

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE
UN MINI TUBO DE CALOR MULTIRANURADO**

Presentado ante la Ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Rivas R. Lenin J.

Para optar al Título de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MINI TUBO DE CALOR MULTIRANURADO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Jolymar Soto Romero.

Presentado ante la Ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por el Br. Rivas R. Lenin J.

Para optar al Título de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008.

DEDICATORIA

*A mi madre, mi padre y hermanos
Por estar siempre conmigo en
las buenas y en las malas*

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen del Valle por darme la fortaleza y permitirme cumplir con esta meta.

A mi familia, por enseñarme el camino a seguir y por su constante apoyo, cariño y comprensión en todo momento durante la realización de este trabajo.

A la Universidad Central de Venezuela, especialmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica y todos sus profesores, por haberme transmitido la mejor educación posible, desde el punto de vista técnico y humano.

A la Profesora Jolymar Soto, por haberme dado su confianza para la realización de este trabajo, por su paciencia, consejos y orientación durante todo este tiempo.

Al CDCH U.C.V, por el apoyo financiero otorgado a través del proyecto de investigación y desarrollo PI 08 15 5340 2006 y la ayuda institucional 08 00 6681 2007.

Al Profesor Francisco García, por haberme orientado a la realización de este trabajo.

Al señor Armando Martínez, por la ayuda prestada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química.

Al señor Rodolfo Pacheco, por la colaboración prestada en el taller mecánico de la Facultad de Ciencias.

Al personal técnico y obrero del taller de máquinas térmicas de La Escuela de Ingeniería Mecánica, por toda su colaboración.

A todos mis amigos, compañeros y aquellas personas que de alguna u otra manera colaboraron conmigo en cualquier momento del trabajo.



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA



Caracas, 20 de junio de 2.008

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller:

LENIN J. RIVAS R.

Titulado: "ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DE UN MINI TUBO DE CALOR MULTIRANURADO"

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Prof. Julio Segura
Jurado

Prof. Rodolfo Berrios
Jurado

Prof. Francisco García
Tutor

"Hacia el 50º Aniversario del 21 de noviembre de 1957, Día del Estudiante"

Rivas R., Lenin J.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN MINI TUBO DE CALOR MULTIRANURADO

**Tutor Académico: Prof. Jolymar Soto Romero. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2008, 85 págs.**

Palabras Claves: Mini Tubo de Calor, Alta Conductancia Térmica, Flujo Bifásico,

Masa de fluido Circulante, Perfiles de Temperatura, Mecha Multiranurada.

El objetivo general del presente trabajo se basó en la realización de un estudio experimental a un mini tubo de calor multiranurado. La metodología seguida, consistió en realizar ensayos experimentales al dispositivo con diferentes masas de fluido circulante en el mini tubo de calor y sometiendo al mismo a tres condiciones de temperatura. Adicionalmente, se utilizaron tres estructuras capilares o mechas diferentes: la primera estructura fue las mini ranuras maquinadas en el dispositivo original, la segunda estructura consistió en colocar una malla de fieltro arrollada en la pared interna del mini tubo de calor, y la tercera estructura consistió en colocar un núcleo de cobre en el interior del dispositivo. Con la información obtenida de los experimentos, se presentaron las diferencias de temperatura entre los distintos puntos estudiados en la superficie del tubo y se trazaron los perfiles de temperatura. Una vez obtenidos y analizados los perfiles de temperatura, se evaluó el comportamiento térmico del dispositivo. La evaluación mostró que, en general, todos los perfiles de temperatura se comportaron de manera similar; aunque con la estructura capilar multiranurada con núcleo de cobre se obtuvo una mejora en el rendimiento térmico del dispositivo, trayendo esto como consecuencia una disminución en las diferencias de temperatura. Sin embargo, las diferencias de temperatura entre los distintos puntos estudiados en la superficie del mini tubo de calor son muy amplias para las dimensiones del mismo, razón por la cual no se logró que el dispositivo se comportara de manera isotérmica.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Resumen	vi
Índice General	vii
Lista de Figuras	xii
Lista de Tablas	xvi
Lista de Símbolos y Abreviaturas	xix
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Descripción del problema	3
1.2. Objetivos y Alcances	4
1.2.1. Objeto	4
1.2.2. Objetivo General	4
1.2.3. Objetivos Específicos	4
1.2.4. Alcances y Limitaciones	5
CAPÍTULO II. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LOS TUBOS DE CALOR	7
2.1. Componentes de un Tubo de Calor	8
2.1.1. El Contenedor	8
2.1.2. Fluido de Operación	9
2.1.3. La Mecha o Estructura Capilar	10
2.2. Presión Capilar	12

2.3. Limitaciones Operativas de un Tubo de Calor	12
2.3.1. Limitación Capilar	12
2.3.2. Limitación Viscosa	12
2.3.3. Limitación Sónica	13
2.3.4. Limitación por Arrastre	13
2.3.5. Limitación por Ebullición	13
2.4. Aplicaciones	13
2.5. Antecedentes	14
<i>Estudios Experimentales</i>	14
<i>Estudios de Simulaciones Analíticas y Numéricas</i>	15
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	16
3.1. El Mini Tubo de Calor	16
3.2. Fluido de Operación	17
3.3. Variables y Parámetros Sometidos a Estudio	17
3.4. Procedimiento para Realizar las Pruebas Experimentales	18
3.5. Instrumentos	19
3.6. Matriz de Prueba N° 1 (Mini Tubo de Calor Original)	19
3.7. Sistema de Llenado	20
3.8. Prueba de Vacío	22
3.9. Procedimiento de Llenado	22
3.10. Banco de Ensayos	23
3.11. Montaje del Mini Tubo de Calor en el Banco de Ensayos	26

3.12. Recopilación de Datos	28
3.13. Estructura Capilar Multiranurada con Malla de Fieltro	28
3.14. Matriz de Prueba N° 2	29
3.15. Estructura Capilar Multiranurada con Núcleo de Cobre	29
3.16. Matriz de Prueba N° 3	30
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	32
4.1. Ensayos Experimentales Realizados	32
<i>Pruebas Experimentales para el Mini Tubo de Calor Multiranurado</i>	32
4.1.1. Ensayo Experimental N° 1	32
4.1.2. Ensayo Experimental N° 2	33
4.1.3. Ensayo Experimental N° 3	35
<i>Experimentos Realizados para el Mini Tubo de Calor Multiranurado con Malla de Fieltro</i>	36
4.1.4. Ensayo Experimental N° 4	36
4.1.5. Ensayo Experimental N° 5	37
<i>Ensayos Experimentales Realizados al Mini Tubo de Calor Multiranurado con el Núcleo de Cobre</i>	39
4.1.6. Ensayo Experimental N° 6	39
4.1.7. Ensayo Experimental N° 7	40
4.1.8. Ensayo Experimental N° 8	42
4.1.9. Ensayo Experimental N° 9	44
4.2. Cálculo de las Tasas de Flujo de Calor	45
4.2.1. Tasa de Flujo de Calor en el Evaporador	45

4.2.2. Tasa de Flujo de Calor en el Tramo Adiabático	45
4.2.3. Tasa de Flujo de Calor en el Condensador	46
4.3. Estudio de las Limitaciones Operativas del Mini Tubo de Calor	49
4.3.1. Límite Capilar	49
4.3.2. Límite Sónico	49
4.3.3. Límite Viscoso	49
4.3.4. Límite de Arrastre	49
4.3.5. Límite de Ebullición o Calentamiento	50
4.4. Resultados de las Tasas de Flujo de Calor y las Limitaciones Operativas	51
4.4.1. Ensayo Experimental N° 1	51
4.4.2. Ensayo Experimental N° 2	52
4.4.3. Ensayo Experimental N° 3	53
4.4.4. Ensayo Experimental N° 4	53
4.4.5. Ensayo Experimental N° 5	54
4.4.6. Ensayo Experimental N° 6	55
4.4.7. Ensayo Experimental N° 7	56
4.4.8. Ensayo Experimental N° 8	57
4.4.9. Ensayo Experimental N° 9	58
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
5.1. Análisis General de Resultados Experimentales	59
5.2. Análisis de la Influencia de las Condiciones Ambientales	61
5.3. Análisis de las Condiciones en los Potenciómetros	62

5.4. Análisis por Grupo de Ensayos Experimentales	64
5.4.1. Estructura Capilar Multiranurada (Ensayos del 1 al 3)	64
5.4.2. Estructura Capilar Multiranurada con la Malla de Filtro (Ensayos del 4 al 7)	64
5.4.3. Estructura Capilar Multiranurada con el Núcleo de Cobre (Ensayos del 8 al 11)	65
5.5. Síntesis de Resultados	65
5.5.1. Del sistema de Llenado	65
5.5.2. Del Montaje Experimental	66
5.5.3. De las Variables Ambientales	66
5.5.4. De los Ensayos Experimentales	66
CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
Fuentes Electrónicas	72
ANEXOS A	73
ANEXOS B	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de un mini tubo de calor (Soto <i>et al</i> , 2005)	7
Figura 2.2 Ejemplos de mechas homogéneas	11
Figura 2.3 Ejemplos de mechas compuestas	11
Figura 3.1 Esquema del mini tubo de calor	16
Figura 3.2 Esquema del sistema de llenado	21
Figura 3.3 Esquema de la sección auxiliar del banco de prueba (Soto, 2008)	24
Figura 3.4 Esquema de la sección principal del banco de prueba (Soto, 2008)	25
Figura 3.5 Esquema del montaje de los calentadores y termocuplas en el mini tubo de calor	27
Figura 3.6 Esquema de la sección transversal del mini tubo de calor con mecha de fieltro	28
Figura 3.7 Esquema de la sección transversal del mini tubo de calor con el corazón de cobre en el interior	30
Figura 4.1 Perfiles de temperatura (Prueba experimental N° 1)	33
Figura 4.2 Perfiles de temperatura (Prueba experimental N° 2)	34
Figura 4.3 Perfiles de temperatura (Prueba experimental N° 3)	36
Figura 4.4 Perfiles de temperatura (Prueba experimental N° 4)	37
Figura 4.5 Perfiles de temperatura (Prueba experimental N° 5)	39
Figura 4.6 Perfiles de temperatura (Prueba experimental N° 6)	40
Figura 4.7 Perfiles de temperatura (Prueba experimental N° 7)	42
Figura 4.8 Perfiles de temperatura (Prueba experimental N° 8)	43
Figura 4.9 Perfiles de temperatura (Prueba experimental N° 9)	45

Figura 4.12 Variación de los gradientes de temperatura para los ensayos realizados a 65 °C	60
Figura 4.13 Variación de los gradientes de temperatura para los ensayos realizados a 70 °C	60
Figura 4.14 Variación de los gradientes de temperatura para los ensayos realizados a 75 °C	61
Figura 4.15 Variación de la temperatura ambiental durante el tiempo en que se realizaron los ensayos experimentales	62
Figura 4.16 Variación de la humedad relativa durante el tiempo en que se realizaron las ensayos experimentales	62
Figura 4.17 Variación del voltaje en los calentadores: (a) 65 °C, (b) 70 °C y (c) 75 °C .	63
Figura A1. Combinación de perfiles de temperatura obtenidos en los ensayos realizados con la primera configuración de la estructura capilar: (a) 65 °C,(b) 70 °C y (c) 75 °C	73
Figura A2. Combinación de perfiles de temperatura obtenidos en los ensayos realizados con la segunda configuración de la estructura capilar: (a) 65 °C,(b) 70 °C y (c) 75 °C	74
Figura A3. Combinación de perfiles de temperatura obtenidos en los ensayos realizados con la tercera configuración de la estructura capilar: (a) 65 °C,(b) 70 °C y (c) 75 °C	75
Figura A4. Perfiles de temperatura	77
Figura A5. Perfiles de temperatura	79
Figura B1. Sistema de llenado	82
Figura B2. Parte superior del sistema de llenado	82
Figura B3. Parte inferior del sistema de llenado	83
Figura B4. Bomba de vacío acoplada al sistema de llenado	83
Figura B5. Mini tubo de calor acoplado al sistema de llenado al momento de la carga de la masa de fluido circulante	84

Figura B6. Mini tubo de calor montado en el banco de pruebas	84
Figura B7. Mini tubo de calor montado en el banco de prueba	85
Figura B8. Instrumentos y equipos del banco de prueba	85

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Compatibilidad de diferentes fluidos y materiales (Dunn y Reay, 1994)	9
Tabla 3.1 Propiedades físicas del metanol	17
Tabla 3.2 Matriz de prueba para la primera configuración de la estructura capilar	20
Tabla 3.3 Matriz de prueba para la segunda configuración de la estructura capilar	29
Tabla 3.4 Matriz de prueba para la tercera configuración de la estructura capilar	31
Tabla 4.1 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°1	32
Tabla 4.2 Diferencias de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor (Prueba experimental N° 1)	32
Tabla 4.3 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°2	34
Tabla 4.4 Diferencias de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor (Prueba experimental N° 2)	34
Tabla 4.5 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°3	35
Tabla 4.6 Diferencias de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor (Prueba experimental N° 3)	35
Tabla 4.7 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°4	36
Tabla 4.8 Diferencias de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor (Prueba experimental N° 4)	37
Tabla 4.9 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°5	38
Tabla 4.10 Diferencias de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor (Prueba experimental N° 5)	38
Tabla 4.11 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°6	39
Tabla 4.12 Diferencias de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor (Prueba experimental N° 6)	40
Tabla 4.13 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°7	41
Tabla 4.14 Diferencias de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor (Prueba experimental N° 7)	41

Tabla 4.15 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°8	42
Tabla 4.16 Diferencias de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor (Prueba experimental N° 8)	43
Tabla 4.17 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°9	44
Tabla 4.18 Diferencias de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor (Prueba experimental N° 9)	44
Tabla 4.19 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°1 (conducción pura)	51
Tabla 4.20 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°1 (conducción y convección)	51
Tabla 4.21 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 1	52
Tabla 4.22 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°2 (conducción pura)	52
Tabla 4.23 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°2 (conducción y convección)	52
Tabla 4.24 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 2	52
Tabla 4.25 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°3 (conducción pura)	53
Tabla 4.26 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°3 (conducción y convección)	53
Tabla 4.27 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 3	53
Tabla 4.28 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°4 (conducción pura)	54
Tabla 4.29 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°4 (conducción y convección)	54
Tabla 4.30 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 4	54
Tabla 4.31 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°5 (conducción pura)	54

Tabla 4.32 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°5 (conducción y convección)	55
Tabla 4.33 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 5	55
Tabla 4.34 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°6 (conducción pura)	55
Tabla 4.35 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°6 (conducción y convección)	55
Tabla 4.36 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 6	56
Tabla 4.37 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°7 (conducción pura)	56
Tabla 4.38 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°7 (conducción y convección)	56
Tabla 4.39 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 7	56
Tabla 4.40 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°8 (conducción pura)	57
Tabla 4.41 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°8 (conducción y convección)	57
Tabla 4.42 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 8	57
Tabla 4.43 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°9 (conducción pura)	58
Tabla 4.44 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°9 (conducción y convección)	58
Tabla 4.45 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 9	58

Tabla A 4.1 Resultados obtenidos en el ensayo experimental	76
TablaA 4.2 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor	76
Tabla A 5.1 Resultados obtenidos en el ensayo experimental	78
Tabla A5.2 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor	78
Tabla A6. Propiedades físicas y normas con las que cumple el aislante térmico utilizado (catálogo de Armaflex)	80
Tabla A7. Propiedades físicas del metanol fabricado por Fluka	81

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

AC	Corriente Alterna
A_c	Área de convección
A_m	Área de la mecha
A_{nst}	Área de la nueva sección transversal
$A_{sólido}$	Área de la sección transversal de la pared del tubo
A_{st}	Área de la sección transversal del mini tubo de calor
A_{stc}	Área de la sección transversal del corazón de cobre
A_t	Área total de la sección transversal del mini tubo de calor
CT	Trampa Fría (Cold Trap)
C_p	Calor específico a presión constante
DG	Desgasificador
D_c	Diámetro del corazón de cobre
d	Densidad
d_g	Diámetro del tubo hasta las ranuras
g	gravedad
HR	Humedad Relativa
h_c	Coefficiente convectivo
I_{cp}	Intensidad de corriente en el calentador principal
I_{cr}	Intensidad de corriente en el calentador de resguardo
K_{aire}	Conductividad térmica del aire
K_{cobre}	Conductividad térmica del cobre

$K_{metanol}$	Conductividad térmica del metanol
k	Permeabilidad del material
L	Longitud
L_{ta}	Longitud del Tramo Adiabático
L_e	Longitud del Evaporador
L_c	Longitud del condensador
M	Masa molecular del metanol
m_{fc}	Masa de fluido circulante
N	Número de ranuras por unidad de longitud
$\overline{N_{UD}}$	Numero de Nusselt
P_r	Número de Prandtl
P_v	Presión de vapor
q_c	Tasa de flujo de calor en el condensador
q_e	Tasa de flujo de calor en el evaporador
q_{ta_h}	Tasa de flujo de calor por convección en el tramo adiabático
q_{ta_K}	Tasa de flujo de calor por conducción en el tramo adiabático
$q_{máx}$	Tasa de flujo de calor máxima transferida
q_{ta}	Tasa de flujo de calor en el tramo adiabático
R	Reservorio
R	Radio de la sección transversal del mini tubo de calor
R_{aD}	Número de Rayleigh
r_c	Radio del condensador

r_e	Radio del evaporador
T	Temperatura
T_f	Temperatura de película
T_o	Temperatura de estancamiento
T_{prueba}	Temperatura de la prueba
T_s	Temperatura superficial
T_∞	Temperatura ambiente
V	Válvula
V_{cp}	Voltaje en el calentador principal
V_{cr}	Voltaje en el calentador de resguardo
V_{fc}	Volumen de fluido circulante
v	Velocidad del vapor
W_e	Número de Weber
z	Factor geométrico
α	Difusividad térmica
β	Coefficiente de expansión volumétrica
λ	Calor latente de vaporización
μ_l	Viscosidad dinámica del fluido en fase líquida
μ_v	Viscosidad dinámica del fluido de operación en fase de vapor
ν	Viscosidad cinemática
ρ_l	Densidad del fluido de operación en fase líquida
ρ_v	Densidad del fluido de operación en fase de vapor

σ_l	Tensión superficial del líquido
ϕ	Ángulo de inclinación con respecto a la horizontal del mini tubo de calor
Δ_{1-4}	Diferencia de temperatura entre los puntos 1 y 4 del mini tubo de calor
Δ_{1-2}	Diferencia de temperatura entre los puntos 1 y 2 del mini tubo de calor
Δ_{2-3}	Diferencia de temperatura entre los puntos 2 y 3 del mini tubo de calor
Δ_{3-4}	Diferencia de temperatura entre los puntos 3 y 4 del mini tubo de calor

INTRODUCCIÓN

Los tubos de calor son dispositivos de alta conductancia térmica que se utilizan para transferir calor de una fuente a un sumidero, como consecuencia de un ciclo cerrado compuesto por los fenómenos de evaporación, flujo de vapor, condensación y retorno de condensado del fluido de operación. La cantidad de calor que puede ser transferida por un tubo de calor como calor latente de vaporización, es generalmente varios órdenes de magnitud mayor que la que puede ser transferida como calor sensible en un sistema convectivo convencional.

