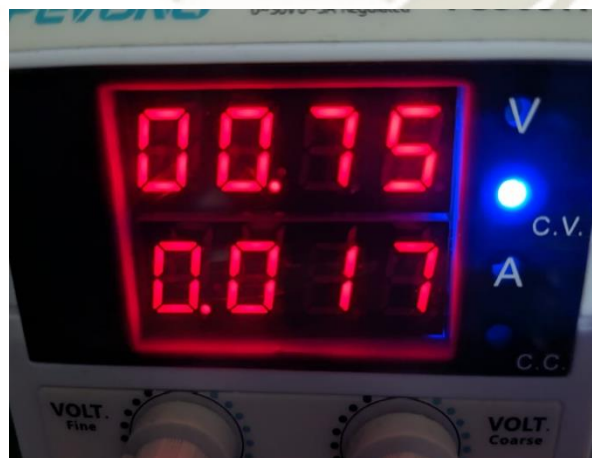


Figura 4.4. Fuente de voltaje configurada para la calibración del puente de Wheatstone
Fuente: Elaboración propia

Una vez establecido el flujo de corriente, manipular la resistencia variable del módulo como se muestra en la Figura 4.5 para poder adquirir un nivel de voltaje nulo en el puente de Wheatstone. Se puede apreciar este proceso en la interfaz de usuario.



Figura 4.5. Calibración de puente de Wheatstone
Fuente: Elaboración propia

Se deberá realizar este paso con cada celda de medición a utilizar debido a los distintos valores resistivos del hilo caliente en cada una de ellas. En la Figura 4.6 se presenta la calibración del puente de Wheatstone donde se configura a un óptimo valor de voltaje menor a 500uV.

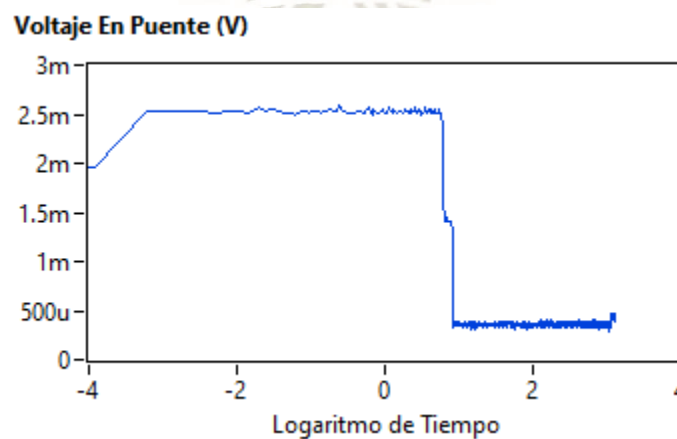


Figura 4.6. Voltaje en puente de Wheatstone vs logaritmo de tiempo – Calibración de puente de Wheatstone
Fuente: Elaboración propia

- Configurar el voltaje de alimentación de la fuente de voltaje según el valor deseado de corriente que fluirá a través del hilo. A continuación, se presenta una tabla de valores de voltaje suministrados al puente de Wheatstone que otorgan diversos valores de corrientes al puente.

Tabla 13. Voltajes de alimentación para flujo de intensidad eléctrica en hilo caliente

| Voltaje de alimentación V_0 , V | Intensidad eléctrica del hilo I_w , mA |
|-----------------------------------|--|
| 4.50 | 143.1 |
| 5.24 | 171.4 |
| 5.50 | 181.1 |
| 6.01 | 200.8 |

Nota. Los valores indicados corresponden a una celda en particular. Los valores pueden variar según el uso de diferentes celdas debido a diferentes valores resistivos del propio hilo caliente.

- Una vez configurados los parámetros mencionados se podrá enviar la señal de inicio al programa, que iniciará la adquisición y presentación de datos en la interfaz de usuario.



Figura 4.7. Señal de inicio de medición
Fuente: Elaboración propia

Una vez alimentado el puente de Wheatstone, el hilo comenzará a variar su resistencia según el cambio de temperatura, generando una variación en el puente. Se podrá visualizar su comportamiento respecto al tiempo en los gráficos generados en la interfaz. Esto permitirá calcular la conductividad térmica empleando el modelo de la ecuación (2.11). En la Figura 4.8 se presentan los gráficos de cambio de temperatura, voltaje de alimentación y voltaje en puente de una medición de etilenglicol como fluido muestra.

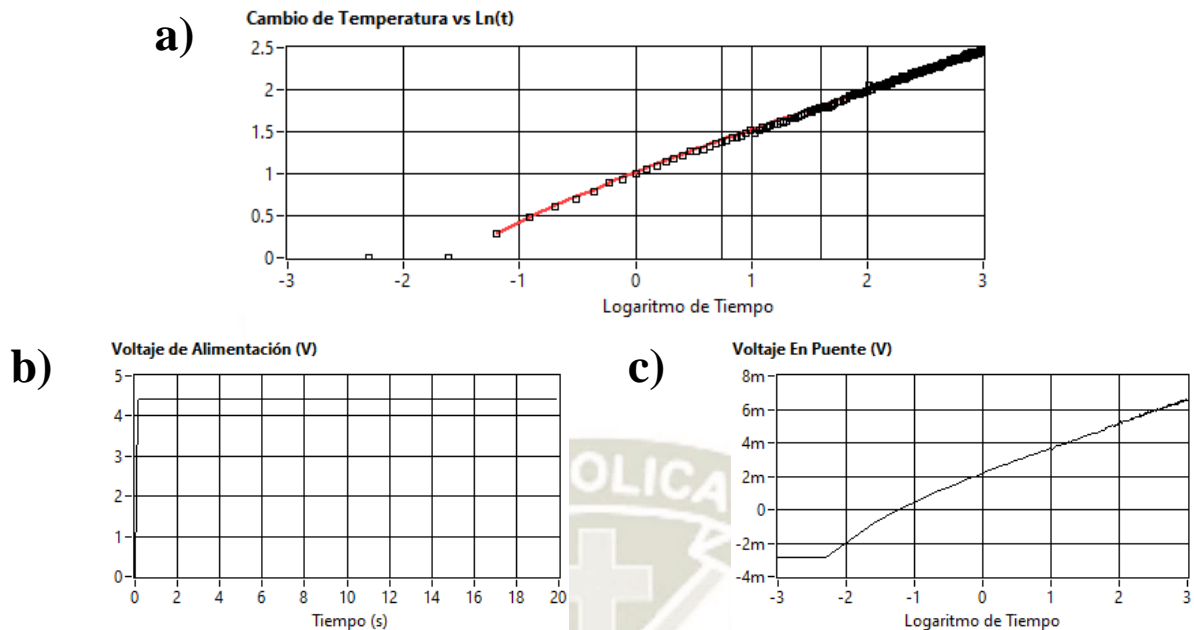
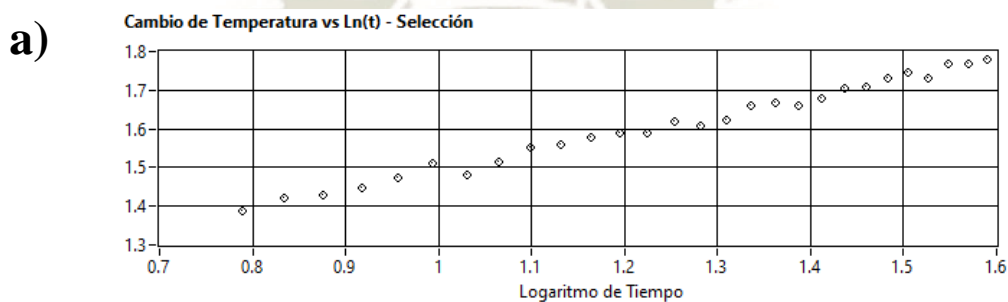


Figura 4.8. a Cambio de Temperatura vs $\ln(t)$ b Voltaje de Alimentación y c Voltaje en puente de Wheatstone
Fuente: Elaboración propia

Los gráficos generados podrán ser manipulados por el usuario a través de cursores que permitirán seleccionar la cantidad de muestras empleadas para medir la conductividad térmica. En la Figura 4.9 se presenta el rango de muestras seleccionado del cambio de temperatura y los puntos de conductividad térmica adquiridos con éste.



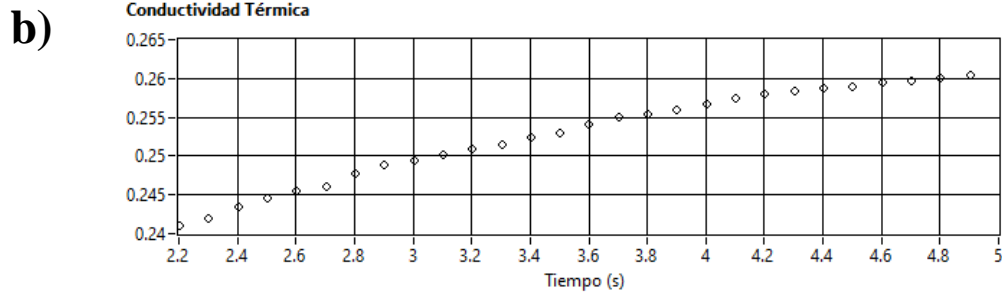


Figura 4.9. a Rango seleccionado de cambio de temperatura **b** Conductividad térmica calculada
Fuente: Elaboración propia

- Culminado el tiempo de medición, el puente de Wheatstone deja de ser alimentado y los datos adquiridos son guardados automáticamente en una hoja de Excel para la manipulación del propio usuario. El usuario podrá iniciar una nueva medición en una celda diferente con el fluido muestra o después de que la celda empleada haya estado en reposo durante un tiempo razonable para evitar errores de medición.

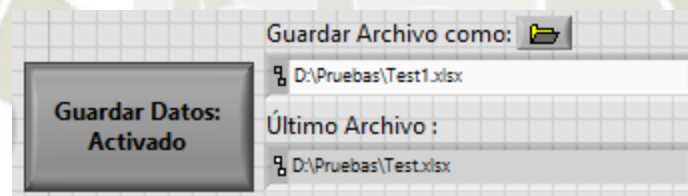


Figura 4.10. Opciones de guardado en interfaz de usuario
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

1. MEDICIONES REALIZADAS

Presentada la metodología en el capítulo anterior, se procedió a realizar la medición de conductividad térmica en dos fluidos muestra. Estos fueron Etilenglicol (EG) y agua destilada (DW). Las pruebas fueron realizadas un número de 5 veces en cada muestra, con tres intervalos de tiempo de reposo de 3, 5 y 10 minutos.