El dispositivo está dividido en tres zonas y consta de tres componentes. Las zonas son: el evaporador, donde se absorbe calor desde la fuente; el condensador, donde se cede calor al sumidero y entre estas dos zonas puede haber una tercera denominada zona adiabática, la cual está aislada térmicamente. Los tres componentes son: el contenedor, que es el tubo; la mecha, que es una estructura capilar a través de la cual circula el fluido de operación en la fase líquida que es el tercer componente.

Desde su invención se han realizado numerosos estudios para evaluar el comportamiento de este dispositivo, sin embargo, la mayor parte de esos trabajos han sido desarrollados para los tubos y los micro tubos de calor. Siendo la bibliografía para los mini tubos de calor muy escasa y en algunos casos hasta inexistente. Por este motivo, es necesario realizar estudios experimentales que permitan entender su comportamiento, para así poder evaluar el desempeño de los modelos de simulación numérica que se desarrollen posteriormente.

Las aplicaciones de los mini tubos de calor abarcan un rango de temperaturas que va desde las temperaturas criogénicas hasta las temperaturas que pueden alcanzar algunos metales fundidos. Entre otros, los usos más frecuentes de estos dispositivos son: recuperadores de energía en las estaciones espaciales y satélites, enfriadores de componentes de circuitos electrónicos, colectores solares, controladores térmicos, etc.

El presente trabajo de investigación, consiste en realizar pruebas experimentales para un mini tubo de calor multiranurado y obtener las distribuciones de temperatura para diferentes cargas del fluido de operación, y evaluar su comportamiento térmico.

Este trabajo está conformado por cinco capítulos. En el primer capítulo se plantea el problema sometido a estudio, así como los objetivos y alcances propuestos para el desarrollo del trabajo.

El capítulo II, representa el fundamento teórico del trabajo, en el cual se explica de manera resumida los aspectos fundamentales del funcionamiento de un mini tubo de calor, las zonas, los componentes y las limitaciones operativas.

En el capítulo III, se describe la metodología empleada para realizar el estudio experimental del dispositivo.

En el capítulo IV, se muestran los resultados obtenidos en el estudio experimental y se analizan.

En el capítulo V se presentan las conclusiones concernientes al desarrollo del trabajo. Al finalizar este capítulo, se señalan las recomendaciones para la realización de trabajos posteriores en el área de mini tubos de calor.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del Problema

El tubo de calor es un dispositivo que permite transmitir calor de una fuente a un sumidero. Su principio de funcionamiento fue concebido en 1942 por Gaugler, sin embargo no fue hasta 1964 cuando Grover patentó el dispositivo. Algunas de las ventajas de utilizar el tubo de calor son: fácil ensamblaje; no requieren mantenimiento, debido a la carencia de partes móviles en el interior; proceso de operación controlado y excelente capacidad para transmitir grandes tasas de flujo de calor en distancias considerables y con una pequeña diferencia de temperatura.

Los mini tubos de calor son tubos de calor de menor tamaño que se emplean cuando las limitaciones de espacio son estrictas, y son de gran utilidad para el control de temperatura de elementos pequeños, así como para el calentamiento y enfriamiento localizado.

En los últimos años se ha determinado que las aplicaciones de los mini tubos de calor pueden ser numerosas debido a la optimización del espacio en muchos sistemas energéticos, electrónicos y en cualquier otro en el que se requiera refrigerar o calentar un punto o una zona. En este sentido, se han venido realizando investigaciones y aportes científicos sobre estos interesantes dispositivos, pero la mayoría de estos estudios han sido con el motivo de desarrollar modelos matemáticos de simulación numérica para predecir y comprender su funcionamiento; pero no siempre los modelos han logrado adecuarse al funcionamiento del mini tubo de calor (Soto, 2008). Además, en esos trabajos anteriores se evalúan mini tubos de calor para describir algunos fenómenos que ocurren en este, en diferentes condiciones de estudio (presiones del fluido de operación, volumen del fluido de operación, mini tubos estáticos y dinámicos, etc.) y formas externas e internas (incluyendo la mecha) que el tubo pueda tener; haciendo de esta manera que la poca información que se tiene de los mini tubos de calor sea variada pero muy puntual. Por esta razón, con el presente trabajo se plantea someter un mini tubo de calor multiranurado a un estudio experimental con diferentes condiciones de

operación, y así generar resultados que permitan describir el funcionamiento y contribuir al desarrollo de éste tipo de dispositivos.

Objetivos y Alcances

1.2.1. Objeto

El objeto de este Trabajo Especial de Grado es realizar pruebas experimentales a un mini tubo de calor para determinar el perfil de temperaturas.

1.2.2. Objetivo General

Determinar el comportamiento térmico de un mini tubo de calor multiranurado en régimen permanente, basado en un estudio experimental.

1.2.3. Objetivos Específicos

1. Generar la matriz de pruebas experimentales.
2. Realizar las pruebas experimentales basadas en los parámetros de la matriz generada en el objetivo anterior.
3. Determinar la distribución de temperaturas en función de la carga térmica suministrada, a lo largo del dispositivo.
4. Evaluar si el dispositivo se comporta como tubo de calor.
5. Efectuar modificaciones en la estructura capilar en el caso que no se cumpla con el objetivo número cuatro (4).
6. Realizar pruebas experimentales para distintas condiciones de operación del dispositivo con las modificaciones propuestas.
7. Evaluar si el dispositivo se comporta como tubo de calor con las modificaciones propuestas.
8. Generar una base de datos experimentales para estudios posteriores en el área de mini tubos de calor.

1.2.4. Alcances y Limitaciones

- Realizar la revisión y recopilación bibliográfica en el área de mini tubos de calor.
- Estudiar los principios fundamentales que rigen el comportamiento de los mini tubos de calor.
- Establecer y fijar las variables y parámetros para la realización de las pruebas experimentales.
- Definir la metodología de estudio experimental con la que se llevará a cabo cada ensayo.
- Efectuar ensayos para las diferentes condiciones de operación del dispositivo.
- Evaluar las variables que afecten el funcionamiento del mini tubo de calor.
- Realizar esquemas de distribuciones de temperatura en el dispositivo.
- Estudiar los diferentes perfiles de temperatura.
- Evaluar el funcionamiento del dispositivo para las condiciones estudiadas.
- Establecer si el dispositivo se comporta como tubo de calor.
- Explicar el comportamiento del dispositivo, de acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos realizados.
- Proponer y evaluar las modificaciones que se le puedan realizar, de ser necesario, al mini tubo de calor.
- Establecer y fijar las nuevas variables y parámetros para la realización de las pruebas experimentales del dispositivo modificado.
- Efectuar ensayos para las diferentes condiciones de operación del dispositivo, basados en el alcance anterior.
- Determinar las distribuciones de temperatura para cada condición de operación del dispositivo.
- Establecer si el dispositivo modificado se comporta como tubo de calor.
- Registrar los resultados experimentales para el mini tubo de calor estudiado.
- Rediseñar el banco de pruebas si es necesario.
- Realizar el informe de Trabajo Especial de Grado en su totalidad incluyendo las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

- Para realizar las pruebas experimentales se utilizará el banco experimental diseñado y construido por Soto (2008).
- El mini tubo a evaluar es el mismo de Soto (2008). No se contempla la construcción de un nuevo mini tubo de calor multiranurado.

CAPÍTULO II

ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LOS TUBOS DE CALOR

Los principios fundamentales que rigen el funcionamiento de un tubo de calor, involucran una serie de consideraciones y limitaciones prácticas que deben ser estudiadas y comprendidas con anterioridad al desarrollo de cualquier modelo, diseño o prueba experimental. Por lo que en éste capítulo se presentará de manera simple los principales aspectos y mecanismos que definen el comportamiento de un tubo de calor.

En general, el tubo de calor es un tubo cerrado, cuya pared interna está envuelta con una estructura capilar; esa estructura está saturada con el fluido de operación en fase líquida y el resto del volumen remanente del tubo contiene la fase de vapor del fluido. El calor se aplica por medio de una fuente externa en el evaporador, haciendo que se evapore el fluido de operación. La diferencia de presión, hace que el vapor fluya hacia el condensador, en donde se condensa cediendo el calor latente de vaporización. La disminución de líquido por evaporación, causa en el evaporador una interfaz líquido-vapor en la superficie de la mecha y se desarrolla una presión capilar dentro de ésta. Debido a la presión capilar, el líquido condensado es bombeado de vuelta al evaporador. Este proceso continuará mientras el paso del fluido de operación no esté bloqueado y se mantenga la presión capilar necesaria.

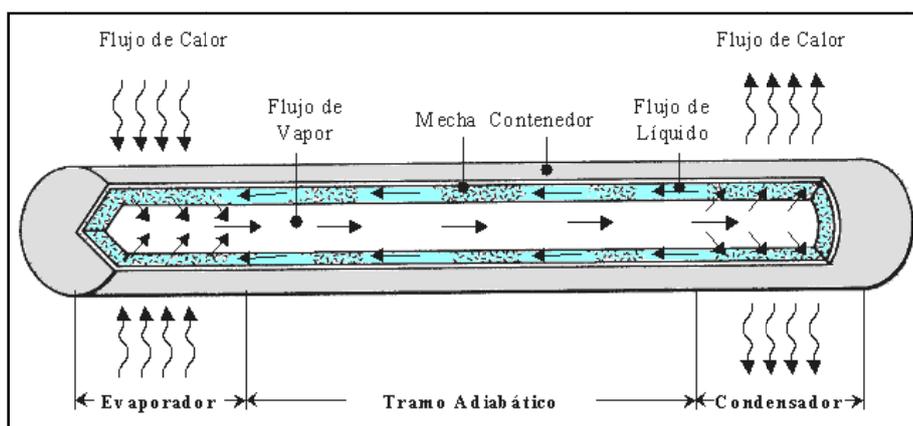


Figura 2.1 Esquema de un mini tubo de calor (Soto *et al*, 2005)

Los tubos de calor se pueden clasificar según sus dimensiones, en tres: micro tubos de calor, mini tubos de calor y tubos de calor. Los micro tubos de calor fueron definidos por Cotter (1984), como pequeños dispositivos en los cuales el radio de curvatura del menisco en la interface líquido-vapor es inversamente proporcional al radio hidráulico del canal de flujo. Groll y Rosler (1992), sugieren una definición para mini tubos de calor gravitacionales, en la que el diámetro del tubo está en un rango entre 1 y 3 mm.

2.1. Componentes de un Tubo de Calor

2.1.1. El Contenedor

La función del contenedor es principalmente, la de aislar el fluido de operación del medio externo. Por consiguiente, debe ser a prueba de fugas, debe mantener la diferencia de presión a través de sus paredes y permitir la transferencia de calor.

La selección del material para el contenedor depende de algunos factores, como los siguientes:

- Compatibilidad tanto con el fluido de operación como con el medio ambiente de trabajo.
- Alta conductividad térmica.
- Fácil fabricación o conformado (soldabilidad, maquinabilidad y ductilidad).
- Porosidad.
- Buena resistencia a la fluencia térmica en todo el espesor del radio del tubo.

La compatibilidad del material con el fluido de operación es una consideración muy importante, debido a que los tubos de calor están sometidos a degradaciones continuas, como resultado de la descomposición o reacción química del fluido de operación y a la corrosión y erosión del contenedor y la mecha. En la siguiente tabla se muestra la compatibilidad de diferentes fluidos de operación con algunos materiales utilizados para la construcción de contenedores de tubos de calor.

Tabla 2.1 Compatibilidad de diferentes fluidos y materiales (Dunn y Reay, 1994)

Fluido	Compatible	No Compatible
Amoniaco	Aluminio, Acero al Carbono, Aceros Inoxidables, Níquel	Cobre
Acetona	Cobre, Silicio, Aceros Inoxidables, Aluminio	
Metanol	Cobre, Aceros Inoxidables, Silicio	Aluminio
Agua	Cobre Acero Inoxidable 347	Aluminio Silicio Níquel Acero al Carbono
Potasio	Aceros Inoxidables, Níquel	Níquel
Sodio	Aceros Inoxidables, Níquel	Níquel

2.1.2. Fluido de Operación

Para el adecuado funcionamiento del tubo de calor, la estructura capilar debe estar saturada con el fluido de operación en su fase líquida. La selección del fluido de operación correcto, esta ligada a una serie de requerimientos de temperaturas existentes en el medio en que funcionará el dispositivo.

Algunas de las características que debe poseer el fluido de operación, son:

- Compatibilidad con la mecha y con el material del contenedor.
- Estabilidad térmica.
- Alto calor latente de vaporización.
- Alta conductividad térmica.
- Viscosidad baja.
- Alta tensión superficial.

Los tubos de calor han sido desarrollados para un rango de fluidos de operación que abarcan desde líquidos criogénicos hasta metales líquidos. Éstos se pueden clasificar en tres tipos: criogénicos, temperaturas moderadas y metales líquidos. Los tubos de calor criogénicos cubren un rango de temperaturas que llega hasta 122 K; los de temperaturas moderadas van desde 122 K hasta 628 K; y los del tipo metales líquidos abarcan desde 628 K en adelante.

2.1.3. La Mecha o Estructura Capilar

El propósito de la mecha es el de proporcionar: el paso de flujo necesario para el retorno del líquido condensado; una superficie porosa en la interface líquido-vapor para el desarrollo de la presión capilar requerida para el bombeo del líquido y permitir la transferencia de calor entre la pared interior del contenedor y la interface líquido-vapor. Los materiales para realizar una mecha pueden ser: mallas, telas, fibra de vidrio, metales porosos sinterizados, pequeñas ranuras maquinadas en el interior del tubo, etc. Generalmente, una estructura capilar efectiva requiere una pequeña superficie porosa para el desarrollo de una gran presión capilar, poros internos grandes (en la dirección normal al flujo de líquido) para ofrecer la menor resistencia posible al flujo del líquido, y una alta transferencia de calor a través de su espesor para una pequeña diferencia de temperatura. Muchos tipos de mechas han sido desarrolladas, las cuales pueden ser clasificadas en dos grandes grupos: mechas homogéneas, constan de un solo material; y mechas compuestas, que están formadas por dos o más materiales. En las figuras 2.2 y 2.3 se muestran algunos tipos de mechas homogéneas y mechas compuestas empleadas comúnmente en tubos de calor.

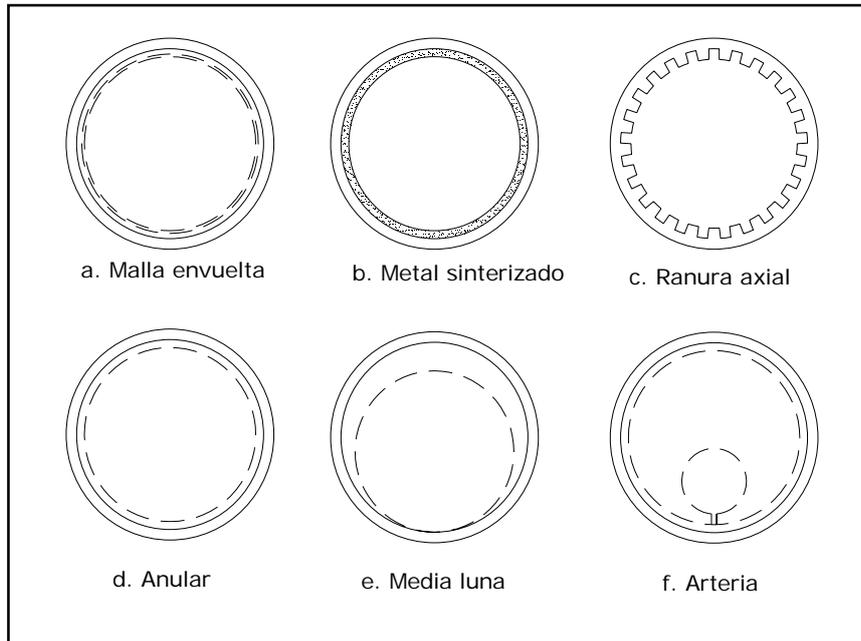


Figura 2.2 Ejemplos de mechas homogéneas.

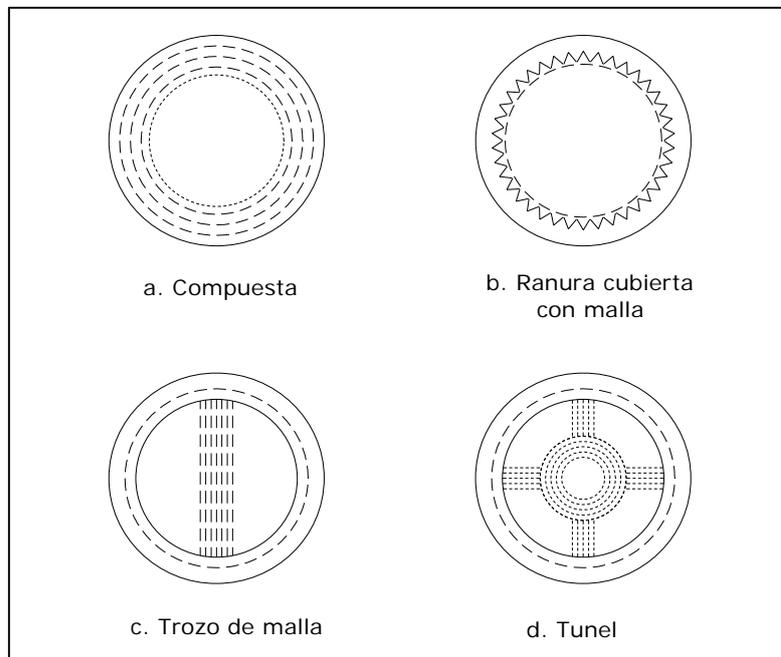


Figura 2.3 Ejemplos de mechas compuestas.

2.2. Presión Capilar

Durante el funcionamiento del tubo de calor en régimen permanente, el fluido de operación en la fase de vapor fluye continuamente del evaporador al condensador, y retorna al evaporador en fase líquida. A lo largo del paso de flujo de vapor como en el de líquido, se genera un gradiente de presión. Para el balance de presión requerido, es necesario que a lo largo de la longitud del tubo, la presión en el lado líquido de la interface líquido-vapor sea diferente que la presión en el lado de vapor; excepto en el punto donde la diferencia se hace mínima e igual a cero. Ésta diferencia de presión entre las dos fases es llamada Presión Capilar, la cual es establecida por el menisco que se forma en la interface.

2.3. Limitaciones Operativas de un Tubo de Calor

La máxima circulación de fluido posible es requerida para obtener la mayor capacidad de transferencia de calor en éste dispositivo. Las limitaciones sobre la capacidad de transporte de calor, incluyen: el factor de bombeo capilar (limitación capilar), el flujo de vapor estrangulado (limitación sónica), la retención de líquido fuera de la interface líquido-vapor como resultado del flujo de vapor a alta velocidad (limitación de arrastre), y las alteraciones en el flujo de líquido como consecuencia del fenómeno de ebullición que se produce en la mecha (límite de ebullición). Otros factores que influyen en el proceso operativo del tubo de calor, son: las características de temperatura, las técnicas de control aplicadas en el dispositivo, y la condición existente en la interface entre el tubo con la fuente de calor y con el sumidero.

2.3.1. Limitación Capilar

Se refiere al flujo de líquido que es originado por la presión capilar existente en la mecha. Para que el tubo de calor opere continuamente sin que la mecha se seque, la presión capilar no debe exceder la máxima presión capilar en cualquier punto a lo largo del tubo, por lo tanto, ésta limita el funcionamiento del dispositivo.

2.3.2. Limitación Viscosa

En condiciones donde la temperatura de operación es baja, la diferencia de presión de vapor entre el condensador y el evaporador puede ser muy pequeña, provocando que la

velocidad en la corriente de vapor alcance valores muy altos, lo que origina fuerzas viscosas que pueden llegar a ser una limitante.

2.3.3. Limitación Sónica

El límite sónico en tubos de calor es análogo al límite sónico que ocurre en toberas con gargantas convergentes-divergentes, al vapor alcanzar la velocidad del sonido, el flujo se estrangula, por lo que se convierte en una limitante.

2.3.4. Limitación por Arrastre

Como resultado de las altas velocidades de flujo de vapor, las gotas de líquido en la mecha pueden ser arrastradas por la corriente de vapor y causar la acumulación de líquido en el condensador y por lo tanto el secado de la mecha en el evaporador.

2.3.5. Limitación por Ebullición

Se refiere a la aparición de burbujas en el evaporador, las cuales limitan el flujo de líquido en la mecha, por lo que representa una condición máxima de funcionamiento.

2.4. Aplicaciones

Los tubos de calor se han encontrado en numerosas aplicaciones industriales, médicas, de telecomunicaciones y aeroespaciales. En la industria de generación energética son usados para la refrigeración de rotores, álabes de turbinas, generadores, motores, transformadores, así como en sistemas de conversión de energía. En la industria eléctrica para el enfriamiento de componentes e instrumentos electrónicos. También son empleados en la recuperación de calor de los gases de escape, energía solar y energía geotérmica. En la industria de manufactura, se utilizan para refrigerar las máquinas de corte y otras máquinas de herramientas. En las telecomunicaciones, para enfriar sensores infrarrojos, amplificadores y sistemas láser. En la rama de la medicina, los tubos de calor son utilizados en la cirugía de tumores. Y, en la industria aeroespacial, han sido desarrollados para el control de temperatura de vehículos, instrumentos y trajes espaciales.

2.5. Antecedentes

Después del desarrollo de la idea aportada por Gaugler (1944) de un dispositivo capaz de transmitir calor y luego mejorada por Grover (1964), se han realizado numerosos estudios en el área. Al hablar de tubos de calor es de referencia obligada mencionar los trabajos de síntesis de Chi (1976), obra en la cual estudia tanto aspectos operacionales como su aplicación a procesos industriales. Más recientemente, Silverstein (1992), Dunn y Reay (1994), Peterson (1994) y Faghri (1995), recopilaron información detallada y actualizada sobre estos dispositivos, incorporando nuevos tópicos acerca los mismos, como técnicas de simulación numérica, nuevos procesos de manufactura, nuevas aplicaciones, etc.

En ésta revisión bibliográfica se incluyen los trabajos de investigación de mayor relevancia en el área, principalmente aquellos que cubren los aspectos relacionados con el comportamiento térmico y fluidodinámico de los mini tubos de calor. Estas investigaciones las podemos dividir en dos grupos: estudios experimentales y estudios de simulaciones analíticas y numéricas.

Estudios Experimentales

De los trabajos experimentales que se han tomado como antecedentes para la presente investigación, podemos mencionar a Padrón (1986), que realiza el diseño, construcción y evaluación de un banco de ensayos de tubos de calor de temperaturas moderadas, para determinar el funcionamiento de diferentes mechas y condiciones de operación. Lin *et al.* (2002), realizaron un estudio del rendimiento de mini tubos de calor; emplearon diferentes estructuras capilares hechas con una lámina de cobre y diferentes métodos de suministro de calor al evaporador. Jin Kim *et al.* (2002), desarrollaron una investigación analítica y experimental de las características de operación y optimización térmica de un mini tubo de calor multiranurado; éstos científicos, lograron validar un modelo matemático llamado SHAH, obteniendo resultados experimentales muy parecidos a los arrojados por el modelo en cuanto a la máxima capacidad de transferencia de calor y a la resistencia térmica total. Murer *et al.* (2004), realizaron un análisis experimental y numérico del comportamiento en estado transitorio de un mini tubo de calor. Pehlivan *et al.* (2005), realizaron un estudio experimental de flujo bifásico y caída de presión en mini canales, utilizando para ello los modelos

matemáticos desarrollados por Friedel (1979) y Chisholm (1967). Vasiliev (2006), efectuó un estudio experimental, en el cual comparó la capacidad de transferencia de calor de micro y mini tubos de calor empleados en el enfriamiento de componentes electrónicos, con diferentes tipos de estructuras capilares. Soto (2008), realiza un estudio numérico y experimental del comportamiento térmico y fluidodinámico de micro tubos de calor multiranurado, partiendo del modelo de simulación propuesto por García (2000).

Estudios de Simulaciones Analíticas y Numéricas

Entre los modelos de simulación, podemos mencionar a Lin (1998), quién estableció un modelo teórico que describe el flujo de vapor en un mini tubo de calor rotativo con ranuras axiales de sección transversal triangular en la superficie interna, llegando a la conclusión que la influencia de las fuerzas centrífugas en el flujo de líquido y en la transferencia de calor, es despreciable. Schneider (2002), realizó un estudio numérico de mini tubos de calor interconectados, para el enfriamiento de componentes electrónicos. Riffat *et al.* (2002), realizaron modelos analíticos y numéricos para evaluar el rendimiento térmico de mini y micro tubos de calor gravitacionales; los modelos se basan en la forma física de los dispositivos y determinan la capacidad de transporte de calor en función del fluido de operación utilizado, el ángulo de inclinación y el volumen de llenado de líquido. Qu *et al.* (2006), realizaron un análisis teórico de la puesta en marcha de un mini tubo de calor oscilante, y determinaron que las condiciones de la pared interna del contenedor, las burbujas de vapor atrapadas en los poros de la estructura capilar y la evaporación de fluido en el evaporador, afectan el arranque del mini tubo. Jiao *et al.* (2007), evaluaron las características de transferencia de calor de un mini tubo de calor multiranurado, con ranuras de sección transversal trapezoidal; asimismo desarrollaron un modelo matemático que predice el efecto del ángulo de contacto en el radio del menisco y en el flujo de calor en las ranuras del trapezoidales del dispositivo.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En éste capítulo se presentarán y describirán los pasos seguidos para realizar el estudio experimental del mini tubo de calor.

3.1. El Mini Tubo de Calor

En forma general, el dispositivo a estudiar es un tubo de cobre de 13 cm de longitud con dos tapones del mismo material en los extremos de 1 cm cada uno, lo que reduce la longitud efectiva del mini tubo a 11 cm de largo. El tubo en su interior posee dieciséis (16) ranuras axiales uniformemente distribuidas de sección transversal triangular, con un ángulo de apertura de 60° . En el extremo del condensador, se le adaptó una tuerca para luego conectársele una válvula de aguja. La sección del evaporador tiene una longitud de 4 cm, el tramo adiabático tiene 3 cm de largo y la sección del condensador tiene una longitud de 4 cm. El mini tubo de calor a utilizar fue desarrollado por Soto (2008). En la figura 3.1 se muestra un esquema del mini tubo.

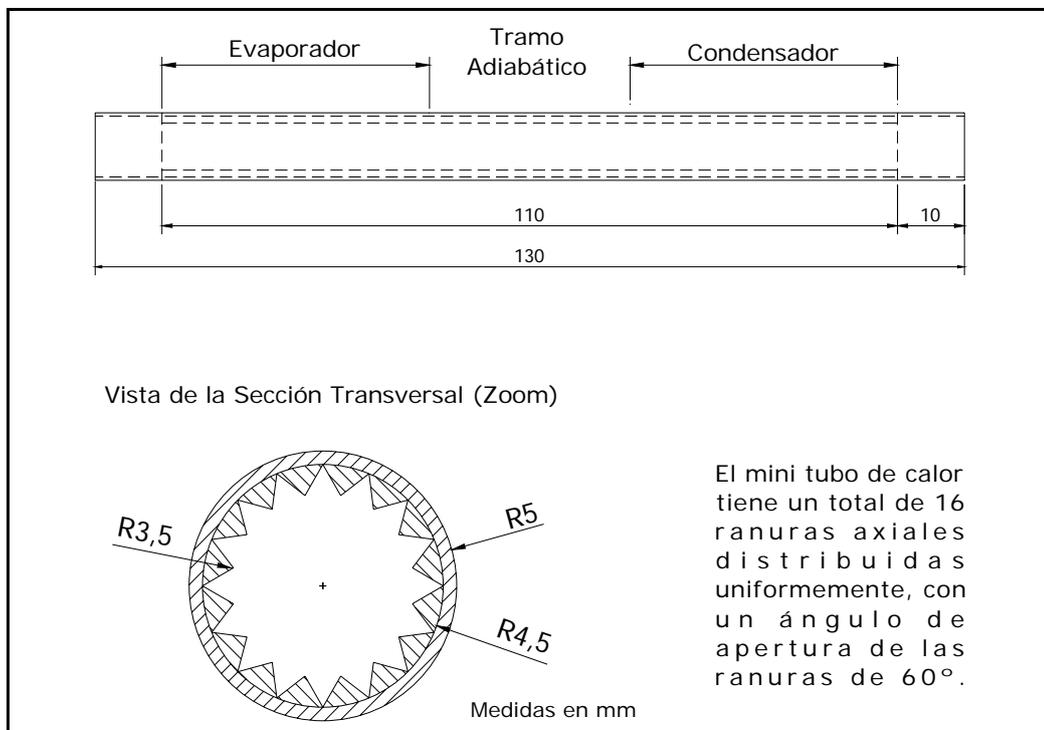


Figura 3.1 Esquema del mini tubo de calor

3.2. Fluido de Operación

El fluido que se utilizará para llenar el mini tubo de calor es metanol (CH_4O), elaborado por la compañía Fluka (ver especificaciones en el anexo A5). En la tabla 3.1 se muestran algunas de las propiedades físicas más importantes del fluido de operación.

Tabla 3.1 Propiedades físicas del metanol

Punto de ebullición: 65°C
Punto de fusión: -94°C
Densidad relativa (agua = 1): 0.79
Solubilidad en agua: Miscible
Presión de vapor, kPa a 20°C: 12.3
Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.1
Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.01
Punto de inflamación: 12°C (c.c.)
Temperatura de auto ignición: 385°C
Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 6-35.6
Coefficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.82/-0.66

3.3. Variables y Parámetros Sometidos a Estudio

Las variables a registrar y estudiar en este trabajo experimental, son aquellas que puedan afectar de manera directa el comportamiento del mini tubo de calor. Las cuales, son:

- Temperatura superficial del tubo, se evaluará en cuatro puntos del dispositivo desde el evaporador al condensador.
- Temperatura ambiental, la cual se refiere a la temperatura en el entorno del mini tubo de calor.
- Humedad Relativa, medida en el entorno del dispositivo.
- Voltaje, se refiere al voltaje suministrado a los calentadores principal y de resguardo del banco de pruebas.

- Intensidad de Corriente, indica la corriente que circula a través de los calentadores principal y de resguardo.

Para establecer y organizar los parámetros de estudio que regirán cada ensayo experimental, se elaboraron tres matrices de prueba para tres configuraciones distintas de la estructura capilar del mini tubo de calor. Éstas matrices indican el número de pruebas que se realizaron para cada configuración, la masa de fluido circulante y el volumen de fluido circulante con que se llenó el dispositivo. Cada prueba se efectuó a tres condiciones de temperatura diferentes, las cuales son: 65 °C, 70 °C y 75 °C.

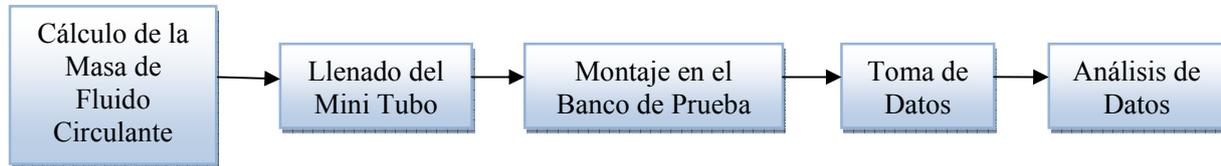
Estas temperaturas se establecieron de acuerdo a las propiedades físicas del fluido de operación, específicamente la presión de llenado. La temperatura para la presión de saturación es de 70 °C, y debido a los errores que pueden existir en la medición y lectura de la presión en los manómetros, se estableció un rango de estudio de ± 5 °C para compensar esos posibles errores.

Las temperaturas de estudio se impusieron que fueran alcanzadas en el evaporador, específicamente en el punto en donde la sección del evaporador se une con el tramo adiabático, debido a que ese punto no está sometido a la influencia de la tapa de aislante colocada en el extremo del evaporador (en la sección 3.11, la figura 3.5 muestra la disposición de los aislantes en el mini tubo).

3.4. Procedimiento para Realizar las Pruebas Experimentales

El procedimiento empleado para realizar las pruebas experimentales consiste en una serie de pasos que se explican a continuación, los cuales abarcan desde la generación de la matriz de prueba hasta la toma de datos finales cuando el dispositivo ha alcanzado el régimen permanente en el banco de prueba.

Esquema del procedimiento experimental:



3.5. Instrumentos

Los instrumentos que se utilizaron para medir e indicar las variables experimentales fueron: un tester, un tri-sense y un indicador de temperaturas. El tester se empleó para medir el voltaje y la intensidad de corriente en cada uno de los calentadores; el tri-sense para medir las condiciones ambientales (temperatura ambiente y humedad relativa) en el entorno del mini tubo de calor; y el indicador de temperaturas, para señalar las temperaturas alcanzadas en los distintos puntos de la superficie del dispositivo y del calentador de resguardo. A pesar que el banco de pruebas cuenta con amperímetros y voltímetros, se prefirió utilizar un tester porque los instrumentos del banco son muy antiguos y no cuentan con la mejor precisión para la toma de datos. Los instrumentos de medición a utilizar, son:

- Tester Digital Clamp Meter, modelo 3010 AC 610.
- Tri-Sense Barnant Temperatura/Humedad/Velocidad de Aire, modelo N° 637-0000.
- Indicador de temperaturas marca Watlow serie SD31.

3.6. Matriz de Prueba N° 1 (Mini Tubo de Calor Original)

La matriz se realizó para el dispositivo en su versión original, para ésta se calcularon y establecieron tres valores a estudiar de la masa de fluido circulante. Para calcular la masa de fluido circulante, primero se determinó el volumen de la sección equivalente y con la densidad del fluido de operación, luego se calculó la masa. El cálculo se realizó de la siguiente manera:

Conociendo los diámetros del mini tubo de calor podemos determinar el área de la sección transversal, la cual dio como resultado:

$$A_{st} = 47,5223 \text{ mm}^2$$

Luego el volumen se obtiene multiplicando el área de la sección transversal por la longitud del tubo correspondiente al volumen equivalente que se desea estudiar:

$$V_{fc} = A_{st} \times L = A_{st}(\text{mm}^2) \times L (\text{mm}) = V_{fc} (\text{mm}^3)$$

$$V_{fc} (\text{ml}) = \frac{V_{fc}(\text{mm}^3)}{1000}$$

donde V_{fc} es el volumen de fluido circulante. La masa de fluido circulante (m_{fc}) se obtiene por medio de la densidad (d):

$$d\left(\frac{\text{g}}{\text{ml}}\right) = \frac{m_{fc}}{V_{fc}} \Rightarrow m_{fc} = d \times V_{fc} = m_{fc}(\text{g})$$

En la siguiente tabla se muestra la matriz generada para el primer conjunto de pruebas experimentales.

Tabla 3.2 Matriz de prueba para la primera configuración de la estructura capilar

Prueba	m_{fc} [g]	V_{fc} [ml]	Volumen Equivalente
1	1,501	1,90	L_e
2	2,062	2,61	$L_e + \frac{1}{2} L_a$
3	2,631	3,33	$L_e + L_a$

L_e : Longitud del evaporador.

L_a : Longitud del tramo adiabático.

3.7. Sistema de Llenado

El sistema de llenado consiste en un conjunto de tuberías interconectadas con una serie de elementos a través de los cuales se hace pasar el fluido de operación para que sea

desgasificado y preparado para ser cargado en el mini tubo de calor, el cual fue diseñado y construido por Soto (2008). El sistema consta de: una (1) bomba de vacío, catorce (14) válvulas de compuerta, dos (2) trampas fría (cold trap, CT), dos (2) desgasificadores (DG), un (1) vacuómetro y una (1) micro bureta. La tubería del sistema es de cobre y tiene un diámetro nominal de 1/8 de pulgada. En la figura 3.2 se presenta un esquema del sistema de llenado utilizado en el trabajo.