Las mediciones realizadas se dieron a temperatura ambiente (21°C), aplicando distintos valores de corriente para cada muestra debido a los diferentes valores de conductividad térmica registradas en referencias anteriores. Se recomienda emplear un valor de corriente menor para la muestra de etilenglicol (EG) con el fin de evitar la temprana activación de convección natural al calentar el hilo caliente y un valor de corriente mayor para la muestra de agua destilada (DW) para obtener una mayor relación señal – ruido.

En la Tabla 14 se compara los valores referencia entre los fluidos muestra, etilenglicol (EG) y agua destilada (DW), y los valores medidos por el módulo fabricado. Además, se señala el error de medición el cual es mínimo valor obtenido de todas las mediciones realizadas durante el experimento.

Tabla 14. Comparación de conductividades térmicas medidas y referencias

| Fluido | Referencia, W/m°C | Medición, W/m°C | Error de medición |
|---------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| Etilenglicol (EG) | 0.252 | 0.253 | 0.15% |
| Agua destilada (DW) | 0.612 | 0.614 | 0.25% |

Nota. Los resultados señalados corresponden a las mediciones obtenidas por el módulo más próximas a los valores de referencia. Fuente: Elaboración propia

Para obtener la medida de la conductividad térmica se empleó un método estadístico en el cual se calcula el promedio y varianza (σ^2) a todos los datos de la medición obtenidos. Luego, los datos que se encuentren en el rango entre ($\text{promedio} - \sigma^2$) y ($\text{promedio} + \sigma^2$) serán asumidos para calcular un nuevo promedio y los datos que no se encuentren dentro del rango serán descartados.

El criterio empleado para seleccionar el rango de datos para la medición consiste en la comparación de un arreglo lineal y los datos obtenidos. Se emplea un coeficiente de determinación (bondad de ajuste, R^2) que indica la “linealidad” de los datos obtenidos. Este coeficiente permitirá escoger un rango de datos adecuado para la medición, siendo este valor lo más cercano posible a la unidad.

Se presenta la Tabla 15, donde se detalla los resultados de medición de conductividad térmica de ambos fluidos muestra, así como la desviación estándar y exactitud frente a los valores de referencia. Se ordenaron los datos obtenidos según el tiempo de reposo entre mediciones con el fin de comparar su efecto en las mismas.

Tabla 15. Resultados de medición de conductividad térmica de Etilenglicol y Agua destilada

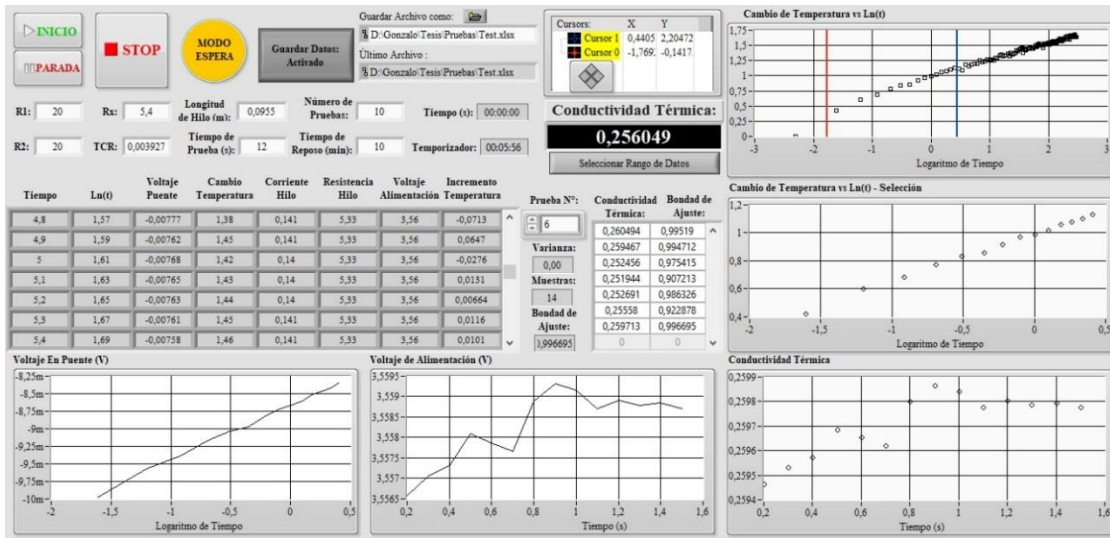
| Medición | Etilenglicol (EG) | | | Agua destilada (DW) | | |
|----------------------------|-------------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|
| | 3 min | 5 min | 10 min | 3 min | 5 min | 10 min |
| 1 | 0.258105 | 0.253845 | 0.252456 | 0.611179 | 0.614162 | 0.604757 |
| 2 | 0.244612 | 0.251888 | 0.251944 | 0.628932 | 0.617762 | 0.613275 |
| 3 | 0.268934 | 0.252208 | 0.252691 | 0.633591 | 0.610256 | 0.613772 |
| 4 | 0.247987 | 0.253861 | 0.25558 | 0.625218 | 0.612657 | 0.615245 |
| 5 | 0.249163 | 0.252411 | 0.254231 | 0.621345 | 0.620068 | 0.620748 |
| Desviación estándar | 0.00984 | 0.000941 | 0.001496 | 0.008503 | 0.003937 | 0.005747 |
| Incertidumbre relativa (%) | 3.88 | 0.37 | 0.59 | 1.36 | 0.64 | 0.94 |
| Exactitud (%) | ±0.69% | ±0.33% | ±0.15% | ±1.97% | ±0.49% | ±0.25% |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados demuestran una gran proximidad entre los valores experimentales y los valores referenciales. La exactitud y precisión total para la medición de conductividad térmica de etilenglicol se indica en $\pm 0.39\%$ y 1.00% respectivamente. Los resultados de medición de conductividad térmica de agua destilada (DW) presentan menor dispersión que los resultados de etilenglicol (EG) en las mediciones con intervalos de reposo de 3 minutos cuyos valores totales de exactitud y precisión se indican en $\pm 0.90\%$ y 0.98% respectivamente.

En la Figura 5.1 se tiene la interfaz funcionando en el estado de espera **a** y en el estado de medición **b**. A medida que las mediciones se van concretando, el usuario puede seleccionar la medición específica a analizar, donde podrá definir el rango de datos a considerar en el cálculo y finalmente agregar el valor de conductividad térmica medido al array de valores obtenidos con las demás mediciones.

a)



b)

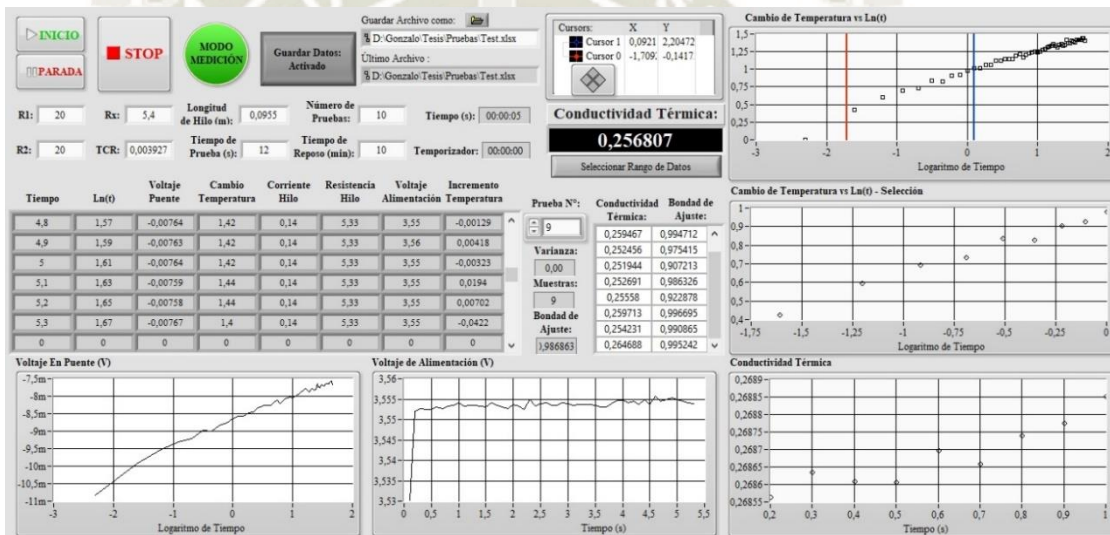


Figura 5.1. Presentación de la interfaz de usuario durante medición de etilenglicol (EG) en **a** Interfaz en estado de espera **b** Interfaz en estado de medición
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.2 se presenta el módulo fabricado dentro de una caja de aluminio cuya función es aislar los componentes electrónicos del ambiente en el que se encuentre para reducir las posibles perturbaciones a las señales sensibles a adquirir por la tarjeta de adquisición de datos. Adicionalmente se muestra el interior del módulo que contiene la tarjeta de adquisición de datos con algunas de sus entradas y salidas conectadas a los componentes electrónicos como un

transistor, resistencias y bornes de conexión. Finalmente se tiene la Tabla 16 donde se presenta la lista de partes del módulo implementado.



Figura 5.2. Presentación del módulo fabricado **a** Vista exterior: Caja de aluminio y bornes de conexión **b** Vista interna: Tarjeta de adquisición de datos, componentes electrónicos y cableado
Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Lista de partes

| Ítem | Descripción | Cantidad |
|------|--|----------|
| 1 | Tarjeta de adquisición de datos USB 6210 | 1 |
| 2 | Fuente de voltaje programable 9120A | 1 |
| 3 | Resistencias de precisión 20 PPM/°C | 2 |
| 4 | Hilo de platino 0.004'' – 10ft | 1 |
| 5 | Celdas de medición | 5 |
| 6 | Conectores tipo banana | 8 |
| 7 | Bornes tipo banana | 4 |
| 8 | Caja electrónica de aluminio | 1 |
| 9 | Transistor TIP120 | 1 |
| 10 | Resistencia de película de carbón 2.2k Ω | 1 |
| 11 | Resistencias variables de precisión 220 Ω | 1 |
| 12 | Cables eléctricos | - |

Nota. Se omitió los materiales de trabajo empleados en la fabricación de las celdas de medición como el nylon sólido, vidrio y bornes de conexión.

2. COSTOS

El presupuesto del módulo presenta tres categorías de costos: componentes, fabricación y diseño. En la Tabla 17 se presenta los montos generales de cada categoría, las cuales serán detallados a continuación.

Tabla 17. Costos totales

| Concepto | Costo (S/.) |
|-----------------------|-----------------|
| Costos de componentes | 9762.10 |
| Costos de fabricación | 610.00 |
| Costos de diseño | 1050.00 |
| Costo total | 11422.10 |

Fuente: Elaboración propia

2.1 Costos de componentes

Dentro de los componentes empleados, existen componentes que fueron importados y otros fueron adquiridos en el mercado local, como el material de trabajo para la fabricación de las celdas de medición. Los costos unitarios de los productos importados se detallan en dólares americanos (US\$) donde se aplicó un cambio de moneda equivalente a S/.3.465. Se presenta la Tabla 18.

Tabla 18. Costos de componentes

| Componente | Proveedor | Precio Unitario | Cantidad | Costo (S/.) |
|--|----------------------|-----------------|--------------|----------------|
| Tarjeta de adquisición de datos USB 6210 | National Instruments | \$733.50 | 1 | 2541.60 |
| Fuente de voltaje programable 9120A | BK Precision | \$639.69 | 1 | 2216.60 |
| Resistencias de precisión | Vishay | \$3.48 | 2 | 24.10 |
| Hilo de Platino | A-M Systems | \$177.00 | 1 | 613.30 |
| Pares de conectores banana | Mueller | \$2.99 | 8 | 10.40 |
| Caja electrónica de aluminio | Hammond | \$32.40 | 1 | 112.30 |
| Barra de nylon sólido | - | S/.50.00 | 1 | 50.00 |
| Transistor TIP120 | - | S/.3.00 | 1 | 3.00 |
| Cables eléctricos | - | S/.15.00 | 1 | 15.00 |
| Resistencias variables de precisión | - | S/.5.80 | 1 | 5.80 |
| | | | Subtotal | 5592.10 |
| | | | IGV- Envío | 4170.00 |
| | | | Total | 9762.10 |

Fuente: Elaboración propia

2.2 Costos de fabricación

Los costos de fabricación contemplan los costos de piezas de nylon fabricadas en procesos de torneado, los costos de ensamblaje de las celdas de medición y del propio módulo que se trabajaron en un total de 24 horas y considerando un costo de S/.10.00 por mano de obra de una

persona, finalmente se consideró los costos de programación de la lógica del sistema como el tiempo empleado en configurar el software y hardware del módulo, incluyendo las pruebas de medición a fin de verificar su funcionamiento en las que se emplearon 32 horas al mismo costo de mano de obra. Se presenta la Tabla 19.

Tabla 19. Costos de fabricación

| Concepto | Costo (S/.) |
|-----------------------------|--------------------|
| Costo por piezas fabricadas | 50.00 |
| Costos de ensamblaje | 240.00 |
| Costos de programación | 320.00 |
| Total | 610.00 |

Fuente: Elaboración propia

2.3 Costos de diseño

El diseño del módulo de medición tuvo una duración de 14 semanas donde se trabajó 15 horas en cada una, dando un total de horas de trabajo de 210 horas. Considerando un costo de S/.5.00 por hora de diseño, se tiene un costo de diseño total de S/.1050.00.

3. OBSERVACIONES

- Las mediciones con intervalos de reposo de 5 y 10 minutos presentan valores más precisos que las mediciones con intervalo de reposo de 3 minutos.
- Para aumentar la exactitud del módulo se podría medir el coeficiente térmico resistivo (TCR) del hilo de platino empleado en las celdas de medición fabricadas. Esto se puede cumplir realizando experimentos de calibración en los que se pueda

medir la dependencia térmica resistiva del hilo. El TCR empleado en los experimentos fue extraído de literaturas en las que se empleó el mismo hilo.

- La relación superficie/volumen de la celda fabricada no presenta muestra de afectar en los resultados de medición a pesar de encontrarse fuera de rango de las relaciones encontradas en la literatura, por lo que se recomienda un mayor análisis en la ecuación de energía con la aproximación de Boussinesq.
- Las correcciones aplicadas regulan el óptimo funcionamiento del módulo, por lo que para mejorar la precisión del mismo se requerirá un mayor estudio del error generado en cada corrección a aplicar.
- Los resultados obtenidos por el módulo fabricado recomiendan su capacidad para realizar mediciones en distintos fluidos eléctricamente conductivos como es el caso de nanofluidos, permitiendo realizar su caracterización térmica.
- La adquisición de un instrumento capaz de medir la conductividad térmica en fluidos líquidos está sujeta a las limitaciones del fabricante, por lo que hacer modificaciones al mismo no sería posible. En cambio, con el módulo fabricado es posible aplicar futuras mejoras.

Conclusiones

En el Laboratorio de Investigación de Ciencia de los Materiales se diseñó e implementó un módulo de medición de conductividad térmica de fluidos líquidos aplicando el método transitorio del hilo caliente, cuyo principio se basa en la medición del cambio de temperatura. Este permite la evaluación y análisis de propiedades térmicas en líquidos eléctricamente conductivos, aportando a las futuras investigaciones en los nanofluidos producidos en el laboratorio.

Las mediciones realizadas en agua destilada (DW) y etilenglicol (EG) obtuvieron un margen mínimo de error de medición de hasta 0.25% y 0.15% respectivamente (Tabla 14), demostrando el óptimo funcionamiento del módulo fabricado.

Para minimizar el margen de error en las mediciones, se examinó diversos parámetros de diseño como la selección de las dimensiones mínimas de las celdas de medición fabricadas, que cumplen con parámetros que aportan a la disminución del error de medición. De igual modo, las resistencias de precisión empleadas en el módulo presentan un bajo TCR comparado a las resistencias convencionales, por lo que el efecto de variación resistiva a causa del flujo de corriente a través de ellos es mínimo y no compromete los resultados de conductividad térmica.

Se diseñó una interfaz de usuario en el software de aplicación LabView, donde la adquisición y supervisión gráfica de datos es automática y secuencial una vez ingresados los parámetros iniciales. Antes de realizar una medición es importante calibrar el puente de Wheatstone por medio de la resistencia variable equipada en el módulo.

Una vez iniciado el proceso de medición, el usuario procederá a realizar la selección del rango de datos adquiridos, donde se deberá incluir únicamente regiones lineales para el cálculo de la conductividad térmica, por lo que usualmente se descartará los primeros y últimos datos de las

mediciones debido a los efectos de la capacidad calorífica finita del hilo caliente y la aparición de convección natural respectivamente. La interfaz contempla un temporizador automático que envía la señal de inicio una vez se haya cumplido el tiempo de reposo ingresado.

En los resultados obtenidos, el parámetro de tiempo de reposo indica un aumento de precisión cuando éste es mayor a 5 minutos. Ver Tabla 15. Este parámetro puede ser controlado por el usuario o por la propia interfaz al momento de configurar los parámetros iniciales de la medición; se debe tener en cuenta la cantidad de mediciones a realizar. Una vez completadas todas las mediciones y seleccionados los rangos de datos a utilizar, se procederá a aplicar el cálculo de la conductividad térmica según el modelo matemático explicado en el capítulo 3.

El método estadístico empleado para calcular la conductividad térmica de las muestras permite descartar datos cuya dispersión pueda generar cambios notables en los resultados si es que estos fueran considerados. De igual forma, se puede analizar el comportamiento del hilo caliente a través de los gráficos generados en la interfaz de usuario, por lo que se podría descartar la medición al presentar anomalías como filtraciones de corriente eléctrica en fluidos conductivos, efectos de convección natural y/o radiación y bajos incrementos de temperatura que podrían indicar valores erróneos entre otros. Por tanto, es importante realizar un número apropiado de mediciones con lo cual aumentará la confiabilidad del instrumento al presentar un resultado.

Finalmente, en la implementación del módulo se empleó instrumentación cuyo costo fue menor al de módulos presentados anteriormente, con la cual se obtuvieron resultados similares a los referidos por la literatura. El costo final del diseño e implementación del módulo de medición es de un monto de S/.11422.10, donde se incluyen costos de adquisición de componentes, diseño y fabricación.

Recomendaciones

- Al momento de seleccionar un rango de datos se recomienda un criterio adecuado por parte del usuario al escoger la región lineal de datos, además de hacer uso de los valores de ajuste de bondad, sin descuidar el número de muestras consideradas en el rango en cada medición, las cuales no deberían ser menores a 16 muestras, según recomendaciones de la literatura.
- Para realizar mediciones de conductividad térmica a diferentes temperaturas es recomendado implementar un control de temperatura que permita acondicionar las muestras antes de la medición. Una vez alcanzada la temperatura inicial deseada se procedería a energizar el hilo caliente.
- La adquisición de datos de temperatura se da a partir del cambio resistivo del hilo caliente, por lo que la implementación de sensores de temperatura en diferentes puntos de la celda permitiría corroborar o incluso mejorar la fiabilidad de los datos calculados por el modelo matemático aplicado.

Referencias

- Alvarado, R. S. (2011). *Técnica Del Hilo Caliente Para La Caracterización Térmica De Líquidos*. México.
- Azarfar, S., Movahedirad, S., Sarbanha, A., Norouzbeigi, R., & Beigzadeh, B. (2016). Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids.
- Carlslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. London.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones*. Mc Graw Hill.
- Choi, S. U., & Eastman, J. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles.
- De Groot, J. J., Kestin, J., & Sookiazian, H. (1974). Instrument To Measure The Thermal Conductivity Of Gases.
- Donghoon, Y., Joohyun, L., Byeongchan, L., Suyong, K., & Junemo, K. (2017). Further Elucidation Of Nanofluid Thermal Conductivity Measurement Using A Transient Hot-Wire Method Apparatus.
- Ebrahimi, S., & Saghravani, S. F. (2017). Experimental study of the thermal conductivity features of the water based Fe₃O₄/CuO nanofluid.
- Fujii, M., Zhang, X., Imaishi, N., Fujiwara, S., & Sakamoto, T. (1997). Simultaneous Measurements Of Thermal Conductivity And Thermal Diffusivity Of Liquids Under Microgravity Conditions.