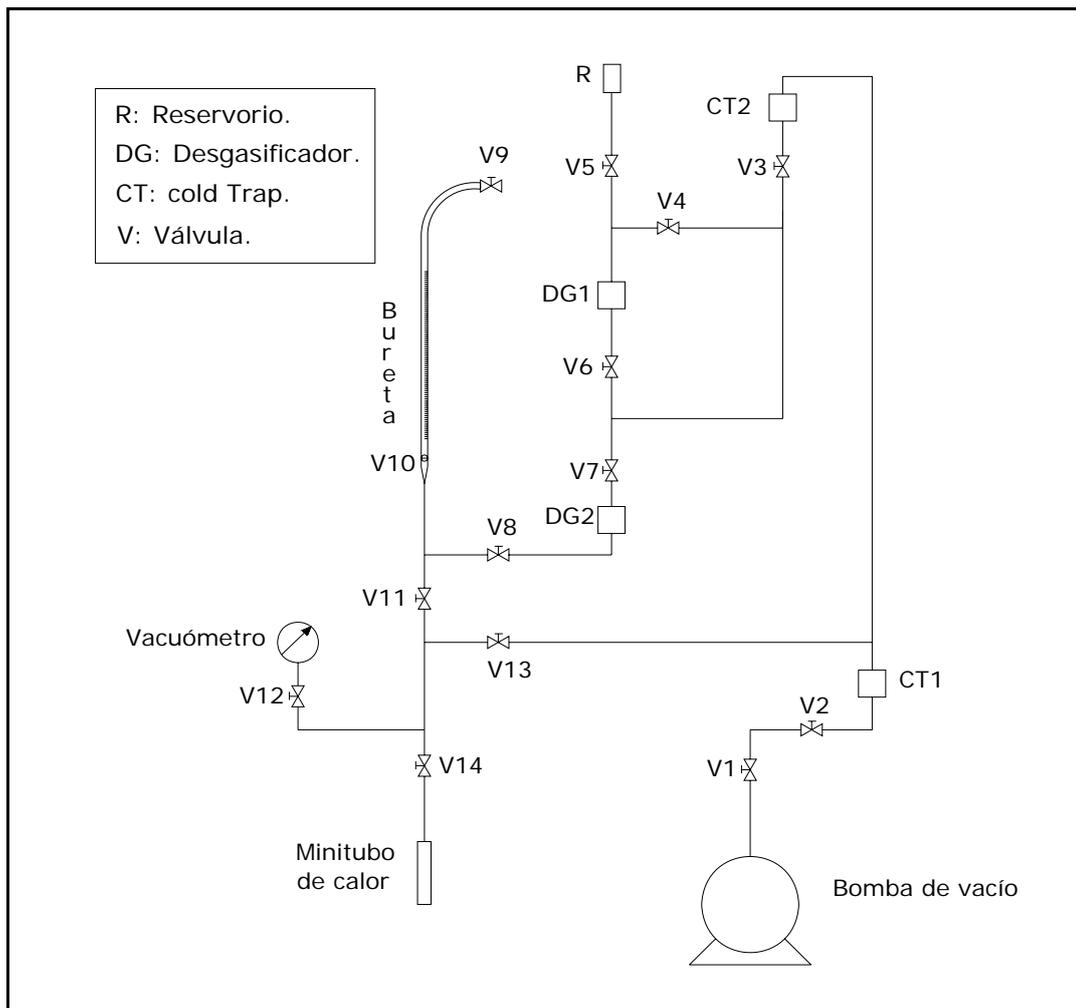


Figura 3.2 Esquema del sistema de llenado

- Las CT son envases de acero inoxidable que se usan para atrapar líquido o impurezas que puedan afectar al sistema y están sumergidas en nitrógeno líquido. El decremento de la temperatura como consecuencia del nitrógeno líquido, hace que los gases no

condensables existentes dentro del sistema de llenado se dirijan hacia las CT debido a la diferencia de presión que se genera. Una vez que estos fluidos se encuentran en las CT, son extraídos del sistema por medio de la bomba de vacío.

- DG1 y DG2 son envases de acero inoxidable que se utilizan para desgasificar el fluido de operación, sometiénolo a procesos de congelamiento y descongelamiento continuo.
- En la micro bureta se mide el volumen de fluido que se va a cargar en el mini tubo de calor.

3.8. Prueba de Vacío

Antes de llenar el mini tubo de calor con el volumen de fluido que se desea estudiar, es necesario realizar una prueba de vacío en el sistema de llenado para comprobar que no haya infiltraciones en éste, y así evitar que haya más de un componente dentro del dispositivo.

La prueba de vacío se realiza para cada tramo del sistema de llenado por separado, y se comprueba que existe vacío, observando que el nivel de presión indicado por el manómetro de la bomba de vacío no varía en el transcurso del tiempo.

3.9. Procedimiento de Llenado

El procedimiento seguido para realizar el llenado del mini tubo de calor, fue desarrollado por Soto (2008), el cual consta de los siguientes pasos:

1. Cerrar las válvulas V1, V2, V5, V9 y V14.
2. Llenar los recipientes alrededor de las trampas frías (CT) con nitrógeno líquido, y mantener el nivel del mismo cada 10 minutos.
3. Después de 30 minutos, abrir las válvulas V1 y V2, y encender la bomba de vacío.
4. Luego de 45 minutos, se cierran V4 y V6, y se llena el reservorio (R) con metanol.
5. Abrir V5 lentamente para que el metanol entre en el desgasificador 1 (DG1). Cerrar V5 y congelar el metanol durante 10 minutos usando nitrógeno líquido.

6. Abrir V4, esperar unos segundos, cerrar V4. Esperar 30 minutos para que se descongele el metanol.
7. Congelar nuevamente durante 10 minutos.
8. Abrir V4, esperar unos segundos, cerrar V4.
9. Cerrar V3 y V8, abrir V6 y colocar nitrógeno líquido en el desgasificador 2 (DG2).
10. Descongelar el metanol en el DG1 para llevarlo al DG2 durante 10 minutos (con un secador se calienta desde DG1 hasta DG2, empezando desde V4).
11. Cerrar V4 y V6. Repetir el proceso de desgasificación en el DG2.
12. Cerrar V7 y V11. Abrir V8 y V10 para llevar el metanol a la bureta.
13. Cerrar V8 y V10. Abrir V11 y esperar que el vacío llegue hasta el nivel anterior.
14. Para realizar vacío en el mini tubo de calor, se coloca nitrógeno líquido en la CT2 y se calienta el mini tubo con un secador durante 15 minutos. Para esto, se cierra V3 y V11, y se abre V14.
15. Una vez realizado el vacío en el mini tubo de calor y que la bureta se encuentra cargada de metanol, se procede a llenar el mini tubo con el volumen deseado.

Luego de haber llenado el mini tubo de calor, éste se desconecta del sistema de llenado para ser montado y estudiado en el banco de ensayos.

3.10. Banco de Ensayos

El banco de pruebas se basa en una modificación al banco de pruebas de conducción permanente y unidimensional de calor, perteneciente al laboratorio de Transferencia de Calor de la E.I.M. de la U.C.V. Está constituido por dos secciones, una sección principal perteneciente al banco de pruebas original y otra sección auxiliar diseñada y construida especialmente para el montaje de ensayos de mini tubos de calor. Entre los equipos e instrumentos instalados posee: dos (2) potenciómetros; dos (2) amperímetros; dos (2) voltímetros; controles on/off, un (1) indicador de temperaturas; posee un conjunto de seis (6) termocuplas compensadas tipo J, conectadas a una regleta que a su vez está conectada a un selector de termocuplas. En las figuras 3.3 y 3.4 se muestran un esquema de las dos secciones que constituyen el banco de prueba.

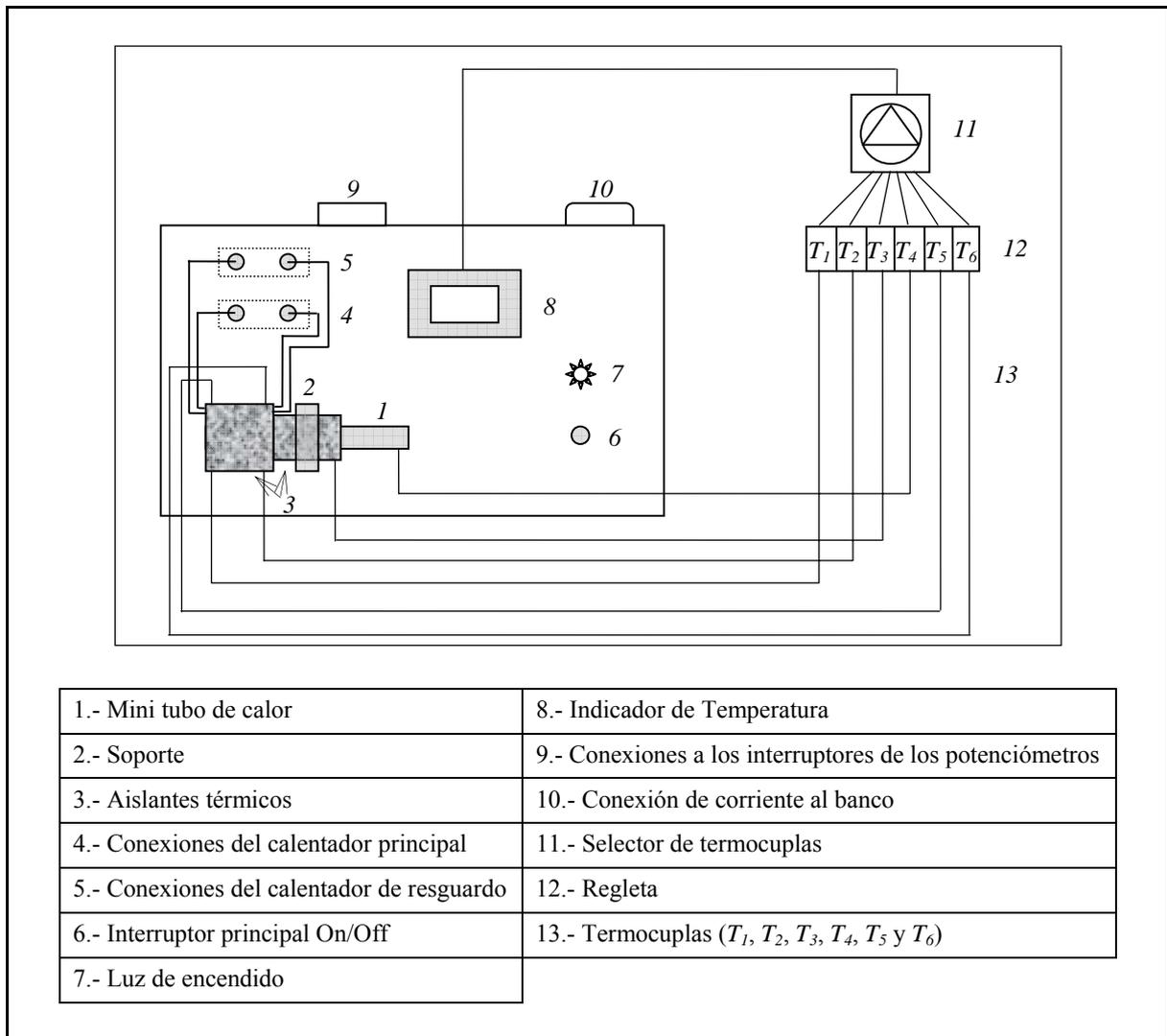


Figura 3.3 Esquema de la sección auxiliar del banco de prueba (Soto, 2008)

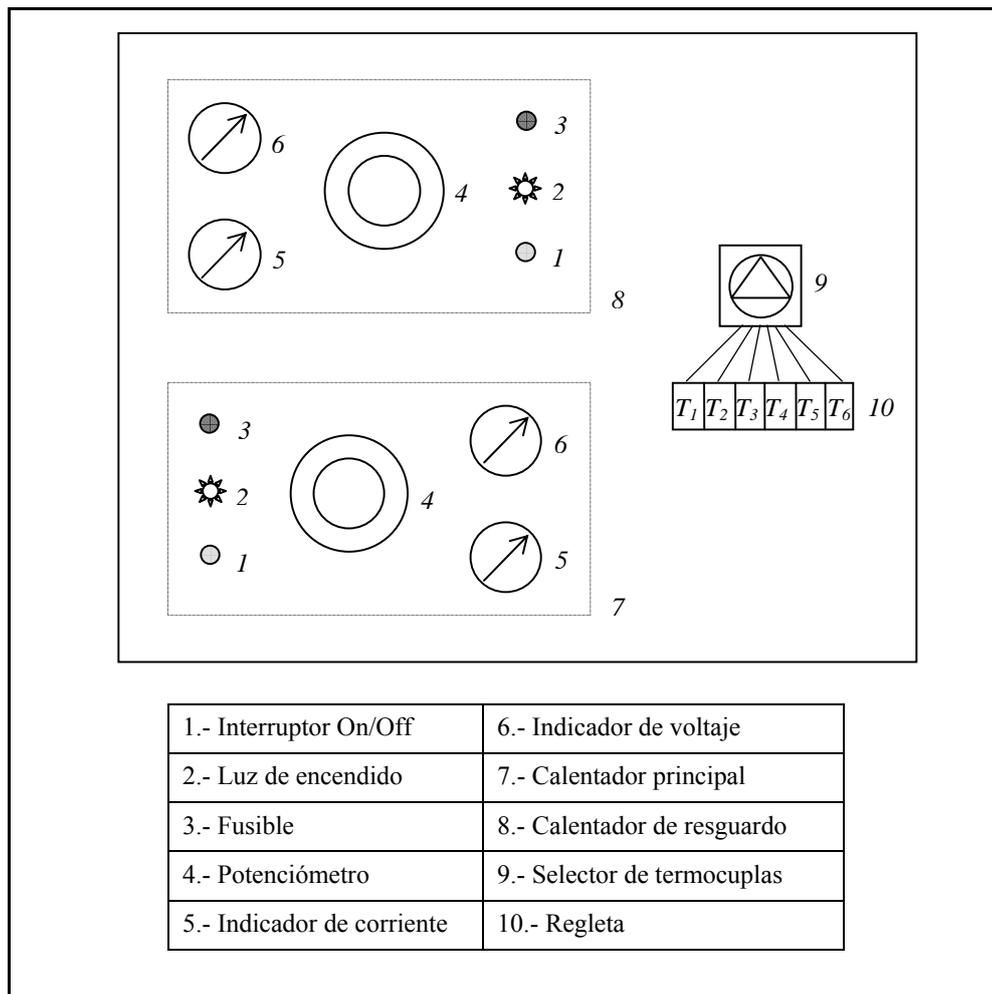


Figura 3.4 Esquema de la sección principal del banco de prueba (Soto, 2008)

Características de los equipos e instrumentos:

- Potenciómetros marca Ohmite. Rango de operación 0 - 110 V. Voltaje de alimentación de la fuente 110 V.
- Amperímetros marca Neuberger. Rango de 0 - 6 A. Precisión de $\pm 0,2A$.
- Voltímetros marca Neuberger. Rango de 0 – 150 V. Precisión de $\pm 5 V$.
- Selector de termocuplas tipo J marca Omega de 20 posiciones.

3.11. Montaje del Mini Tubo en el Banco de Ensayos

El montaje del mini tubo de calor en el banco de pruebas, consiste en colocarle el sistema de suministro de calor en la sección correspondiente al evaporador y las termocuplas en los puntos en donde se desea conocer la temperatura, luego se aísla del medio ambiente empleando aislantes térmicos en las secciones que así lo requieran. Este proceso de montaje, fue propuesto y desarrollado por Soto (2008).

El procedimiento se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Colocar las termocuplas 1, 2, 3 y 4 en los puntos marcados en la superficie del tubo. Las termocuplas 1 y 2 van colocadas en los extremos del evaporador, y las termocuplas 3 y 4 en los extremos del condensador.
- Colocar una envoltura de goma (aislante de pequeño espesor) sobre las termocuplas 1 y 2 para uniformizar la temperatura a lo largo de la sección del evaporador.
- Enrollar y distribuir uniformemente sobre toda la superficie de la goma el calentador principal.
- Hacer una envoltura con papel aluminio sobre el calentador principal, esto se hace con la finalidad de uniformizar la temperatura.
- Colocar el aislante térmico.
- Enrollar y distribuir uniformemente sobre toda la superficie de la goma el calentador de resguardo.
- Hacer una envoltura con papel aluminio sobre el calentador de resguardo.
- Fijar las termocuplas 5 y 6, éstas van situadas sobre los mismos puntos que las termocuplas 1 y 2.
- Colocar el aislante térmico encima de las termocuplas 5 y 6, en el tramo adiabático y encima de la termocupla 4.

Una vez culminado esto, el mini tubo se fija en el soporte de la sección auxiliar del banco y las conexiones de los calentadores se conectan a la fuente de alimentación. En la figura 3.5 se muestra un esquema detallado del montaje de los componentes descritos anteriormente.

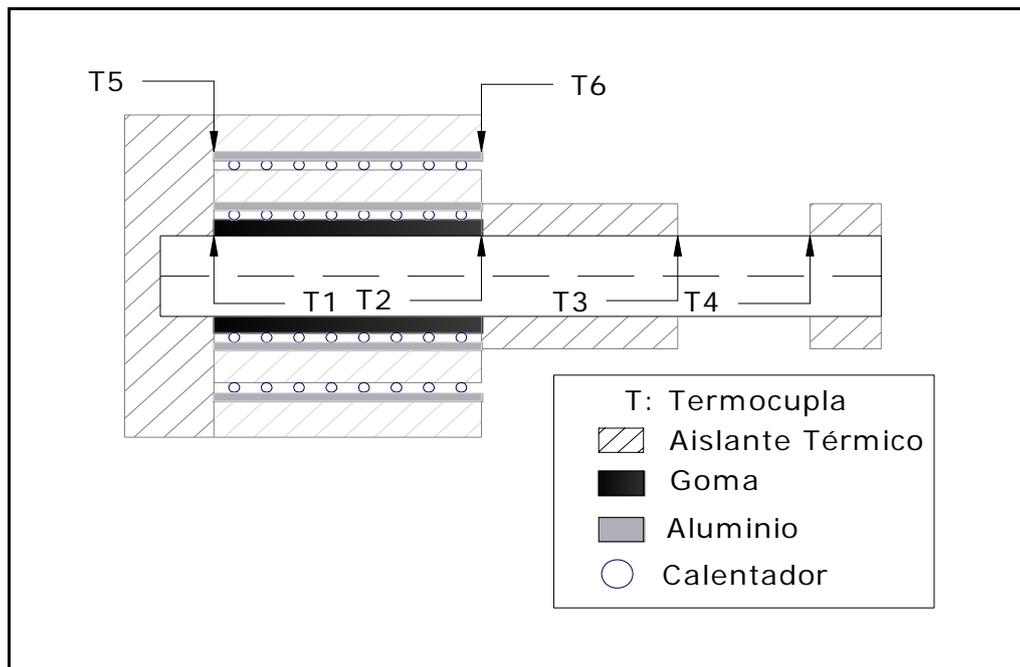


Figura 3.5 Esquema del montaje de los calentadores y termocuplas en el mini tubo de calor

Los calentadores utilizados son dos resistencias elaboradas por Retermof, y poseen las siguientes características:

- Corriente de alimentación: 110 V.
- Potencia: 45W.
- Elemento calefactor interno: cable calentador de 395 ohm/m con filamento resistivo (aleación níquel cromo 80/20) de diámetro 0.08mm.
- Aislamiento de cubierta: Funda o espaguetti en teflón PTFE + FEP (Temperatura máxima de operación 250 °C).
- Terminal de conexión: Cable (conductor de cobre, calibre AWG #18) aislado en funda de silicón (temperatura máxima de operación 180°C).