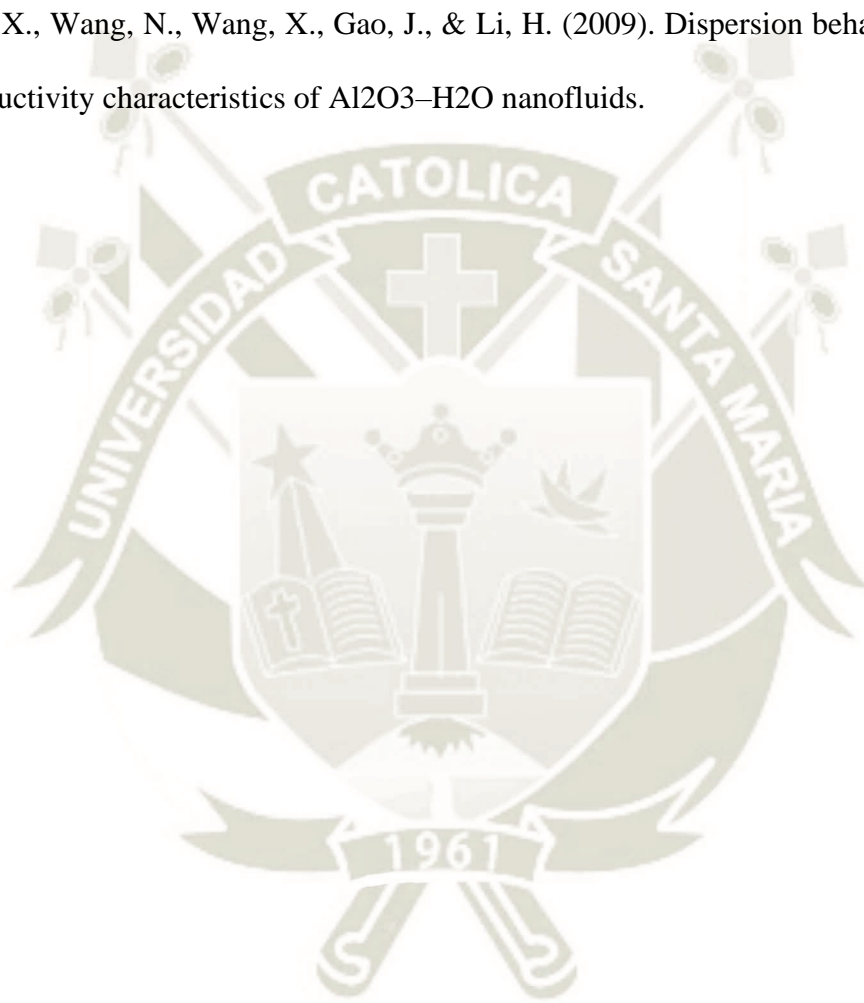
- Garcia, D. S., Lira, C. L., & Méndez, L. E. (2010). Circuito De Medición Para Operar El Método Transitorio Del Hilo Caliente En La Medición De La Conductividad Térmica De Fluidos Simples.
- Glatzmaier, G. C., & Ramirez, F. W. (1985). Simultaneous Measurement Of The Thermal Conductivity And Thermal Diffusivity Of Unconsolidated Materials By The Transient Hot Wire Method.
- Healy, J., Groot, J. d., & Kestin, J. (1975). The Theory Of The Transient Hot-Wire Method For Measuring Thermal Conductivity.
- Hong, S. W., Jung, J., Kang, Y. T., & Koo, J. (2010). Parametric Study On Transient Hot-Wire Method To Measure Nanofluid Conductivities.
- Hong, S. W., Kang, Y.-T., Kleinstreuer, C., & Koo, J. (2011). Impact Analysis Of Natural Convection On Thermal Conductivity Measurements.
- Horrocks, J. K., & McLaughlin, E. (1963). Non-steady-state measurements of thermal conductivities of liquid polyphenyls.
- Jiang, W., Ding, G., & Peng, H. (2008). Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants.
- Johns, A. I., Scott, A. C., Watson, J. T., Ferguson, D., & Clifford, A. A. (1988). Measurement of the Thermal Conductivity of Gases by the Transient Hot-Wire Method. *The Royal Society*.
- Karthik, R., Harish Nagarajan, R., Raja, B., & Damodharan, P. (2012). Thermal Conductivity of Cu-DI water nanofluids using 3-w measurement technique in a suspended micr-wire.
- Kostic, M., & Kalyan, C. S. (2009). Computerized, Transient Hot-Wire Thermal Conductivity (HWTC) Apparatus for Nanofluids.

- Lee, J.-w., Hwang, K. S., Jang, S. P., Lee, B. H., Kim, J. H., Choi, S. U., & Choi, C. J. (2008). Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles.
- Marquis, F. D., & Chibante, L. P. (2005). Improving the heat transfer of nanofluids and nanolubricants with carbon nanotubes.
- Marron Matta, C. (2018). *Obtención de nanofluidos a partir de nanotubos de carbono en agua deionizada como fluido base*. Arequipa.
- P. Incropera, F., & P. De Witt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Pearson Hill.
- Paul, G., Chopkar, M., Manna, I., & Das, P. (2010). Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review.
- Rashmi, W., Ismail, A. F., & Mohammad, K. (2012). Thermal conductivity of carbon nanotube nanofluid - Experimental and theoretical study.
- Robles S., M., R., V., Lozano M., D., & Gutierrez V., C. (2016). Aplicación del método de hilo caliente en la determinación de la resistencia térmica de bloques de concreto-material reciclado.
- Sabiha, M. A., Mostafizur, R. M., Saidur, R., & Mekhilef, S. (2015). Experimental investigation on thermo physical properties of single walled carbon nanotube nanofluids.
- Shijo, T., & Choondal, B. P. (2011). A review of experimental investigations on thermal phenomena in nanofluids.
- Wenwen, G., Guoneng, L., Youqu, Z., & Cong, D. (2018). Measurement of the thermal conductivity of SiO₂ nanofluids with an optimized transient hot wire method.
- Wong, V. K., & De Leon, O. (2009). Applications of Nanofluids: Current and Future.

Yazid, M. N., Sidik, N. A., & Yahya, W. J. (2017). Heat and mass transfer characteristics of carbon nanotube nanofluids: A review.

Yu, W., & Choi, S. U.-S. (2006). Influence of insulation coating on thermal conductivity measurement by transient hot-wire method.

Zhu, D., Li, X., Wang, N., Wang, X., Gao, J., & Li, H. (2009). Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al₂O₃-H₂O nanofluids.



Anexo A. Hoja de datos de tarjeta de adquisición de datos

NI USB – 6210

SPECIFICATIONS

USB-6210

16 AI (16-Bit, 250 kS/s), 4 DI, 4 DO USB Multifunction I/O Device

Definitions

Warranted specifications describe the performance of a model under stated operating conditions and are covered by the model warranty.

The following characteristic specifications describe values that are relevant to the use of the model under stated operating conditions but are not covered by the model warranty.

- *Typical* specifications describe the performance met by a majority of models.
- *Nominal* specifications describe an attribute that is based on design, conformance testing, or supplemental testing.

Specifications are *Typical* unless otherwise noted.

Conditions

Specifications are valid at 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input

| | |
|----------------------------------|--|
| Number of channels | 8 differential or 16 single ended |
| ADC resolution | 16 bits |
| DNL | No missing codes guaranteed |
| INL | Refer to the <i>AI Absolute Accuracy</i> section |
| Sample rate | |
| Single channel maximum | 250 kS/s |
| Multichannel maximum (aggregate) | 250 kS/s |
| Minimum | 0 S/s |
| Timing accuracy | 50 ppm of sample rate |
| Timing resolution | 50 ns |
| Input coupling | DC |

Typical Performance Graphs

Figure 1. Settling Error versus Time for Different Source Impedances

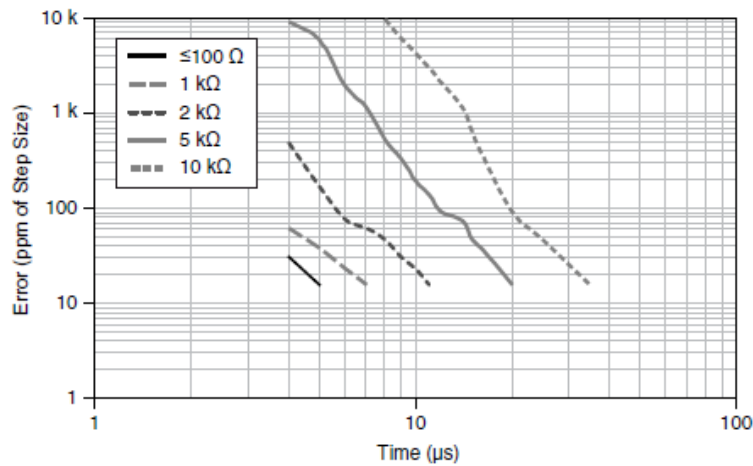
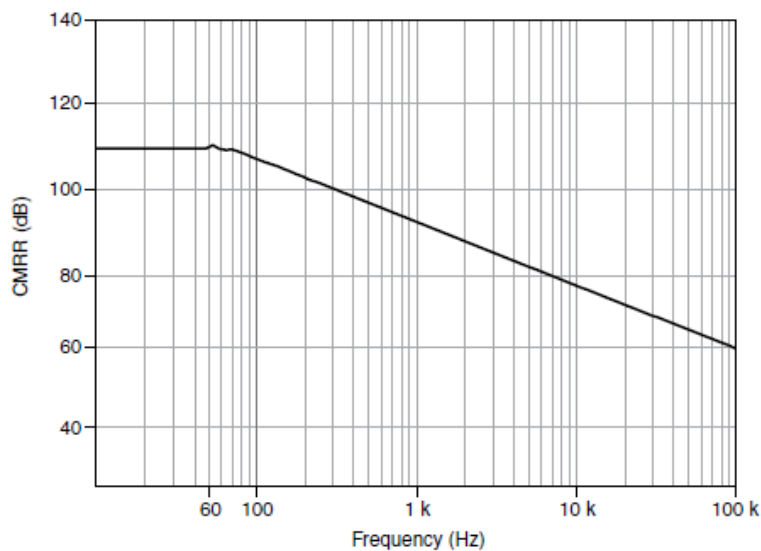


Figure 2. AI CMRR



AI Absolute Accuracy (Warranted)



Note Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.