El aislante térmico empleado, fue un aislante térmico de espuma elastomérica color negro, en forma de tubos sin costura fabricado por Armaflex. El diámetro de los tubos utilizados fue: ½" y 1" (diámetros internos nominales); y el límite máximo de uso es de 105 °C (ver anexo A4 para mayores especificaciones).

3.12. Recopilación de Datos

La toma de datos en el banco de prueba se realiza cierto tiempo después que se fijan los valores de voltaje e intensidad de corriente en los potenciómetros, para así garantizar que el sistema se ha estabilizado el dispositivo. La forma de comprobar que se ha alcanzado el régimen permanente, es observar que en el indicador de temperaturas, la lectura que éste muestra no varía en un período de tiempo prolongado. Una vez que se tomen y registren todos los datos de variables experimentales, se determinaran las tasas de flujo de calor para cada tramo del dispositivo y se evaluara su comportamiento térmico.

3.13. Estructura Capilar Multiranurada con Malla de Fieltro

La primera modificación propuesta a la estructura capilar, en el caso que la configuración inicial no permita el óptimo funcionamiento del dispositivo, consistirá en introducir una mecha de fieltro arrollada en la superficie interna del mini tubo para reforzar la estructura capilar y así lograr una mayor circulación de líquido y evitar el secado en la sección del evaporador. En la figura 3.6 se muestra un esquema de la sección transversal del mini tubo de calor con la nueva estructura capilar.

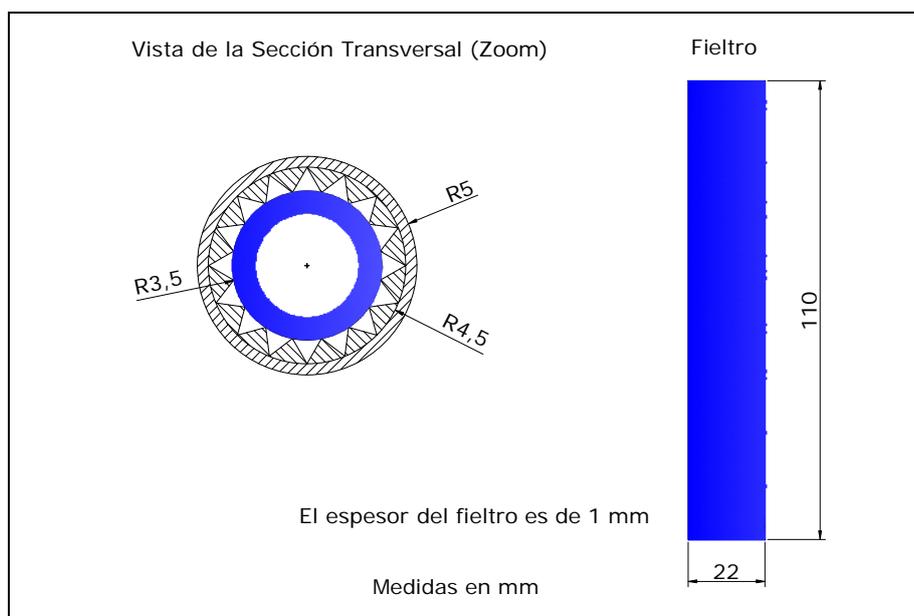


Figura 3.6 Esquema de la sección transversal del mini tubo de calor con mecha de fieltro

3.14. Matriz de Prueba N° 2

En este caso, los cálculos de la masa de fluido circulante se realizan tomando en cuenta la misma área de sección transversal que para la matriz anterior, ya que se considera que el fieltro no cambia el volumen interno del mini tubo sino que sólo absorbía el fluido de operación. Para este segundo grupo de pruebas, se considera efectuar una prueba más con un volumen de fluido circulante correspondiente a la mitad de la longitud del evaporador, debido a que la incorporación del fieltro en la mecha mejoraría el flujo del fluido. En la siguiente tabla se refleja la matriz generada.

Tabla 3.3 Matriz de prueba para la segunda configuración de la estructura capilar

Prueba	m_{fc} [g]	V_{fc} [ml]	Volumen Equivalente
1	0,751	0,95	$\frac{1}{2} L_e$
2	1,501	1,90	L_e
3	2,062	2,61	$L_e + \frac{1}{2} L_a$
4	2,631	3,33	$L_e + L_a$

3.15. Estructura Capilar Multiranurada con Núcleo de Cobre

La segunda modificación propuesta a la estructura capilar, tomando en cuenta que el dispositivo no se logre activar con las dos configuraciones anteriores, consiste en introducir una barra de cobre con la finalidad de reducir el espacio anular en el interior del mini tubo de calor. La reducción del espacio anular disminuirá el flujo de vapor, contribuyendo de esta manera a reducir la posibilidad de secado de la estructura capilar. El corazón de cobre es un cilindro macizo con 6 mm de diámetro y 10,9 cm de longitud, éste será maquinado en el taller mecánico de la Escuela de Ingeniería Mecánica y acoplado dentro del mini tubo en el taller mecánico de la Facultad de Ciencias de la U.C.V. La figura 3.7 muestra un dibujo esquemático de la sección transversal del mini tubo de calor y del corazón de cobre introducido.

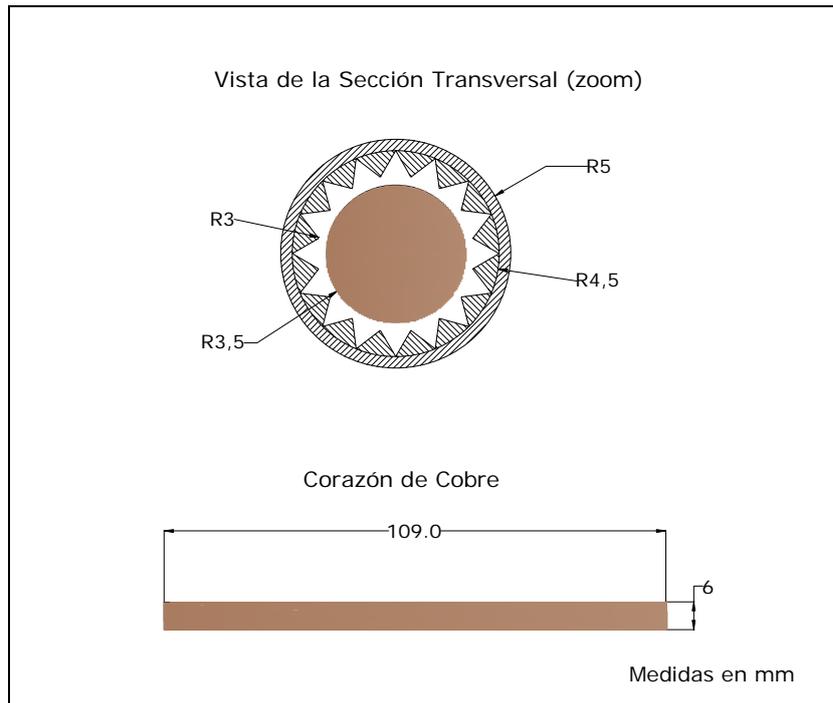


Figura 3.7 Esquema de la sección transversal del mini tubo de calor con el corazón de cobre en el interior

3.16. Matriz de Prueba N° 3

Para determinar la masa de fluido circulante en esta matriz, se tuvo que calcular nuevamente el área de la sección transversal. Los cálculos se efectuaron de la siguiente manera: El área de la nueva sección transversal va a ser el resultado de la diferencia entre el área de sección transversal inicial y el área de la sección transversal del corazón de cobre:

$$A_{nst} = A_{st} - A_{stc}$$

donde, A_{nst} es el área de la nueva sección transversal, A_{st} es el área de la sección transversal original y A_{stc} es el área de la sección transversal del corazón de cobre.

$$A_{stc} = \frac{\pi}{4} D_c^2$$

$$A_{stc} = \frac{\pi}{4} (6mm)^2 = 28,2743 \text{ mm}^2$$

$$A_{st} = 47,5223 \text{ mm}^2$$

$$A_{nst} = 47,5223 \text{ mm}^2 - 28,2743 \text{ mm}^2 = 19,248 \text{ mm}^2$$

D_c es el diámetro del corazón de cobre. Luego el volumen de la nueva sección transversal, es:

$$V_{nst} = A_{nst} \times L$$

donde V_{nst} representa el volumen de la nueva sección transversal y L la longitud del tubo correspondiente al volumen equivalente que se desea estudiar. Luego con la densidad se obtiene la masa de fluido circulante:

$$d \left(\frac{g}{ml} \right) = \frac{m_{fc}}{V_{fc}} \Rightarrow m_{fc} = d \times V_{fc} = m_{fc}(g)$$

La matriz generada se presenta en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Matriz de prueba para la tercera configuración de la estructura capilar

Prueba	m_{fc} [g]	V_{fc} [ml]	Volumen Equivalente
1	0,063	0,08	$1/8 L_e$
2	0,119	0,15	$1/4 L_e$
3	0,158	0,20	$1/3 L_e$
4	0,237	0,30	$1/2 L_e$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presentarán y analizarán los resultados experimentales de los ensayos realizados, seguido de los análisis generales de los mismos.

4.1. Ensayos Experimentales Realizados

Pruebas Experimentales para el Mini Tubo de Calor Multiranurado

4.1.1. Ensayo Experimental N° 1

Este ensayo se realizó para una masa de fluido circulante de 1,501 g, lo que equivale a un volumen de llenado de metanol de 1,90 ml. La temperatura de operación para el ensayo es de 70 °C y la presión de operación 1,31 bar (131KPa). Los resultados y diferencia de temperatura obtenidos para el estudio realizado al mini tubo de calor en diferentes condiciones de temperatura, se reflejan en la tabla 4.1 y 4.2 respectivamente.

Tabla 4.1 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°1

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	31,3	0,09	20,7	0,05	69,4	65,1	56,9	55,7	65,4	62,0	49,3	21,6
70	33,3	0,11	21,9	0,06	74,8	70,0	60,9	59,2	69,7	65,0	47,6	21,7
75	35,2	0,12	23,0	0,06	81,4	74,8	65,5	63,0	75,2	68,6	49,0	22,1

**Tabla 4.2 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor
(Ensayo experimental N° 1)**

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
13,7	4,3	8,2	1,2
15,6	4,8	9,1	1,7
18,4	6,6	9,3	2,5

De los resultados generados por este ensayo, se obtuvieron los siguientes perfiles de temperatura, los cuales indican la clara diferencia de temperatura existente entre los extremos del mini tubo de calor. El comportamiento de los perfiles fue similar para las tres condiciones de temperatura estudiadas (mayor temperatura en el evaporador y menor temperatura en el condensador). Las diferencias de temperatura máxima y mínima entre los extremos fueron de 18,4 y 13,7 °C respectivamente. En la sección 3-4 (condensador) se obtuvo la menor diferencia de temperatura en el dispositivo, siendo la misma 1,2 °C y en la sección 2-3 (tramo adiabático) se obtuvo la mayor diferencia de temperatura, la cual fue 9,3 °C. En la figura 4.1 se pueden observar los perfiles de temperatura obtenidos.

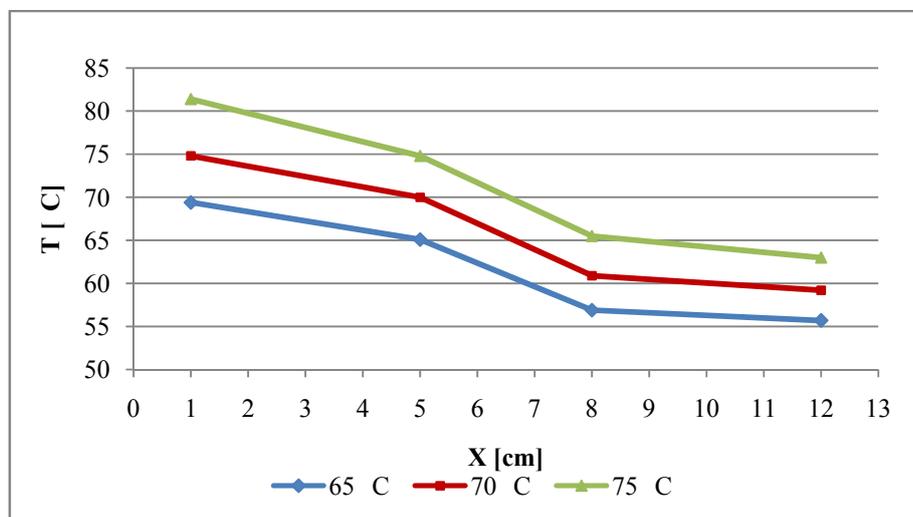


Figura 4.1 Perfiles de temperatura (Ensayo experimental N° 1)

4.1.2. Ensayo Experimental N° 2

Para este caso la masa de fluido circulante suministrada fue 2,062 g, lo que equivale a un volumen de fluido circulante de 2,61 ml. La temperatura de operación para el ensayo es de 70 °C y la presión de operación 1,31 bar (131KPa). Los resultados y diferencias de temperatura obtenidos para el estudio realizado al mini tubo de calor en diferentes condiciones de temperatura, se reflejan en la tabla 4.3 y 4.4 respectivamente. Para esta prueba, el mini tubo de calor se comportó de la misma manera que en la prueba anterior. Los perfiles de temperatura presentan las temperaturas más elevadas en el evaporador y disminuyen hacia el condensador, obteniéndose una diferencia máxima entre los extremos de 15 °C y la mínima fue 11,1 °C. En la

sección 1-2 se obtuvo la menor diferencia de temperatura (1,3 °C), mientras que en la sección 2-3 se registró la mayor diferencia para el dispositivo (10 °C). En la figura 4.2 se muestran los perfiles que resultaron de este ensayo.

Tabla 4.3 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°2

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	29,6	0,11	21,2	0,06	66,5	65,1	57,9	55,4	64,9	64,1	22,1	46,6
70	31,2	0,11	23,8	0,07	71,2	69,9	61,2	58,0	69,9	69,8	22,1	48,2
75	33,0	0,12	25,8	0,08	76,8	75,2	65,2	61,8	75,3	75,9	22,2	45,2

**Tabla 4.4 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor
(Ensayo experimental N° 2)**

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
11,1	1,4	7,2	2,5
13,2	1,3	8,7	3,2
15,0	1,6	10,0	3,4

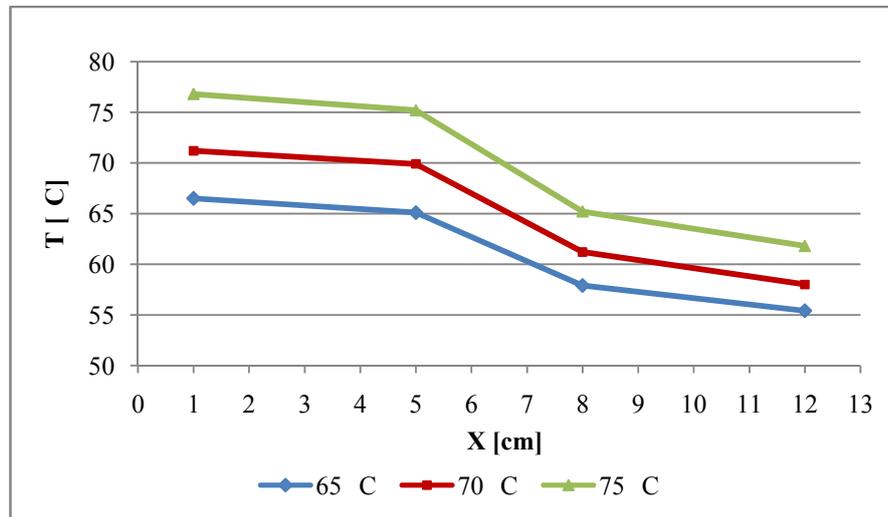


Figura 4.2 Perfiles de temperatura (Ensayo experimental N° 2)

4.1.3. Ensayo Experimental N° 3

Para esta prueba la masa de fluido circulante suministrada fue 2,631 g, lo que equivale a un volumen de llenado de metanol de 3,33 ml. La temperatura de operación para el ensayo es de 69,9 °C y la presión de operación 1,30 bar (130KPa). Los resultados y diferencias de temperatura obtenidos para el estudio realizado al mini tubo de calor en diferentes condiciones de temperatura, se reflejan en la tabla 4.5 y 4.6 respectivamente.

Tabla 4.5 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°3

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	34,0	0,11	17,6	0,05	73,2	65,1	61,6	59,4	65,2	65,3	22,4	48,2
70	35,4	0,12	19,6	0,05	76,0	70,2	62,0	61,1	69,9	70,3	22,2	49,0
75	36,5	0,13	21,3	0,06	80,6	74,9	65,0	64,1	75,0	76,1	22,2	48,7

**Tabla 4.6 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor
(Ensayo experimental N° 3)**

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
13,8	8,1	3,5	2,2
14,9	5,8	8,2	0,9
16,5	5,7	9,9	0,9

En este caso, las diferencias de temperatura disminuyeron para las tres condiciones de estudio, especialmente entre los puntos 3 y 4 en donde la diferencia fue de 0,9 °C para las pruebas a 70 y 75 °C. Entre los puntos 2 y 3 se obtuvo la mayor diferencia en el dispositivo, siendo la misma de 9,9 °C. Para los extremos del mini tubo, la diferencia máxima registrada fue de 16,5 °C y la mínima de 13,8 °C. En la figura 4.3 se muestran los perfiles de temperatura obtenidos para este ensayo.