Note The input/output channels of this device are not protected for electromagnetic interference due to functional reasons. As a result, this device may experience

reduced measurement accuracy or other temporary performance degradation when connected cables are routed in an environment with radiated or conducted radio frequency electromagnetic interference. To ensure that this device functions within specifications in its operational electromagnetic environment and to limit radiated emissions, care should be taken in the selection, design, and installation of measurement probes and cables.

Table 1. AI Absolute Accuracy

| Nominal Range Positive Full Scale (V) | Nominal Range Negative Full Scale (V) | Residual Gain Error (ppm of Reading) | Residual Offset Error (ppm of Range) | Offset Tempco (ppm of Range/°C) | Random Noise, σ (μVrms) | Absolute Accuracy at Full Scale (μV) | Sensitivity (μV) |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---|---|-------------------------------|
| 10 | -10 | 75 | 20 | 34 | 229 | 2,690 | 91.6 |
| 5 | -5 | 85 | 20 | 36 | 118 | 1,410 | 47.2 |
| 1 | -1 | 95 | 25 | 49 | 26 | 310 | 10.4 |
| 0.2 | -0.2 | 135 | 40 | 116 | 12 | 88 | 4.8 |



Note Sensitivity is the smallest voltage change that can be detected. It is a function of noise.

| | |
|------------------|-----------------|
| Gain tempco | 7.3 ppm/°C |
| Reference tempco | 5 ppm/°C |
| INL error | 76 ppm of range |

AI Absolute Accuracy Equation

$$\text{AbsoluteAccuracy} = \text{Reading} \cdot (\text{GainError}) + \text{Range} \cdot (\text{OffsetError}) + \text{NoiseUncertainty}$$

$$\text{GainError} = \text{ResidualAIGainError} + \text{GainTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastInternalCal}) + \text{ReferenceTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastExternalCal})$$

$$\text{OffsetError} = \text{ResidualAIOffsetError} + \text{OffsetTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastInternalCal}) + \text{INLError}$$

$$\text{NoiseUncertainty} = \frac{\text{Random Noise} \cdot 3}{\sqrt{100}} \text{ for a coverage factor of } 3 \sigma \text{ and averaging } 100 \text{ points.}$$

AI Absolute Accuracy Example

Absolute accuracy at full scale on the analog input channels is determined using the following assumptions:

- TempChangeFromLastExternalCal = 10 °C
- TempChangeFromLastInternalCal = 1 °C
- number_of_readings = 100
- CoverageFactor = 3 σ

For example, on the 10 V range, the absolute accuracy at full scale is as follows:

$$\text{GainError} = 75 \text{ ppm} + 7.3 \text{ ppm} \cdot 1 + 5 \text{ ppm} \cdot 10 = 132 \text{ ppm}$$

$$\text{OffsetError} = 20 \text{ ppm} + 34 \text{ ppm} \cdot 1 + 76 \text{ ppm} = 130 \text{ ppm}$$

$$\text{NoiseUncertainty} = \frac{229 \mu\text{V} \cdot 3}{\sqrt{100}} = 68.7 \mu\text{V}$$

$$\text{AbsoluteAccuracy} = 10 \text{ V} \cdot (\text{GainError}) + 10 \text{ V} \cdot (\text{OffsetError}) + \text{NoiseUncertainty} = 2,690 \mu\text{V}$$

Digital I/O and PFI

Static Digital I/O Characteristics

| | |
|-----------------------------------|---|
| Number of digital input channels | 4 (PFI <0..3>/P0.<0..3>) |
| Number of digital output channels | 4 (PFI <4..7>/P1.<0..3>) |
| Ground reference | D GND |
| Pull-down resistor | 47 k Ω \pm 1% |
| Input voltage protection | \pm 20 V on up to 8 pins ¹ |

PFI Functionality

| | |
|--------------------------|---|
| PFI <0..3>/Port 0 | |
| Functionality | Static digital input, timing input |
| Debounce filter settings | 125 ns, 6.425 μ s, 2.56 ms, disable; high and low transitions; selectable per input |
| PFI <4..7>/Port 1 | |
| Functionality | Static digital output, timing output |
| Timing output sources | Many AI, counter timing signals |

¹ Stresses beyond those listed under *Input voltage protection* may cause permanent damage to the device.

Maximum Operating Conditions

| | |
|------------------------------|----------------|
| I_{OL} output low current | 16 mA maximum |
| I_{OH} output high current | -16 mA maximum |

Digital Input Characteristics

| Level | Minimum | Maximum |
|---|---------|-------------|
| V_{IL} input low voltage | 0 V | 0.8 V |
| V_{IH} input high voltage | 2 V | 5.25 V |
| I_{IL} input low current ($V_{in} = 0$ V) | - | -10 μ A |
| I_{IH} input high current ($V_{in} = 5$ V) | - | 120 μ A |

Digital Output Characteristics

| Parameter | Voltage Level | Current Level |
|-----------|---------------|---------------|
| V_{OL} | 0.6 V | 6 mA |
| V_{OH} | 2.7 V | -16 mA |
| V_{OH} | 3.8 V | -6 mA |

General-Purpose Counters/Timers

| | |
|-------------------------------|---|
| Number of counter/timers | 2 |
| Resolution | 32 bits |
| Counter measurements | Edge counting, pulse, semi-period, period, two-edge separation |
| Position measurements | X1, X2, X4 quadrature encoding with Channel Z reloading; two-pulse encoding |
| Output applications | Pulse, pulse train with dynamic updates, frequency division, equivalent time sampling |
| Internal base clocks | 80 MHz, 20 MHz, 0.1 MHz |
| External base clock frequency | 0 MHz to 20 MHz |
| Base clock accuracy | 50 ppm |

| | |
|----------------------------|--|
| Inputs | Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down |
| Routing options for inputs | PFI <0..3>, many internal signals |
| FIFO | 1,023 samples |
| Data transfers | USB Signal Stream, programmed I/O |

Frequency Generator

| | |
|---------------------|-----------------|
| Number of channels | 1 |
| Base clocks | 10 MHz, 100 kHz |
| Divisors | 1 to 16 |
| Base clock accuracy | 50 ppm |

Output can be available on any output PFI terminal.

External Digital Triggers

| | |
|------------------------|---|
| Source | PFI <0..3> |
| Polarity | Software-selectable for most signals |
| Analog input function | Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Convert Clock, Sample Clock Timebase |
| Counter/timer function | Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down |

Bus Interface

| | |
|-------------------|--|
| USB | USB 2.0 Hi-Speed or full-speed ² |
| USB Signal Stream | 4, can be used for analog input, counter/timer 0, counter/timer 1 |

² If you are using an USB M Series device in full-speed mode, device performance will be lower and you will not be able to achieve maximum sample/update rates.

Current Limits

+5 V terminal as output³

| | |
|------------------------------|--|
| Voltage | 4.6 V to 5.2 V |
| Current (internally limited) | 50 mA maximum, shared with digital outputs |

+5 V terminal as input³

| | |
|---------|-------------------------------------|
| Voltage | 4.75 V to 5.35 V |
| Current | 350 mA maximum, self-resetting fuse |



Caution Do not exceed 16 mA per DIO pin.

| | |
|------------|-------|
| Protection | ±10 V |
|------------|-------|

Power Requirements

| | |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Input voltage on USB port | 4.5 V to 5.25 V in configured state |
| Maximum inrush current | 500 mA |
| No load typical current | 320 mA at 4.5 V |
| Maximum load | |
| Typical current | 400 mA at 4.5 V |
| Suspend current | 260 μ A typical |

Physical Characteristics

| | |
|----------------------------------|---|
| Dimensions (includes connectors) | 16.9 cm \times 9.4 cm \times 3.1 cm (6.65 in. \times 3.70 in. \times 1.20 in.) |
| Weight | 206 g (7.2 oz) |
| I/O connectors | 2 16-position combicon |
| USB connector | Series B receptacle |
| Screw terminal wiring | 16 AWG to 28 AWG |
| Torque for screw terminals | 0.22 N \cdot m to 0.25 N \cdot m (2.0 lb \cdot in. to 2.2 lb \cdot in.) |

To clean the device, wipe with a dry towel.

³ These devices have a self-resetting fuse that opens when current exceeds this specification.

Calibration

| | |
|--------------------------|------------|
| Recommended warm-up time | 15 minutes |
| Calibration interval | 1 year |

Environmental

| | |
|-----------------------|---------------------------------|
| Operating temperature | 0 °C to 45 °C |
| Storage temperature | -20 °C to 70 °C |
| Humidity | 10% RH to 90% RH, noncondensing |
| Maximum altitude | 2,000 m |
| Pollution Degree | 2 |

Indoor use only.

Safety Voltages

Connect only voltages that are below these limits.

| | |
|-------------------------|------------------------------|
| Channel-to-earth ground | 11 V, Measurement Category I |
|-------------------------|------------------------------|

Measurement Category I is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as MAINS voltage. MAINS is a hazardous live electrical supply system that powers equipment. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.



Caution Do not use for measurements within Categories II, III, or IV.



Note Measurement Categories CAT I and CAT O (Other) are equivalent. These test and measurement circuits are not intended for direct connection to the MAINS building installations of Measurement Categories CAT II, CAT III, or CAT IV.

Safety

This product is designed to meet the requirements of the following electrical equipment safety standards for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA C22.2 No. 61010-1



Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or the [Online Product Certification](#) section.

Electromagnetic Compatibility

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use; for radio equipment; and for telecommunication terminal equipment:

- EN 61326-1 (IEC 61326-1): Class A emissions; Basic immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- EN 55022 (CISPR 22): Class A emissions
- EN 55024 (CISPR 24): Immunity
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 22: Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



Note In the United States (per FCC 47 CFR), Class A equipment is intended for use in commercial, light-industrial, and heavy-industrial locations. In Europe, Canada, Australia and New Zealand (per CISPR 11) Class A equipment is intended for use only in heavy-industrial locations.



Note Group 1 equipment (per CISPR 11) is any industrial, scientific, or medical equipment that does not intentionally generate radio frequency energy for the treatment of material or inspection/analysis purposes.



Note For EMC declarations and certifications, and additional information, refer to the [Online Product Certification](#) section.

CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as follows:

- 2014/35/EU; Low-Voltage Directive (safety)
- 2014/30/EU; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)
- 2011/65/EU; Restriction of Hazardous Substances (RoHS)

Online Product Certification

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for this product, visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Environmental Management

NI is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial to the environment and to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *Minimize Our Environmental Impact* web page at ni.com/environment. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



EU Customers At the end of the product life cycle, all NI products must be disposed of according to local laws and regulations. For more information about how to recycle NI products in your region, visit ni.com/environment/weee.

电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息, 请登录 ni.com/environment/rohs_china。(For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.)



Anexo B. Hoja de datos de fuente de alimentación programable DC 9120^a

Programmable DC Power Supplies 9120A Series



The 9120A series are laboratory grade, programmable DC Power Supplies providing great performance and features not found in other supplies in this price category. The power supplies were designed to meet the needs of today's applications in R&D design verification, production testing or university labs that require clean and reliable power, high resolution/accuracy and fast transient response time.

Front Panel Operation

The numeric keys and rotary knob provide a convenient interface for setting output levels quickly and precisely. Voltage and current can be set to a maximum resolution of 0.5 mV (2 mV for 9124) and 0.1 mA respectively. Up to 50 parameters can be stored and recalled from internal memory.

Extra Features

The 9120 series' digital port offers a variety of configurations. The port can operate in digital I/O, external trigger and DFV/RI (Discrete Fault Indicator/Remote Inhibit) mode. The RI feature can be used for turning several power supplies On/Off simultaneously. External triggering can be used in combination with List mode.

The included application software supports front panel emulation and allows users to generate simple test sequences without the need to write source code.

Additionally, the power supply comes with a built-in 5^{1/2} digit DVM and high resolution milliohm meter supporting 4 wire measurements.

| Model | 9120A | 9121A | 9122A | 9123A | 9124 |
|----------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|
| Output Voltage | 0 - 32 V | 0 - 20 V | 0 - 60 V | 0 - 30 V | 0 - 72 V |
| Output Current | 0 - 3 A | 0 - 5 A | 0 - 2.5 A | 0 - 5 A | 0 - 1.2 A |

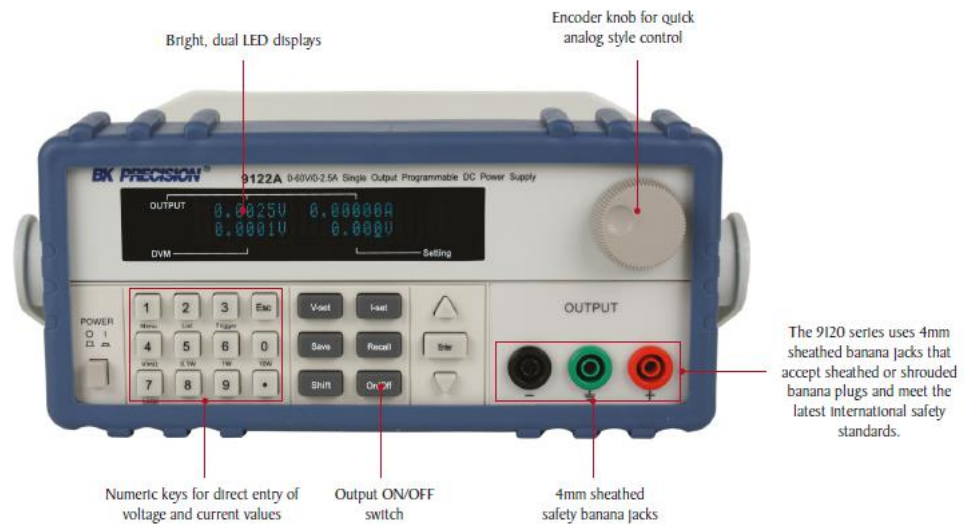
Features and Benefits

- Excellent display resolution
- Fast transient response time (< 150 μ s)
- SCPI compatible
- Communicate via USB Interface, using included USB to TTL serial converter cable
- GPIB Interface (model 9123A only)
- Closed case calibration
- Compact size for bench use or rack mountable (2U x 1/2U size)
- DVM and Milliohm Meter
- Discrete Fault Indicator/Remote Inhibit (DFV/RI). Useful for turning multiple power supplies On/Off simultaneously
- Application Software for front panel emulation and simple test sequence generation included
- Sheathed banana plug terminals for safety

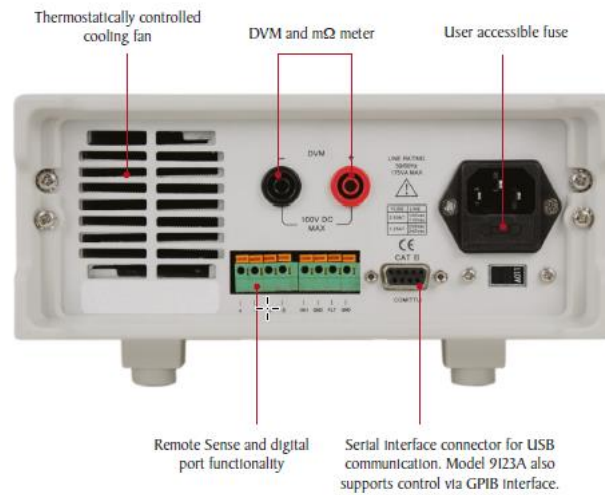
Remote Interface

The power supplies can be remotely controlled from any PC through a USB (virtual com) interface, allowing the user to program and monitor all parameters through easy to use SCPI commands. The power supplies come with a USB to TTL serial converter. Additionally, model 9123A can be controlled via GPIB interface and includes a GPIB to TTL conversion adapter cable.

Front Panel



Rear Panel



Specifications

| Model | 9120A | 9121A | 9122A | 9123A | 9124 |
|--|---|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Output Ratings (0 °C - 40 °C) | 0 - 32 V | 0 - 20 V | 0 - 60 V | 0 - 30 V | 0 - 72 V |
| | 0 - 3 A | 0 - 5 A | 0 - 2.5 A | 0 - 5 A | 0 - 1.2 A |
| Load Regulation ±(% of output + offset) | < 0.01% + 2 mV ^I | | < 0.01% + 2 mV ^I | < 0.01% + 2 mV ^I | < 0.01% + 2 mV ^I |
| | < 0.05% + 2 mA | | < 0.05% + 2 mA | < 0.05% + 3 mA | < 0.05% + 3 mA |
| Line Regulation ±(% of output + offset) | < 0.01% + 1 mV ^I | | < 0.01% + 2 mV ^I | < 0.01% + 1 mV ^I | < 0.01% + 1 mV ^I |
| | < 0.05% + 0.1 mA | | ± 0.05% + 0.05 mA | ± 0.05% + 0.1 mA | ± 0.05% + 0.05 mA |
| Programming resolution | 0.5 mV | | 1 mV | 0.5 mV | 2 mV |
| | 0.1 mA | | 0.1 mA | 0.1 mA | 0.02 mA |
| Readback / Meter resolution | 0.1 mV | 0.1 mV | 0.5 mV | 0.1 mV | 0.5 mV |
| | 0.01 mA | 0.05 mA | 0.05 mA | 0.05 mA | 0.01 mA |
| Front panel setting resolution | 0.5 mV | | 1 mV | 0.5 mV | 2 mV |
| | 0.1 mA | | 0.1 mA | 0.1 mA | 0.02 mA |
| Programming accuracy, 12 months (25 °C ±5 °C) ±(% of output + offset) | < 0.03% + 3 mV | | ± 0.03% + 6 mV | ± 0.03% + 3 mV | ± 0.03% + 6 mV |
| | < 0.05% + 2 mA | | ± 0.05% + 1.5 mA | ± 0.05% + 2.5 mA | ± 0.05% + 1 mA |
| Readback/ Meter accuracy 12 months (25 °C ±5 °C) ±(% of output+offset) | < 0.02% + 3 mV | | ± 0.02% + 6 mV | ± 0.02% + 2.5 mV | ± 0.02% + 5 mV |
| | < 0.05% + 2 mA | | ± 0.05% + 1.5 mA | ± 0.05% + 2.5 mA | ± 0.05% + 1 mA |
| Ripple & Noise (20 Hz - 20 MHz) | ± 4 mVp-p | ± 3 mVp-p | ± 5 mVp-p | ± 4 mVp-p | ± 5 mVp-p |
| | ± 3 mAms | ± 3 mAms | ± 3 mAms | ± 4 mAms | ± 3 mAms |
| Temperature coefficient, (0 °C - 40 °C) ±(% of output + offset) | < 0.02% + 3 mV | | ± 0.02% + 6 mV | ± 0.02% + 3 mV | ± 0.02% + 5 mV |
| | < 0.05% + 2 mA | | < 0.05% + 1 mA | < 0.05% + 2 mA | < 0.05% + 0.5 mA |
| Readback temperature coefficient, ±(% of output + offset) | < 0.02% + 3 mV | | ± 0.02% + 6 mV | ± 0.02% + 3 mV | ± 0.02% + 5 mV |
| | < 0.05% + 2 mA | | ± 0.05% + 1 mA | ± 0.05% + 2 mA | ± 0.05% + 0.5 mA |
| Transient Response | < 150 µs for output to recover to within 75 mV following a change from 100 mA to 1 A | | | | |
| DVM Accuracy | 0 - 12 V range: 0.02% + 2 mV | | | | |
| | 0 - 40 V range: 0.02% + 3 mV | | | | |
| DVM Resolution | 0 - 12 V range: 0.1 mV | | | | |
| | 0 - 40 V range: 1 mV | | | | |
| Milliohm Meter Accuracy | 0.1% (for Voltage and Current ± 10% of full scale) | | | | |
| | 0.3% (for Voltage and Current ± 3% of full scale) | | | | |
| State Storage Memory | 50 user configurable memory locations | | | | |
| Operating Temperature | 0 °C to 40 °C, < 75% R.H. | | | | |
| Storage Temperature | -20 °C to 70 °C, < 85% R.H. | | | | |
| AC Input | 115 V / 220 VAC ± 10%, 47 Hz to 63 Hz | | | | |
| Weight | 19.8 lbs (9 kg) | 21.2 lbs (9.6 kg) | | 19.8 lbs (9 kg) | |
| Dimensions (W x H x D) | 8.45" x 3.8" x 13.9" (214 x 88.2 x 354.6 mm) | | | | |
| Three-Year Warranty | | | | | |
| Included Accessories | User manual, power line cord, USB to TTL serial converter IT-E132B, and software installation disk. Model 9123A also includes IT-E135 GPIB to TTL conversion adapter cable | | | | |
| Optional Accessories | IT-E151 rack mount kit | | | | |

^I = while using remote sense

Anexo C. Hoja de datos de transistor TIP120

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document
by TIP120/D

Plastic Medium-Power Complementary Silicon Transistors

... designed for general-purpose amplifier and low-speed switching applications.