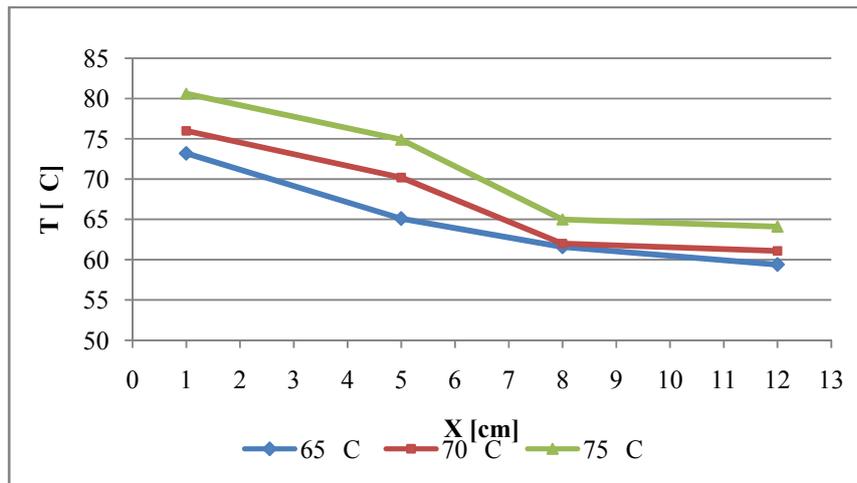


Figura 4.3 Perfiles de temperatura (Ensayo experimental N° 3)

Experimentos Realizados para el Mini Tubo de Calor Multiranurado con Malla de Fieltro

4.1.4. Ensayo Experimental N° 4

En esta prueba la masa de fluido circulan fue 0,751 g, equivalente a un volumen de llenado de metanol de 0,95 ml. La temperatura de operación para el ensayo es de 70 °C y la presión de operación 1,31 bar (131KPa). Los resultados y diferencias de temperatura obtenidos para el estudio realizado en las tres condiciones de temperatura, se reflejan en las tablas 4.7 y 4.8.

Tabla 4.7 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°4

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	30,0	0,09	22,0	0,06	68,2	65,0	54,0	53,0	64,8	68,0	23,6	53,0
70	32,0	0,11	23,4	0,06	72,1	69,9	58,4	56,2	69,6	73,5	24,8	46,3
75	34,3	0,12	25,0	0,07	77,2	75,0	62,6	60,1	74,6	79,4	23,9	51,6

**Tabla 4.8 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor
(Ensayo experimental N° 4)**

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
15,2	3,2	11,0	1,0
15,9	2,2	11,5	2,2
17,1	2,2	12,4	2,5

En esta prueba las diferencias de temperatura volvieron a ser mayores principalmente entre los puntos 2 y 3, obteniéndose la máxima para el ensayo realizado a 75 °C, la cual fue de 12,4 °C. Asimismo, entre los puntos 3 y 4 hubo menor diferencia de temperatura siendo la mínima 1 °C para el ensayo a 65 °C. Entre los extremos del dispositivo la diferencia máxima fue de 17,1 °C y la mínima fue de 15,2 °C .Esto se muestra en la figura 4.4.

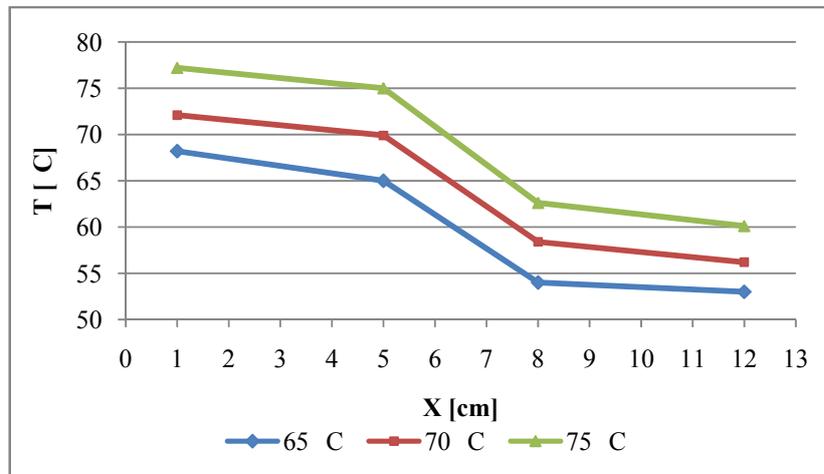


Figura 4.4 Perfiles de temperatura (Ensayo experimental N° 4)

4.1.5. Ensayo Experimental N° 5

Para esta prueba la masa de fluido circulante suministrada fue 1,501 g, lo que equivale a un volumen de llenado de metanol de 1,90 ml. La temperatura de operación para el ensayo es de 69,9 °C y la presión de operación 1,30 bar (130KPa). Los resultados y diferencias de

temperatura obtenidos para el estudio realizado al mini tubo de calor en diferentes condiciones de temperatura, se reflejan en la tabla 4.9 y 4.10 respectivamente.

Tabla 4.9 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°5

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	34,2	0,12	19,5	0,05	72,5	65,1	59,7	59,3	65,1	65,5	22,0	51,7
70	34,6	0,11	22,9	0,06	73,5	70,0	59,3	58,2	69,8	71,8	22,3	49,9
75	35,8	0,13	24,6	0,07	79,2	75,1	63,2	62,0	75,1	78,6	22,1	49,8

**Tabla 4.10 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor
(Ensayo experimental N° 5)**

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
13,2	7,4	5,4	0,4
15,3	3,5	10,7	1,1
17,2	4,1	11,9	1,2

Con respecto al ensayo N° 5, observamos que para la prueba realizada a 65 °C el valor del delta de temperatura obtenido para los puntos 3 y 4 es menor que para las pruebas a 70 °C y 75 °C siendo este valor 0,4 °C. En tal sentido, la prueba realizada a 65 °C logró una mejor distribución de temperatura que la prueba a 70 °C. En cambio, entre los puntos 2 y 3 se registró la mayor diferencia de temperatura para todos los ensayos. La diferencia mínima obtenida entre los extremos del mini tubo fue 13,2 °C y la máxima 17,2 °C, nuevamente se evidencia una amplia diferencia entre los extremos de un dispositivo de tamaño reducido. Esto se muestra en la figura 4.5.

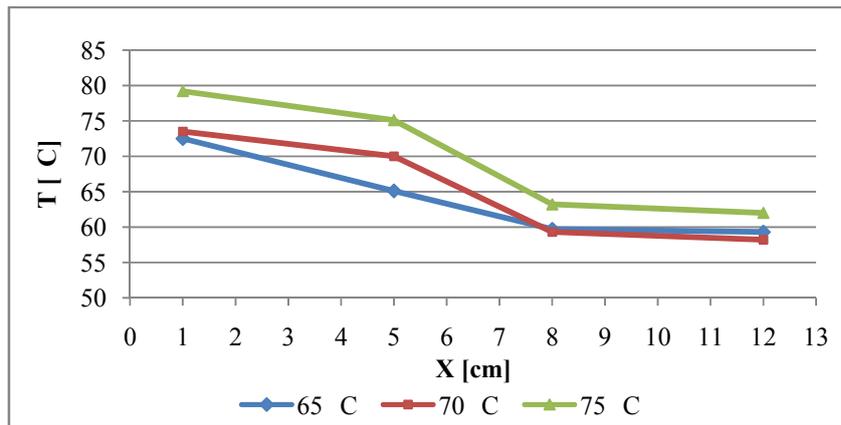


Figura 4.5 Perfiles de temperatura (Ensayo experimental N° 5)

Ensayos Experimentales Realizados al Mini Tubo de Calor Multiranurado con el Núcleo de Cobre

4.1.6. Ensayo Experimental N° 6

Para esta prueba la masa de fluido circulante suministrada fue 0,063 g, lo que equivale a un volumen de llenado de metanol de 0,08 ml. La temperatura de operación para el ensayo es de 70 °C y la presión de operación 1,31 bar (131KPa). Los resultados y las diferencias de temperatura obtenidos para el estudio realizado al dispositivo con la segunda modificación en la estructura capilar en diferentes condiciones de temperatura establecida, se reflejan en la tabla 4.11 y 4.12 respectivamente.

Tabla 4.11 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°6

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	30,6	0,09	19,8	0,05	66,0	65,1	55,1	52,9	65,3	67,6	23,1	51,2
70	33,5	0,11	20,3	0,05	71,2	69,9	59,7	57,2	70,1	72,3	22,4	55,2
75	35,3	0,12	23,3	0,06	78,1	75,2	66,5	64,9	74,9	76,2	23,9	51,6

**Tabla 4.12 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor
(Ensayo experimental N° 6)**

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
13,1	0,9	10,0	2,2
14,0	1,3	10,2	2,5
13,2	2,9	8,7	1,6

En la figura 4.6 se observan los perfiles de temperatura obtenidos para este ensayo, en los cuales la diferencia entre los extremos es superior a los 13 °C. En la sección 1-2 se obtuvo la menor diferencia de temperatura (0,9 °C), y en la sección 2-3 la mayor diferencia (10,2 °C).

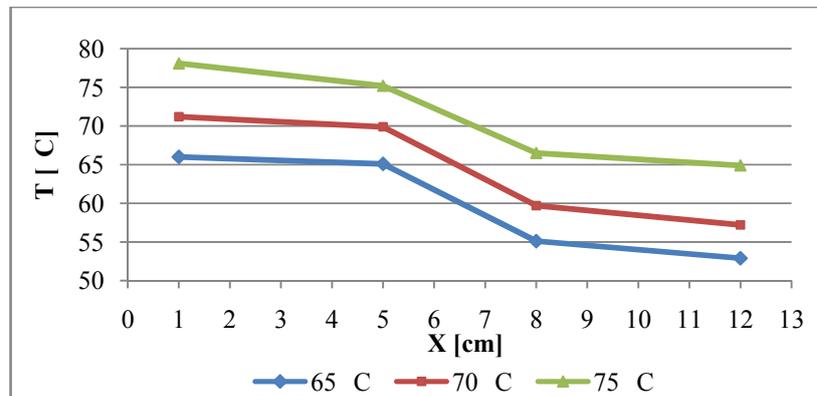


Figura 4.6 Perfiles de temperatura (Ensayo experimental N° 6)

4.1.7. Ensayo Experimental N° 7

Para este ensayo la masa de fluido circulante correspondiente es de 0,119 g, siendo el volumen equivalente de metanol cargado 0,15 ml. La temperatura de operación para el ensayo es de 70 °C y la presión de operación 1,31 bar (131KPa). Los resultados y las diferencias de temperatura obtenidos para el estudio realizado al mini tubo de calor con el núcleo de cobre para las diferentes condiciones de temperatura establecida, se reflejan en la tabla 4.13 y 4.14 respectivamente.

Tabla 4.13 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°7

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	34,2	0,12	19,5	0,05	72,5	65,1	59,7	59,3	65,1	65,5	23,9	51,6
70	34,6	0,11	22,9	0,06	73,5	70,0	59,3	58,2	69,8	71,8	21,9	51,2
75	35,8	0,13	24,6	0,07	79,2	75,1	63,2	62,0	75,1	78,6	22,4	54,6

**Tabla 4.14 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor
(Ensayo experimental N° 7)**

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
13,2	7,4	5,4	0,4
15,3	3,5	10,7	1,1
17,2	4,1	11,9	1,2

En este ensayo se logró una importante disminución en la diferencia de temperaturas entre los puntos 3 y 4, acercándose esa sección del dispositivo a la condición isotérmica. Sin embargo el resto del tubo mostró un comportamiento semejante a las pruebas experimentales anteriores, por lo que no se consiguió la activación del mismo. La diferencia máxima y mínima de temperatura entre los extremos del tubo fueron respectivamente: 17,2 y 13,2 °C. En la siguiente figura (figura 4.7) se muestran los perfiles de temperatura obtenidos para los ensayos del dispositivo a diferentes condiciones. También se observa en la figura que el cambio en la temperatura para la prueba a 65 °C, fue prácticamente en línea recta desde el punto 1 hasta el punto 3; en esta misma prueba se obtuvo la menor diferencia de temperaturas entre los puntos 3 y 4 de todas las pruebas realizadas, la cual fue 0,4 °C. La sección 2-3, fue la que registró la mayor diferencia de temperatura en todo el tubo, siendo esta 11,9 °C.

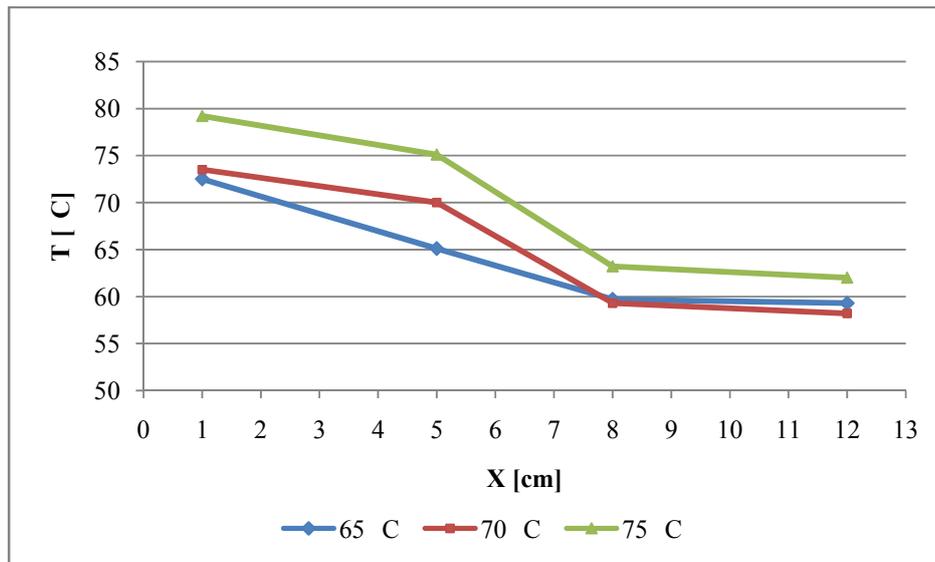


Figura 4.7 Perfiles de temperatura (Ensayo experimental N° 7)

4.1.8. Ensayo Experimental N ° 8

Para este ensayo la masa de fluido circulante correspondiente es de 0,158 g, siendo el volumen equivalente de metanol cargado 0,20 ml. La temperatura de operación para el ensayo es de 70 °C y la presión de operación 1,31 bar (131KPa). Los resultados y las diferencias de temperatura obtenidos para el estudio realizado al mini tubo de calor con la segunda modificación en la estructura capilar en diferentes condiciones de temperatura, se reflejan en la tabla 4.16 y 4.15 respectivamente.

Tabla 4.15 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°8

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	34,0	0,11	21,0	0,05	67,2	65,3	60,2	58,1	65,2	65,1	24,2	52,6
70	35,7	0,12	21,4	0,06	72,1	70,2	65,4	63,5	69,9	70,1	23,6	53,8
75	37,6	0,12	22,3	0,06	76,3	74,8	69,9	68,5	75,3	75,8	21,6	50,2

**Tabla 4.16 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor
(Ensayo experimental N° 8)**

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
9,1	1,9	5,1	2,1
8,6	1,9	4,8	1,9
7,8	1,5	4,9	1,4

Este ensayo, en líneas generales, fue en el que se obtuvieron los mejores resultados de todas las pruebas experimentales. Los perfiles de temperatura fueron los más lineales y se registró la menor diferencia de temperaturas entre los extremos del mini tubo de calor, la cual fue de 7,8 °C. A pesar de haberse conseguido que en el dispositivo disminuyeran las diferencias de temperatura, no se logró la activación del mismo porque aún sigue siendo una diferencia muy considerable para las dimensiones del dispositivo, lo cual puede apreciarse en la figura 4.8. En la sección 3-4 se obtuvo el menor delta de temperatura (1,4 °C), y en la sección 2-3 se obtuvo el mayor delta (5,1 °C).

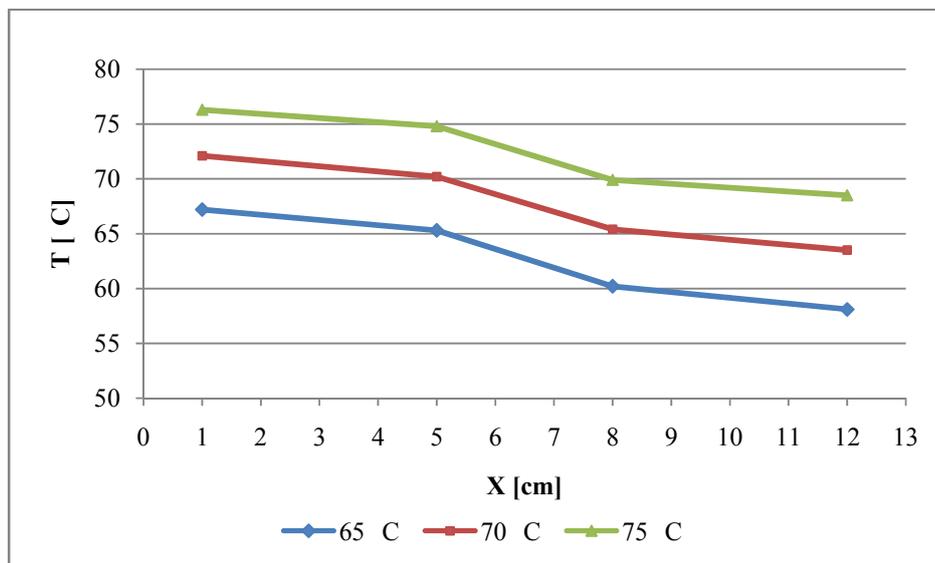


Figura 4.8 Perfiles de temperatura (Ensayo experimental N° 8)

4.1.9. Ensayo Experimental N° 9

Para esta prueba la masa de fluido circulante suministrada fue 0,237 g, lo que equivale a un volumen de llenado de metanol de 0,30 ml. La temperatura de operación para el ensayo es de 70,1 °C y la presión de operación 1,32 bar (132KPa). Los resultados y las diferencias de temperatura obtenidos para este último ensayo realizado al mini tubo de calor con la segunda modificación en la estructura capilar en diferentes condiciones de temperatura, se reflejan en la tabla 4.17 y 4.18 respectivamente.