- High DC Current Gain —
hFE = 2500 (Typ) @ IC = 4.0 Adc
- Collector-Emitter Sustaining Voltage — @ 100 mAcd
VCE(sus) = 60 Vdc (Min) — TIP120, TIP125
= 80 Vdc (Min) — TIP121, TIP126
= 100 Vdc (Min) — TIP122, TIP127
- Low Collector-Emitter Saturation Voltage —
VCE(sat) = 2.0 Vdc (Max) @ IC = 3.0 Adc
= 4.0 Vdc (Max) @ IC = 5.0 Adc
- Monolithic Construction with Built-In Base-Emitter Shunt Resistors
- TO-220AB Compact Package

***MAXIMUM RATINGS**

| Rating | Symbol | TIP120, TIP125 | TIP121, TIP126 | TIP122, TIP127 | Unit |
|--|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Collector-Emitter Voltage | V _{CEO} | 60 | 80 | 100 | Vdc |
| Collector-Base Voltage | V _{CB} | 60 | 80 | 100 | Vdc |
| Emitter-Base Voltage | V _{EB} | 5.0 | | | Vdc |
| Collector Current — Continuous Peak | IC | 5.0 8.0 | | | Acd |
| Base Current | IB | 120 | | | mAcd |
| Total Power Dissipation @ TC = 25°C Derate above 25°C | PD | 65 0.52 | | | Watts W/°C |
| Total Power Dissipation @ TA = 25°C Derate above 25°C | PD | 2.0 0.016 | | | Watts W/°C |
| Unclamped Inductive Load Energy (1) | E | 50 | | | mJ |
| Operating and Storage Junction, Temperature Range | TJ, Tstg | -65 to +150 | | | °C |

THERMAL CHARACTERISTICS

| Characteristic | Symbol | Max | Unit |
|---|--------|------|------|
| Thermal Resistance, Junction to Case | RθJC | 1.92 | °C/W |
| Thermal Resistance, Junction to Ambient | RθJA | 62.5 | °C/W |

(1) IC = 1 A, L = 100 mH, P.R.F. = 10 Hz, VCC = 20 V, RBE = 100 Ω

**NPN
TIP120***
TIP121*
TIP122*
**PNP
TIP125***
TIP126*
TIP127*

*Motorola Preferred Device

**DARLINGTON
5 AMPERE
COMPLEMENTARY SILICON
POWER TRANSISTORS
60-80-100 VOLTS
65 WATTS**

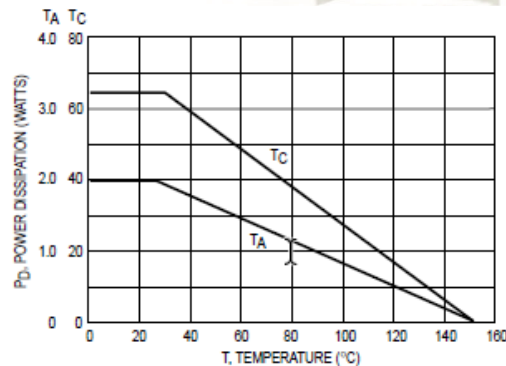
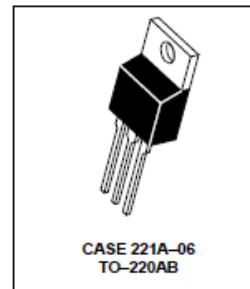


Figure 1. Power Derating

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

REV 2

© Motorola, Inc. 1995



TIP120 TIP121 TIP122 TIP125 TIP126 TIP127

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

| Characteristic | Symbol | Min | Max | Unit |
|---|--|---------------|-----------------|-------------------|
| OFF CHARACTERISTICS | | | | |
| Collector-Emitter Sustaining Voltage (1) ($I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 0$) | TIP120, TIP125 TIP121, TIP126 TIP122, TIP127 | $V_{CE(sus)}$ | 60 80 100 | Vdc |
| Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 30\text{ Vdc}$, $I_B = 0$) ($V_{CE} = 40\text{ Vdc}$, $I_B = 0$) ($V_{CE} = 50\text{ Vdc}$, $I_B = 0$) | TIP120, TIP125 TIP121, TIP126 TIP122, TIP127 | I_{CEO} | — — — | mAdc |
| Collector Cutoff Current ($V_{CB} = 60\text{ Vdc}$, $I_E = 0$) ($V_{CB} = 80\text{ Vdc}$, $I_E = 0$) ($V_{CB} = 100\text{ Vdc}$, $I_E = 0$) | TIP120, TIP125 TIP121, TIP126 TIP122, TIP127 | I_{CBO} | — — — | mAdc |
| Emitter Cutoff Current ($V_{BE} = 5.0\text{ Vdc}$, $I_C = 0$) | | I_{EBO} | — | 2.0 mAdc |
| ON CHARACTERISTICS (1) | | | | |
| DC Current Gain ($I_C = 0.5\text{ Adc}$, $V_{CE} = 3.0\text{ Vdc}$) ($I_C = 3.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 3.0\text{ Vdc}$) | | h_{FE} | 1000 1000 | — — |
| Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 3.0\text{ Adc}$, $I_B = 12\text{ mA}$) ($I_C = 5.0\text{ Adc}$, $I_B = 20\text{ mA}$) | | $V_{CE(sat)}$ | — — | 2.0 4.0 Vdc |
| Base-Emitter On Voltage ($I_C = 3.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 3.0\text{ Vdc}$) | | $V_{BE(on)}$ | — | 2.5 Vdc |
| DYNAMIC CHARACTERISTICS | | | | |
| Small-Signal Current Gain ($I_C = 3.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ MHz}$) | | h_{fe} | 4.0 | — |
| Output Capacitance ($V_{CB} = 10\text{ Vdc}$, $I_E = 0$, $f = 0.1\text{ MHz}$) | TIP125, TIP126, TIP127 TIP120, TIP121, TIP122 | C_{ob} | — — | 300 200 pF |

(1) Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\ \mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2\%$.

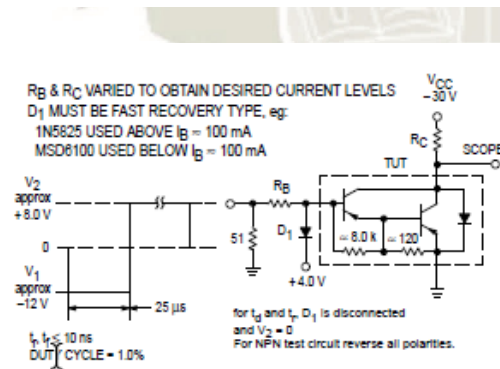


Figure 2. Switching Times Test Circuit

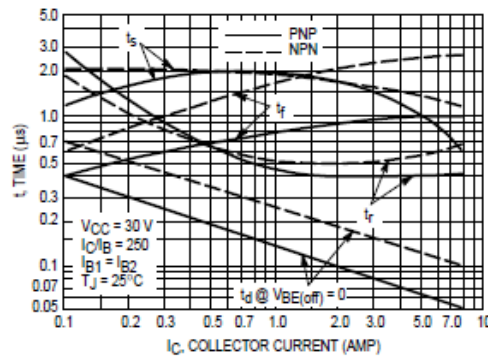


Figure 3. Switching Times

Anexo D. Hoja de datos de resistencias de precisión Vishay

RH – 25



www.vishay.com

RH

Vishay Sfernice

Heatsink Encased Wirewound Power Resistors



FEATURES

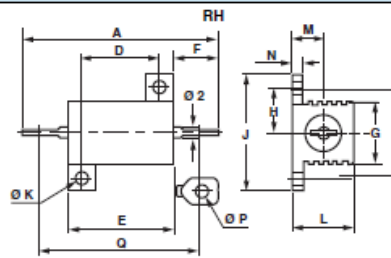
- 5 W to 50 W at 25 °C
- NF C 83-210
- According to CECC 40 203
- High stability < 0.05 % year
- Low temperature coefficient typically ± 15 ppm/°C
- Wide range of values from 0.006 Ω to 130 k Ω
- Termination = Sn/Ag/Cu
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc299912



Encased in a compact and light heatsink offering complete environmental protection, great mechanical strength and easy mounting. Non inductive versions can be supplied under the RHNI designation (please indicate required specifications and frequency range upon ordering).

NF F 16101, 10/1988 and 16102, 04/1992: Not applicable (our parts contain less than 10 g of combustible materials).

DIMENSIONS in millimeters



| SERIES | A | B ± 0.2 | D ± 0.2 | E ± 0.5 | F | G ± 1 | H ± 0.7 | J ± 0.5 | Ø K ± 0.1 | L MAX. | M ± 0.5 | N ± 0.3 | Ø P MIN. | Q | WEIGHT g |
|--------|------------|---------|---------|---------|------------|-------|---------|---------|-----------|--------|---------|---------|----------|------------|----------|
| RH5 | 28.5 ± 1.5 | 12.5 | 11.3 | 16.3 | 6.8 ± 1.5 | 8.5 | 6.2 | 16.4 | 2.4 | 8.9 | 4.3 | 1.6 | 2.1 | 25.3 ± 1.5 | 4 |
| RH10 | 35.5 ± 1.5 | 15.9 | 14 | 19 | 7.9 ± 1.5 | 11 | 7.9 | 20.6 | 2.4 | 11 | 5.6 | 2 | 2.1 | 30.6 ± 1.5 | 6.4 |
| RH25 | 49 ± 1.3 | 19.8 | 18.3 | 28 | 11.1 ± 1.5 | 14 | 9.9 | 27.5 | 3.2 | 15 | 8 | 2.4 | 2.1 | 44.6 ± 1.3 | 16.1 |
| RH50 | 70.2 ± 1.4 | 21.4 | 39.7 | 50 | 11 ± 1.2 | 14 | 10.7 | 29.4 | 3.2 | 15 | 8 | 2.4 | 2.1 | 66.5 ± 1.4 | 28.6 |

OHMIC RANGE IN RELATION TO TOLERANCE

| | | RH5 | RH10 | RH25 | RH50 |
|-------|-----|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 10 % | E24 | 0.01 Ω to 12 k Ω | 0.006 Ω to 20 k Ω | 0.006 Ω to 62 k Ω | 0.006 Ω to 130 k Ω |
| 5 % | E24 | 0.01 Ω to 12 k Ω | 0.01 Ω to 20 k Ω | 0.01 Ω to 62 k Ω | 0.01 Ω to 130 k Ω |
| 2 % | E48 | 0.01 Ω to 12 k Ω | 0.01 Ω to 20 k Ω | 0.01 Ω to 62 k Ω | 0.01 Ω to 130 k Ω |
| 1 % | E96 | 0.1 Ω to 12 k Ω | 0.1 Ω to 20 k Ω | 0.05 Ω to 62 k Ω | 0.05 Ω to 130 k Ω |
| 0.5 % | E96 | 0.1 Ω to 12 k Ω | 0.1 Ω to 20 k Ω | 0.1 Ω to 62 k Ω | 0.1 Ω to 130 k Ω |

Revision: 07-Dec-15

1

Document Number: 50013

For technical questions, contact: sferfixedresistors@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc291000



www.vishay.com

RH

Vishay Sfernice

| STANDARD ELECTRICAL SPECIFICATIONS | | | | | |
|------------------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------|--|
| MODEL | RATED POWER $P_{25^{\circ}\text{C}}$ W | VOLTAGE LIMIT V_{RMS} | TOLERANCE $\pm \%$ | RESISTANCE RANGE Ω | TEMPERATURE COEFFICIENT $\pm \text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ |
| RH5 | 10 | 160 | 2, 5, 10 | 0.01 to 12K | < 5 $\Omega \pm 100$, 5 Ω to 10 $\Omega \pm 50$, > 10 $\Omega \pm 25$ |
| | 10 | | 0.5, 1 | 0.1 to 12K | |
| RH10 | 12.5 | 250 | 10 | 0.006 to 20K | |
| | 12.5 | | 2, 5 | 0.01 to 20K | |
| | 12.5 | | 0.5, 1 | 0.1 to 20K | |
| | 12.5 | | 10 | 0.006 to 62K | |
| RH25 | 25 | 550 | 2, 5 | 0.01 to 62K | |
| | 25 | | 1 | 0.05 to 62K | |
| | 25 | | 0.5 | 0.1 to 62K | |
| | 25 | | 10 | 0.006 to 130K | |
| RH50 | 50 | 1285 | 2, 5 | 0.01 to 130K | |
| | 50 | | 1 | 0.05 to 130K | |
| | 50 | | 0.5 | 0.1 to 130K | |
| | 50 | | 10 | 0.006 to 130K | |

| TECHNICAL SPECIFICATIONS | | | | | | | |
|---|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|------|
| VISHAY SFERNICE MODEL AND STYLE | | | | RH5 | RH10 | RH25 | RH50 |
| Power Rating | MIL Limits | 25 °C | 5 W | 10 W | 20 W | 30 W | |
| | | | 70 °C | 4 W | 8 W | 16 W | 24 W |
| Chassis Mounted Resistors | Vishay Sfernice Limits | 25 °C | 10 W | 12.5 W | 25 W | 50 W | |
| | | 70 °C | 8 W | 10 W | 20 W | 40 W | |
| 413 cm ² for RH5 and RH10 536 cm ² for RH25 and RH50 | Vishay Sfernice Limits | 25 °C | 4 W | 6 W | 9 W | 12 W | |
| | | 70 °C | 3.2 W | 4.8 W | 7.2 W | 9.6 W | |
| Rated Maximum Voltage (V_{RMS}) | | | 160 V | 250 V | 550 V | 1285 V | |
| Dielectric Strength V_{RMS} | | | 1000 V | 1500 V | 2500 V | 2500 V | |

| PERFORMANCE | | | |
|------------------------------------|---|--|--|
| TESTS | MIL-R-18546 D | NF C 83-210 | TYPICAL DRIFTS |
| | CONDITIONS | REQUIREMENTS | |
| Operating Temperature Range | -55 °C +200 °C | - | - |
| Momentary Overload | 5 $P_T/5$ s | $\pm (0.25 \% + 0.05 \Omega)$ | $\pm (0.1 \% + 0.05 \Omega)$ |
| Climatic Sequence | -55 °C +200 °C 5 cycles | $\pm (0.25 \% + 0.05 \Omega)$ | $\pm (0.1 \% + 0.05 \Omega)$ |
| Load Life Test at High Temperature | 2 h at +275 °C | $\pm (1 \% + 0.05 \Omega)$ Ins. resistance $\geq 1 \text{ G}\Omega$ | $\pm (0.1 \% + 0.05 \Omega)$ |
| Humidity (Steady State) | 56 days | $\pm (1 \% + 0.05 \Omega)$ Ins. resistance $\geq 100 \text{ M}\Omega$ | $\pm (0.5 \% + 0.05 \Omega)$ |
| Resistance to Moisture | Climatic sequences test, with load and polarisation | $\pm (1 \% + 0.05 \Omega)$ | $\pm (0.5 \% + 0.05 \Omega)$ |
| Temperature Coefficient | 5 Ω to 10 Ω > 10 Ω | $\pm 50 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ $\pm 25 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ | $\pm 15 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ |
| Load Life at Maximum Temperature | 1000 h 25 °C | P_n MIL Vishay | $\pm (1 \% + 0.05 \Omega)$ |
| | 200 °C | 30 % of P_n Sfernice | Ins. resistance $\geq 1 \text{ G}\Omega$ |

Revision: 07-Dec-15

2

Document Number: 50013

For technical questions, contact: sferfixedresistors@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc291000



www.vishay.com

RH

Vishay Sfernice

MOMENTARY OVERLOAD

1. Momentary overload (> 2 s):

See example in table below. In all cases, it should be understood that:

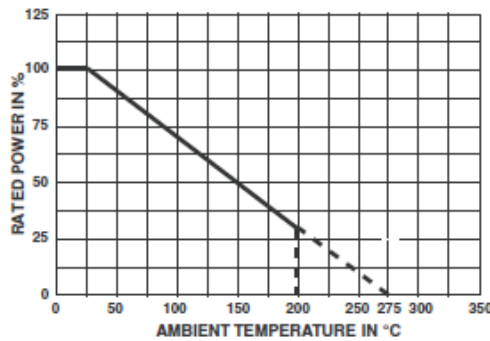
- The 12 P_n overload applies only to ohmic values 0.1.
- The overload voltage shall not be higher than that used for the dielectric strength test (see Standard Electrical Specifications).

2. Short time overload (< 2 s):

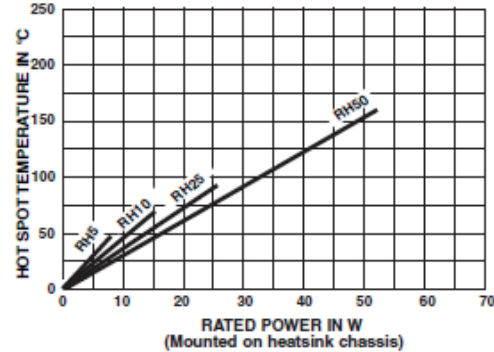
For times shorter than 2 s, higher overloads can be sustained in some cases. Consult Vishay Sfernice.

| POWER LOADING | DURATION |
|---------------|----------|
| 2.5 P_n | 10 s |
| 5 P_n | 5 s |
| 12 P_n | 2 s |

POWER RATING



TEMPERATURE RISE



MARKING

Vishay Sfernice trademark, model, style, nominal resistance (in Ω), tolerance (in %), manufacturing date.

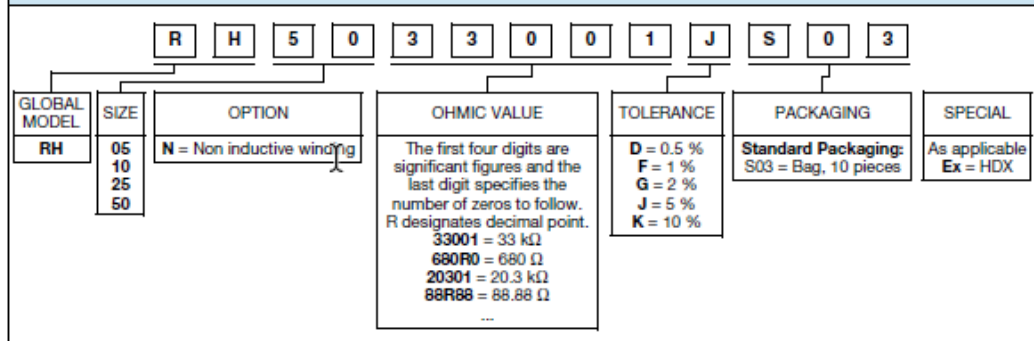
PACKAGING

Bag of 10 units

ORDERING INFORMATION

| | | | | | |
|-------|-------|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------|
| RH | 05 | N | 18R00 | J | S03 |
| MODEL | STYLE | NON INDUCTIVE WINDING Optional | OHMIC VALUE | TOLERANCE | PACKAGING |

GLOBAL PART NUMBER INFORMATION



Revision: 07-Dec-15

3

Document Number: 50013

For technical questions, contact: sferfixedresistors@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000