Tabla 4.17 Resultados obtenidos en el ensayo experimental N°9

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	32,8	0,11	19,2	0,04	69,8	64,9	58,0	56,5	65,2	64,2	23,6	40,9
70	35,1	0,12	20,8	0,06	73,0	70,1	61,7	60,0	70,1	73,6	23,8	41,5
75	37,5	0,12	22,0	0,06	82,8	75,0	65,6	64,2	75,3	79,8	23,4	41,5

**Tabla 4.18 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor
(Ensayo experimental N° 9)**

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
13,3	4,9	6,9	1,5
13,0	2,9	8,4	1,7
18,6	7,8	9,4	1,4

Esta prueba arrojó resultados intermedios entre los resultados obtenidos en todos los ensayos realizados. Los perfiles de temperatura nos muestran la misma forma observada en todas las pruebas del mini tubo de calor. La máxima diferencia entre los extremos se produjo en la prueba a 75 °C, la cual fue de 18,6 °C; y la mínima en la prueba a 70 °C, siendo esta 13 °C. Con estos valores se demuestra nuevamente la aleatoriedad en el comportamiento de los resultados obtenidos a lo largo del estudio experimental. En la sección 3-4 se obtuvo la menor diferencia (1,4 °C), y en la sección 2-3 se obtuvo la mayor diferencia (9,4 °C). En la figura 4.9 se muestran los perfiles de temperatura resultantes de este ensayo.

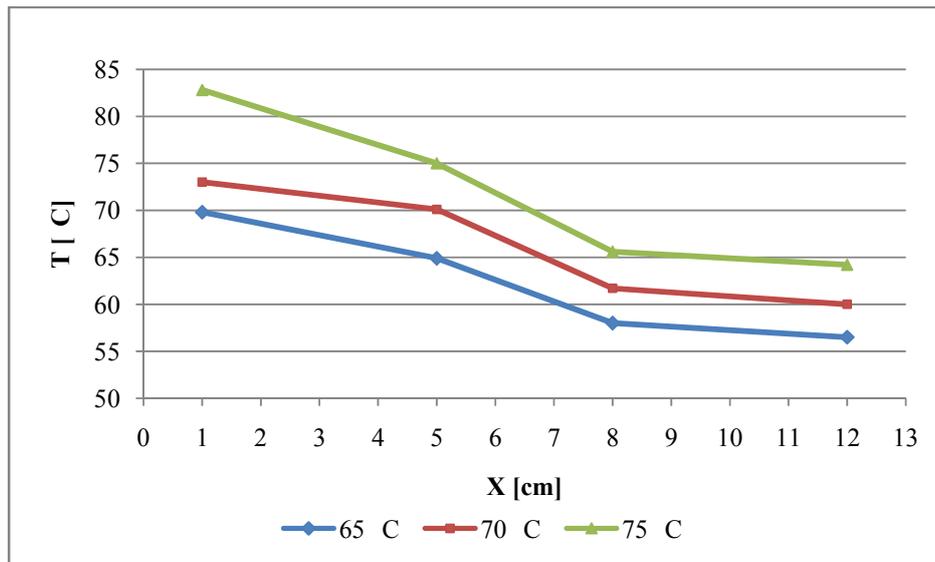


Figura 4.9 Perfiles de temperatura (Ensayo experimental N° 9)

4.2. Cálculo de las Tasas de Flujo de Calor:

En esta sección del capítulo se mostrará de manera detallada como se hicieron los cálculos correspondientes al ensayo experimental N° 1, luego se presentará los resultados para todos los ensayos experimentales.

4.2.1 Tasa de flujo de calor en el evaporador

Esta es la tasa de flujo de calor suministrada por el calentador principal al evaporador.

$$q_e = V_{cp}[V] \times I_{cp}[A] = q_e [W]$$

$$q_e = 31,3V \times 0,09A = 2,817 W$$

4.2.2 Tasa de Flujo de Calor en el Tramo Adiabático

Se calculará despreciando los efectos convectivos que puedan existir en esta región, es decir, se considera que todo el calor que se suministra en el evaporador es conducido a través de este tramo hacia el condensador.

$$q_{taK} = \frac{K_{cobre}[W/mK] \times A_{solido} [m^2]}{L_{ta}[m]} (T2 - T3)[K] = q_{ta} [W]$$

Para determinar el área del sólido, se le resta al área total del dispositivo el área de la sección transversal anular del tubo:

$$A_{sólido} = A_t - A_{st}$$

$$A_t = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (10mm^2) = 78,5398 mm^2$$

$$A_{sólido} = 78,5398 mm^2 - 47,5223mm^2 = 31,0175mm^2$$

$$A_{sólido} = 31,0175 \times 10^{-6}m^2$$

La conductividad térmica del cobre se determina a la temperatura media a la cual se encuentra la sección:

$$K_{cobre} = 396,86 W/mK$$

$$L_{ta} = 0,03m$$

Sustituyendo todos los datos en la ecuación que representa la ley de Fourier, obtenemos la tasa de flujo de calor conducida en el tramo adiabático:

$$q_{taK} = \frac{396,86 W/mK \times 31,0175 \times 10^{-6}m^2}{0,03m} (338,1K - 329,9K) = 2,522W$$

4.2.3 Tasa de flujo de Calor en el Condensador

Es la tasa de flujo de calor total convectada por el condensador al medio ambiente.

$$q_c = h_c A_c (T_s - T_\infty)$$

donde:

$$A_c = \pi D L_c = \pi (0,01m) 0,04m = 1,26 \times 10^{-3}m^2$$

$$T_s = \frac{T3 + T4}{2} = \frac{329,9K + 328,7K}{2} = 329,3K$$

Para determinar el coeficiente convectivo, utilizaremos la correlación empírica de Churchill y Chu:

$$\bar{N}_{U_D} = \left[0,6 + \frac{0,387 R_{a_D}^{1/6}}{(1 + (0,559/P_r)^{9/16})^{8/27}} \right]^2 \quad R_{a_D} \leq 10^{12}$$

$$R_{a_D} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu\alpha}$$

$$P_r = \frac{\nu}{\alpha}$$

Las propiedades del aire se determinan a la temperatura de película T_f :

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{329,3K + 294,6K}{2} = 311,95K$$

$\beta [K^{-1}]$	$\nu [m^2/s]$	$\alpha [m^2/s]$	$K_{aire} [W/mK]$
3,21E-03	1,71E-05	2,43E-05	2,72E-02

$$R_{a_D} = \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \times 3,21E-03 K^{-1} (329,3K - 294,6K) (0,01m)^3}{1,71E-05 \text{ m}^2/s \times 2,43E-05 \text{ m}^2/s} = 2628,0198$$

$$P_r = \frac{1,71E-05 \text{ m}^2/s}{2,43E-05 \text{ m}^2/s} = 0,7043$$

$$\bar{N}_{U_D} = \left[0,6 + \frac{0,387 (2628,0198)^{1/6}}{(1 + (0,559/0,7043)^{9/16})^{8/27}} \right]^2 = 3,2139$$

$$\bar{N}_{U_D} = \frac{h_c D}{K_{aire}} \Rightarrow h_c = \frac{\bar{N}_{U_D} K_{aire}}{D}$$

$$h_c = \frac{3,2139 \times 2,72E - 02 \text{ W/mK}}{0,01m} = 8,7368 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sustituyendo los datos en la ecuación de la Ley de Newton del Enfriamiento:

$$q_c = 8,7368 \text{ W/m}^2\text{K} \times 1,26 \times 10^{-3} \text{ m}^2 (329,3\text{K} - 294,6\text{K}) = 3,810 \text{ W}$$

Debido a que las tasas de flujo de calor no son iguales en las tres secciones del dispositivo, está existiendo otro mecanismo de transferencia de calor además de la conducción dentro del dispositivo. Por este motivo, se calculará la tasa de flujo de calor por convección en el tramo adiabático:

$$q_{ta} = q_{ta_k} + q_{ta_h}$$

$$q_{ta_k} = \frac{K_{cobre} \times A_{solido}}{L_{ta}} (T_2 - T_3)$$

$$q_{ta_h} = q_c - q_{ta_k}$$

$$q_{ta_h} = 3,810\text{W} - 2,522\text{W} = 1,287\text{W}$$

De las diferencias obtenidas en los resultados de las tasas de flujo de calor en las tres secciones del dispositivo, considerando tanto la conducción como la convección como mecanismos de transferencia de calor, se considera que dentro del mini tubo está ocurriendo alguna limitación operativa que impide su adecuado funcionamiento.

4.3. Estudio de las Limitaciones Operativas del Mini Tubo de Calor

4.3.1. Límite Capilar

$$q_{m\acute{a}x} = \left[\frac{\rho_l \sigma_l \lambda}{\mu_l} \right] \left[\frac{k A_m}{L} \right] \left[\frac{2}{r_e} - \frac{\rho_l g L}{\sigma_l} \text{sen} \phi \right]$$

donde A_m es el área de la mecha (área de la sección transversal de la ranura triangular, multiplicada por 16 ranuras):

$$A_m = 1,06 \times 10^{-5} m^2$$

Como el mini tubo de calor se encuentra en posición horizontal, $\text{sen}\phi = 0$.

$$q_{m\acute{a}x} = \left[\frac{746,20 \text{ Kg}/m^3 \times 0,0185 \text{ N}/m \times 1085 \times 10^3 \text{ J}/\text{Kg}}{0,0314 \text{ Kg}/m.s} \right] \left[\frac{8,4 \times 10^{-10} m^2 \times 1,6 \times 10^{-5} m^2}{0,11 m} \right] \left[\frac{2}{0,0045 m} \right]$$

$$q_{m\acute{a}x} = 0,0172 W$$

4.3.2. Límite Sónico

$$q_{m\acute{a}x} = 0,474 \lambda (\rho_v P_v)^{1/2}$$

$$q_{m\acute{a}x} = 0,474 \times 1085 \times 10^3 \text{ J}/\text{Kg} \left(1,40 \text{ Kg}/m^3 \times 131 \text{ KPa} \right) = 220,246 W$$

4.3.3. Límite Viscoso

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{r_v^2 \lambda \rho_v P_v}{16 \mu_v L}$$

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{(0,0035 m)^2 \times 1085 \times 10^3 \text{ J}/\text{Kg} \times 1,40 \text{ Kg}/m^3 \times 131 \text{ KPa}}{16 \times 0,0314 \text{ Kg}/m.s \times 0,11 m} = 12,478 MW$$

4.3.4. Límite de Arrastre

$$q_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{2 \pi \rho_v \lambda^2 \sigma_l}{z}}$$

Para determinar el factor geométrico z , utilizamos el número de Weber:

$$W_e = \frac{\rho_v v^2 z}{\sigma_l}$$

El límite sónico ocurre cuando el número de Weber es igual a 1.

$$\frac{\rho_v v^2 z}{\sigma_l} = 1 \Rightarrow z = \frac{\sigma_l}{\rho_v v^2}$$

Para determinar la velocidad del vapor v , hacemos un balance de energía entre los extremos del tramo adiabático. Se considera a la temperatura de estancamiento T_o igual a la temperatura de operación del dispositivo:

$$C_p T_2 + \frac{v_2^2}{2} = C_p T_o$$

$$v_2 = \sqrt{2C_p(T_o - T_2)}$$

$$v_2 = \sqrt{2 \times 1,4050 \text{ KJ/KgK} (343 - 338,1) \text{ K}} = 3,71 \text{ m/s}$$

Con la velocidad del vapor podemos calcular el factor geométrico:

$$z = \frac{0,0185 \text{ N/m}}{1,40 \text{ Kg/m}^3 (3,71 \text{ m/s})^2} = 9,60 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$q_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{2\pi \times 1,40 \text{ Kg/m}^3 (1085 \times 10^3 \text{ Nm/Kg})^2 0,0185 \text{ N/m}}{9,60 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}}} = 14,129 \text{ MW}$$

4.3.5. Límite de Ebullición o Calentamiento

$$q_{\text{máx}} = \frac{j N^2 X^4}{8\pi} \left[\frac{\rho_v \lambda \sigma_l}{\mu_v M} \right] \frac{1}{N^3 d_g^2 r_c}$$

$$j = \frac{P_v}{2\sigma_l/r_c} = \frac{131 \text{ KPa}}{2 \times 0,0185 \text{ N/m} / 0,0045 \text{ m}} = 15931,432$$

$$X = \frac{\cos\left(\psi/2\right)}{1 + \operatorname{sen}\left(\psi/2\right)} = \frac{\cos(30)}{1 + \operatorname{sen}(30)} = 0,577$$

$$q_{\max} = \frac{15931,432(565,88)^2 \times 0,577}{8\pi} \left[\frac{1,40 \operatorname{Kg}/\operatorname{m}^3 \times 1085 \times 10^3 \operatorname{Nm}/\operatorname{Kg} \times 0,0185 \operatorname{N}/\operatorname{m}}{0,0314 \operatorname{Kg}/\operatorname{ms} \times 32 \operatorname{Kg}/\operatorname{Kmol}} \right] \frac{1}{(565,88)^3 (0,009\operatorname{m})^2 0,0045\operatorname{m}}$$

$$q_{\max} = 2695,126 \operatorname{MW}$$

4.4. Resultados de las Tasas de Flujo de Calor y las Limitaciones Operativas

4.4.1. Ensayo Experimental N° 1

En las tablas 4.19 a 4.21 se muestran los resultados obtenidos de las tasas de flujo de calor y las limitaciones operativas para el ensayo.

Tabla 4.19 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°1 (conducción pura)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_c [W]$
2,817	2,522	3,810
3,663	2,796	4,300
4,224	2,853	4,819

Tabla 4.20 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°1 (conducción y convección)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_{ta_h} [W]$	$q_c [W]$
2,817	2,522	1,287	3,810
3,663	2,796	1,504	4,300
4,224	2,853	1,966	4,819

Tabla 4.21 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 1

<i>Límite Capilar</i>	<i>Límite Sónico</i>	<i>Límite Viscoso</i>	<i>Límite de Arrastre</i>	<i>Límite de Calentamiento</i>
$q_{m\acute{a}x}[W]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$
0,017	220,246	12,478	14,129	2695,126

4.4.2. Ensayo Experimental N° 2

En las tablas 4.22 a 4.24 se muestran los resultados obtenidos de las tasas de flujo de calor y las limitaciones operativas para el ensayo.

Tabla 4.22 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°2 (conducción pura)

$q_e[W]$	$q_{ta_k}[W]$	$q_c[W]$
3,256	2,214	3,789
3,432	2,673	4,183
3,960	3,068	4,701

Tabla 4.23 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°2 (conducción y convección)

$q_e[W]$	$q_{ta_k}[W]$	$q_{ta_h}[W]$	$q_c[W]$
3,256	2,214	1,574	3,256
3,432	2,673	1,511	3,432
3,960	3,068	1,634	3,960

Tabla 4.24 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 2

<i>Límite Capilar</i>	<i>Límite Sónico</i>	<i>Límite Viscoso</i>	<i>Límite de Arrastre</i>	<i>Límite de Calentamiento</i>
$q_{m\acute{a}x}[W]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$
0,017	220,246	12,478	14,129	2695,126

4.4.3. Ensayo Experimental N° 3

En las tablas 4.25 a 4.27 se muestran los resultados obtenidos de las tasas de flujo de calor y las limitaciones operativas para el ensayo.

Tabla 4.25 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°3 (conducción pura)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_c [W]$
3,740	1,076	4,264
4,248	2,519	4,434
4,745	3,037	4,846

Tabla 4.26 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°3 (conducción y convección)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_{ta_h} [W]$	$q_c [W]$
3,740	1,076	3,188	3,740
4,248	2,519	1,916	4,248
4,745	3,037	1,809	4,745

Tabla 4.27 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 2

Límite Capilar	Límite Sónico	Límite Viscoso	Límite de Arrastre	Límite de Calentamiento
$q_{m\acute{a}x} [W]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$
0,015	218,600	12,294	13,812	2655,507

4.4.4. Ensayo Experimental N° 4

En las tablas 4.28 a 4.30 se muestran los resultados obtenidos de las tasas de flujo de calor y las limitaciones operativas para el ensayo.

Tabla 4.28 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°4 (conducción pura)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_c [W]$
2,700	2,584	3,345
3,520	3,226	3,578
4,116	3,805	4,172

Tabla 4.29 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°4 (conducción y convección)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_{ta_n} [W]$	$q_c [W]$
2,700	2,584	0,761	2,700
3,520	3,226	0,351	3,520
4,116	3,805	0,366	4,116

Tabla 4.30 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 4

Límite Capilar	Límite Sónico	Límite Viscoso	Límite de Arrastre	Límite de Calentamiento
$q_{m\acute{a}x} [W]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$
0,017	220,246	12,478	14,129	2695,126

4.4.5. Ensayo Experimental N° 5

En las tablas 4.31 a 4.33 se muestran los resultados obtenidos de las tasas de flujo de calor y las limitaciones operativas para el ensayo.

Tabla 4.31 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°5 (conducción pura)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_c [W]$
4,104	1,660	4,184
3,806	3,288	4,042
4,654	3,652	4,592

Tabla 4.32 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°5 (conducción y convección)

$q_e[W]$	$q_{ta_k}[W]$	$q_{ta_h}[W]$	$q_c[W]$
4,104	1,660	2,523	4,104
3,806	3,288	0,754	3,806
4,654	3,652	0,940	4,654

Tabla 4.33 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 5

Límite Capilar	Límite Sónico	Límite Viscoso	Límite de Arrastre	Límite de Calentamiento
$q_{m\acute{a}x}[W]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$
0,015	218,600	12,294	13,812	2655,507

4.4.6. Ensayo Experimental N° 6

En las tablas 4.34 a 4.36 se muestran los resultados obtenidos de las tasas de flujo de calor y las limitaciones operativas para el ensayo.

Tabla 4.34 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°6 (conducción pura)

$q_e[W]$	$q_{ta_k}[W]$	$q_c[W]$
2,754	2,584	3,411
3,685	3,134	3,988
4,236	2,668	4,765

Tabla 4.35 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°6 (conducción y convección)

$q_e[W]$	$q_{ta_k}[W]$	$q_{ta_h}[W]$	$q_c[W]$
2,754	2,584	0,827	2,754
3,685	3,134	0,854	3,685
4,236	2,668	2,097	4,236

Tabla 4.36 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 6

<i>Límite Capilar</i>	<i>Límite Sónico</i>	<i>Límite Viscoso</i>	<i>Límite de Arrastre</i>	<i>Límite de Calentamiento</i>
$q_{m\acute{a}x}[W]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$
0,017	220,246	12,478	14,129	2695,126

4.4.7. Ensayo Experimental N° 7

En las tablas 4.37 a 4.39 se muestran los resultados obtenidos de las tasas de flujo de calor y las limitaciones operativas para el ensayo.

Tabla 4.37 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°7 (conducción pura)

$q_e[W]$	$q_{ta_k}[W]$	$q_c[W]$
4,104	1,660	3,924
3,806	3,288	4,096
4,654	3,652	4,550

Tabla 4.38 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°7 (conducción y convección)

$q_e[W]$	$q_{ta_k}[W]$	$q_{ta_h}[W]$	$q_c[W]$
4,104	1,660	2,263	4,104
3,806	3,288	0,809	3,806
4,654	3,652	0,898	4,654

Tabla 4.39 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 7

<i>Límite Capilar</i>	<i>Límite Sónico</i>	<i>Límite Viscoso</i>	<i>Límite de Arrastre</i>	<i>Límite de Calentamiento</i>
$q_{m\acute{a}x}[W]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$	$q_{m\acute{a}x}[MW]$
0,017	220,246	12,478	14,129	2695,126

4.4.8. Ensayo Experimental N° 8

En las tablas 4.40 a 4.42 se muestran los resultados obtenidos de las tasas de flujo de calor y las limitaciones operativas para el ensayo.

Tabla 4.40 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°8 (conducción pura)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_c [W]$
3,740	1,568	3,836
4,284	1,474	4,635
4,512	1,502	5,584

Tabla 4.41 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°8 (conducción y convección)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_{ta_h} [W]$	$q_c [W]$
3,740	1,568	2,268	3,740
4,284	1,474	3,162	4,284
4,512	1,502	4,082	4,512

Tabla 4.42 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 8

Límite Capilar	Límite Sónico	Límite Viscoso	Límite de Arrastre	Límite de Calentamiento
$q_{m\acute{a}x} [W]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$
0,017	220,246	12,478	14,129	2695,126

4.4.9. Ensayo Experimental N° 9

En las tablas 4.43 a 4.45 se muestran los resultados obtenidos de las tasas de flujo de calor y las limitaciones operativas para el ensayo.

Tabla 4.43 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°9 (conducción pura)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_c [W]$
3,608	2,122	3,666
4,212	2,580	4,118
4,500	2,883	4,725

Tabla 4.44 Tasas de flujo de calor obtenidas en el Ensayo Experimental N°9 (conducción y convección)

$q_e [W]$	$q_{ta_k} [W]$	$q_{ta_n} [W]$	$q_c [W]$
3,608	2,122	1,544	3,608
4,212	2,580	1,538	4,212
4,500	2,883	1,842	4,500

Tabla 4.45 Resultados de los límites de operación del ensayo experimental N° 9

Límite Capilar	Límite Sónico	Límite Viscoso	Límite de Arrastre	Límite de Calentamiento
$q_{m\acute{a}x} [W]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$	$q_{m\acute{a}x} [MW]$
0,020	221,890	12,662	14,729	2735,004

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis General de Resultados Experimentales

En general, según se puede observar en los perfiles de temperatura obtenidos en las pruebas experimentales, la diferencia de temperaturas entre los extremos del mini tubo de calor es muy amplia para las dimensiones del dispositivo estudiado, siendo la mayor diferencia registrada 20,2 °C (Ensayo N° 6 a 75 °C) y la menor diferencia 7,8 °C (Ensayo N° 10 a 75 °C).

Con las modificaciones propuestas a la estructura capilar, se logró disminuir la diferencia de temperaturas entre los puntos 3 y 4, especialmente con el corazón de cobre dentro del mini tubo de calor. Así mismo, con esta modificación, la diferencia de temperatura a lo largo de la longitud del tubo disminuyó con relación a las dos configuraciones iniciales.

En las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 podemos apreciar la variación en las diferencias de temperatura para todas pruebas realizadas a una misma temperatura. En éstas gráficas se encontró que la variación en las diferencia de temperatura se comporta de manera aleatoria, dependiendo de la masa de fluido circulante cargado, la configuración de la estructura capilar y la temperatura de estudio establecida. Para las tres condiciones de temperatura estudiadas, el ensayo N° 10 presenta las menores diferencias de temperatura generales para todas las secciones del mini tubo de calor, significando esto que para esas condiciones de estudio, la reducción del área de la sección transversal del dispositivo trajo como consecuencia un incremento de la circulación del fluido de operación y por ende un aumento en la transferencia de calor, aunque no se logró alcanzar la presión capilar necesaria para el funcionamiento del mini tubo de calor.

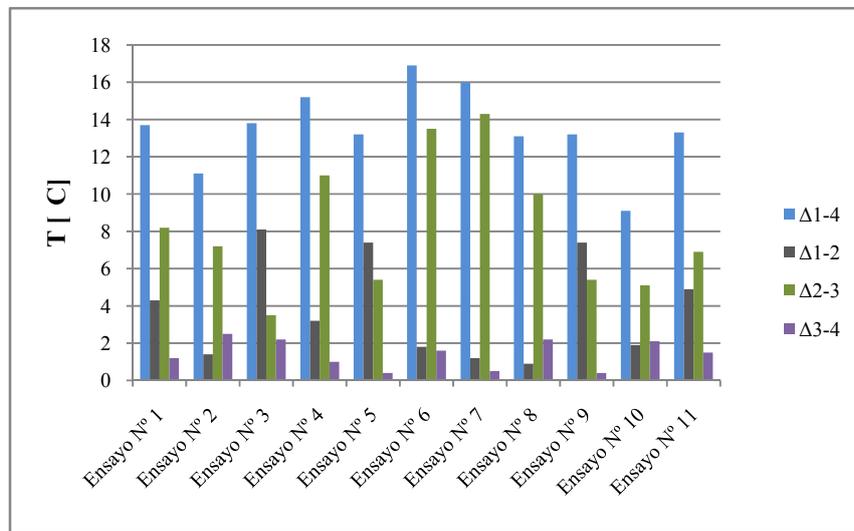


Figura 5.1 Variación de las diferencias de temperatura para los ensayos realizados a 65 °C

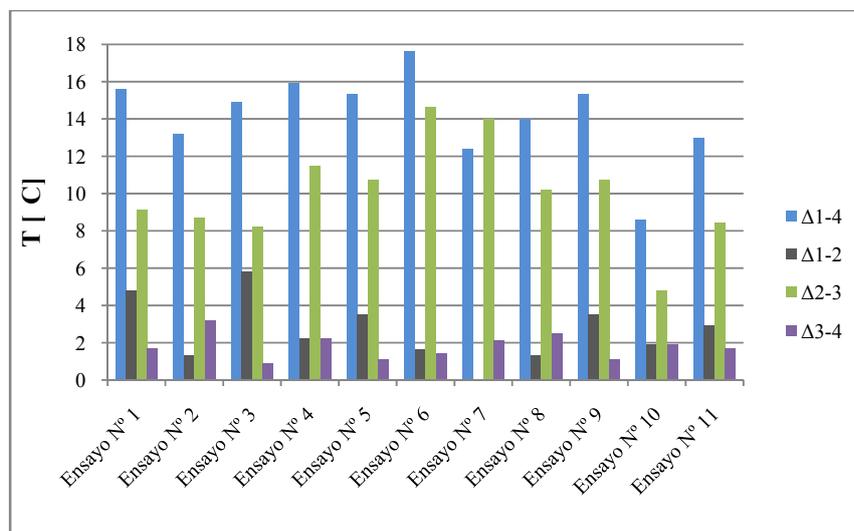


Figura 5.2 Variación de las diferencias de temperatura para los ensayos realizados a 70 °C

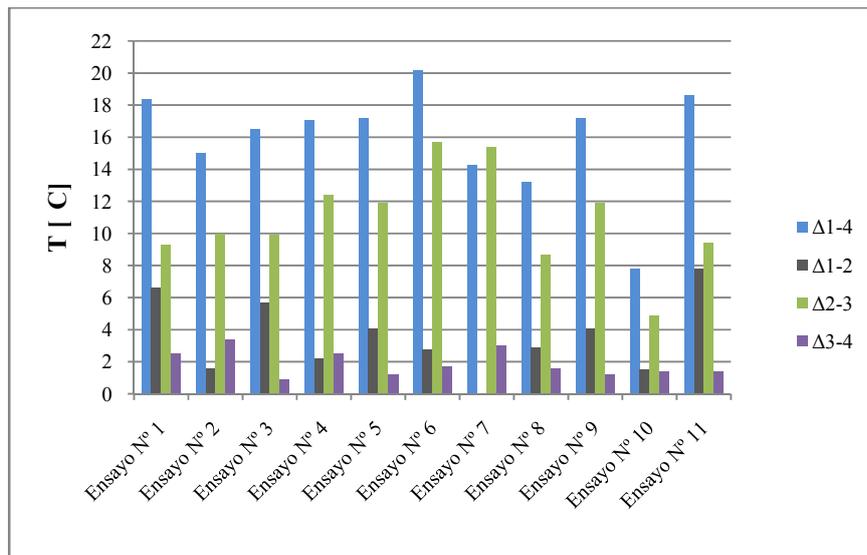


Figura 5.3 Variación de las diferencias de temperatura para los ensayos realizados a 75 °C

5.2. Análisis de la Influencia de las Condiciones Ambientales

Las figuras 4.15 y 4.16, reflejan la variación de las condiciones ambientales en el entorno del banco de prueba, observándose que la temperatura ambiental se mantuvo estable con valores entre 21,5 y 25 °C. La humedad relativa también se comportó de manera estable con valores entre 40% y 55%. Esto se logró realizando los estudios experimentales en un ambiente controlado con aire acondicionado y realizando las pruebas en el mismo horario. Aunque las variaciones no fueron tan elevadas, éstas ocasionaron cambios en los valores de las temperaturas, teniendo que hacer continuos ajustes a los potenciómetros durante la realización de todo el ensayo para poder alcanzar y estabilizar la temperatura de estudio deseada.

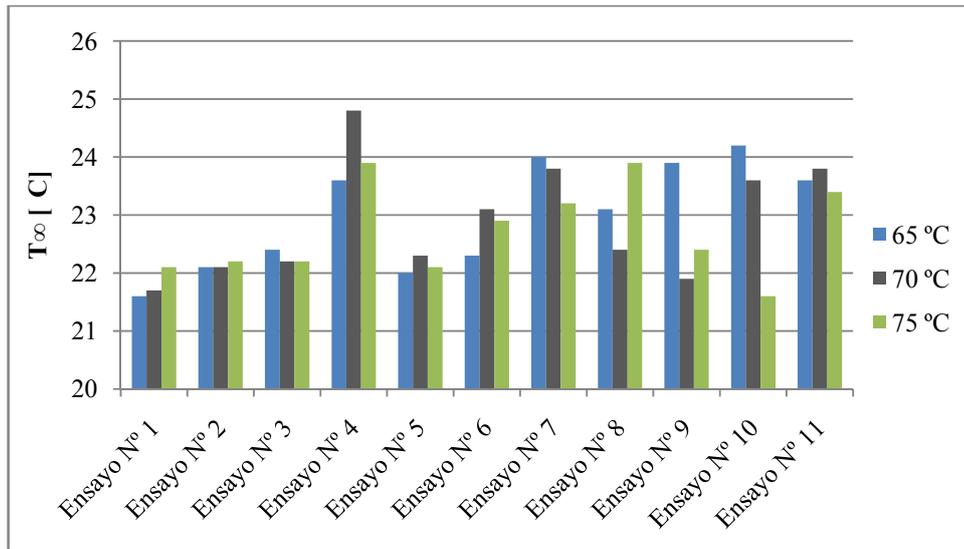


Figura 5.4 Variación de la temperatura ambiental durante el tiempo en que se realizaron los ensayos experimentales

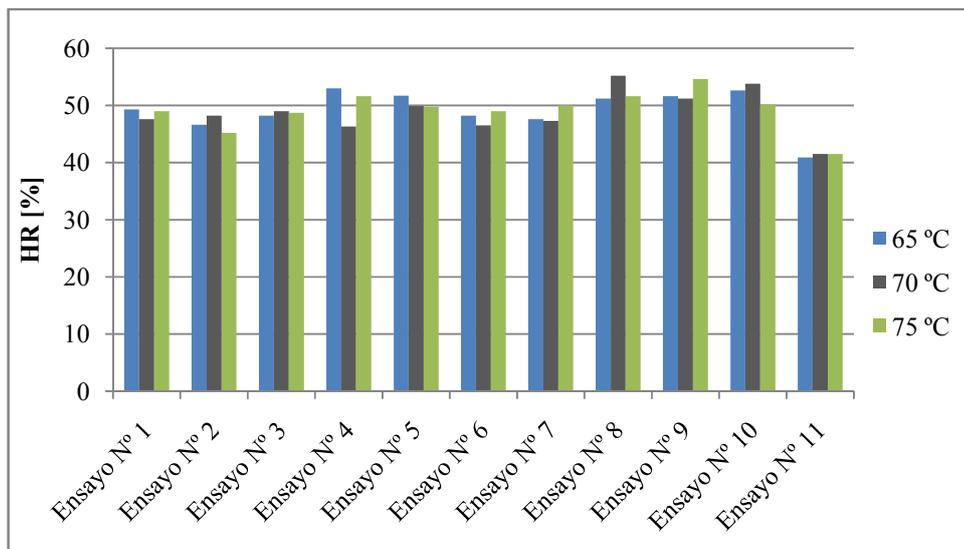


Figura 5.5 Variación de la humedad relativa durante el tiempo en que se realizaron los ensayos experimentales

5.3. Análisis de las Condiciones en los Potenciómetros

La figura 4.17 muestra las variaciones de voltaje que se presentaron en los calentadores principal y de resguardo durante la realización de las pruebas experimentales. Las variaciones en la línea de alimentación de la universidad, se deben en gran medida a la cantidad de máquinas, sistemas de iluminación y de artefactos existentes; si a esto sumamos la antigüedad de los transformadores y equipos eléctricos, es considerable que estas variaciones de voltaje se produzcan.

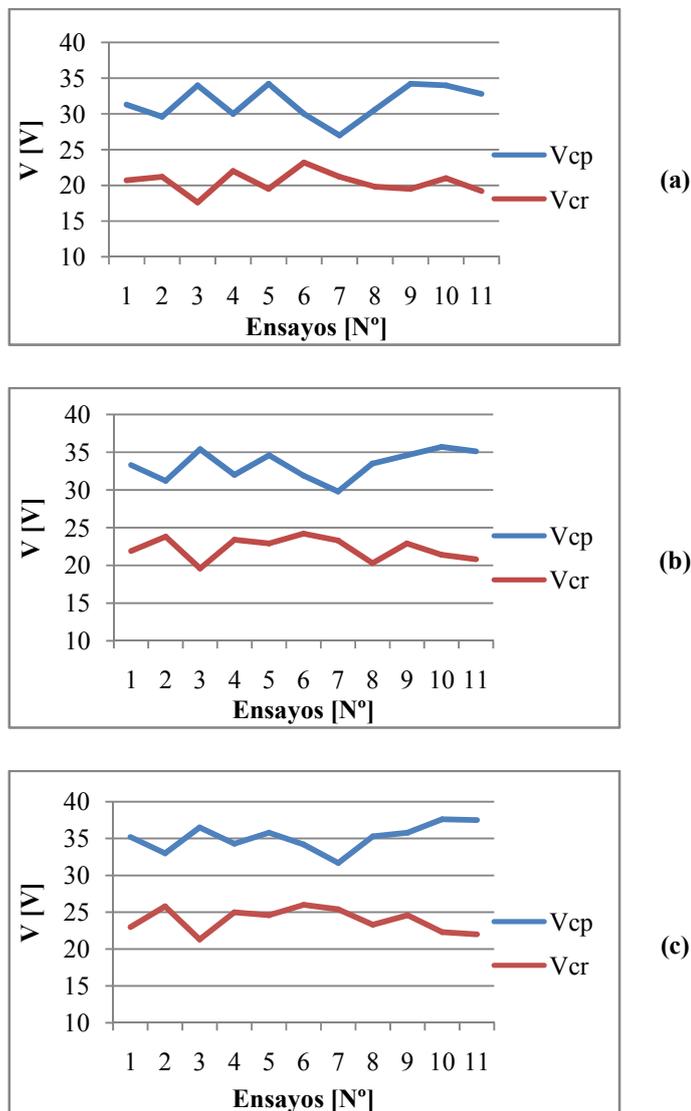


Figura 4.17 Variación del voltaje en los calentadores: (a) 65 °C, (b) 70 °C y (c) 75 °C

Las variaciones de la tensión durante el desarrollo de las pruebas, ocasionaba que los valores de voltaje suministrados a los potenciómetros para alcanzar las temperaturas de estudio no fueran constantes a lo largo de todos los ensayos.

Además, es importante destacar que la duración de las pruebas experimentales se prolongaba debido a esta variación, es decir, el tiempo para alcanzar la condición de régimen permanente en el mini tubo de calor era mayor. La duración prolongada de los ensayos, hacía que el dispositivo también estuviera sometido a los efectos del cambio de las condiciones ambientales, debido a que las pruebas se iniciaban en la mañana y culminaban al medio día, provocando un aumento en la temperatura y un decremento en la humedad relativa.

5.4. Análisis por Grupo de Ensayos Experimentales

5.4.1. Estructura Capilar Multiranurada (Ensayos del 1 al 3)

- Para esta estructura capilar, se obtuvieron grandes diferencias de temperatura entre los extremos del mini tubo de calor.
- De las diferencias de temperatura obtenidas para las tres secciones del tubo, se reflejó el máximo valor en el tramo adiabático y el mínimo valor en el condensador.
- Los perfiles de temperatura obtenidos en este conjunto de ensayos experimentales, se comportaron de manera semejante, registrándose las mayores temperaturas en el evaporador y las menores temperaturas en el condensador. Estos perfiles no se comportaron de manera isotérmica.

5.4.2. Estructura Capilar Multiranurada con la Malla de Filtro (Ensayos del 4 y 5)

- Al igual que en la estructura inicial, se observaron grandes diferencias de temperatura entre los extremos del mini tubo de calor.
- En la sección 3-4 (condensador), se obtuvo la menor diferencia de temperatura, mientras que en la sección 2-3 (tramo adiabático) se reportó la mayor diferencia de temperatura.

- En los perfiles de temperatura obtenidos para este grupo de ensayos, se observaron nuevamente las temperaturas más elevadas en el evaporador y las más bajas en el condensador, con una marcada diferencia entre las dos zonas, es decir, la linealidad horizontal que se esperaba obtener en los perfiles no se logró.

5.4.3. Estructura Capilar Multiranurada con el Núcleo de Cobre (Ensayos del 6 al 9)

- Con esta estructura capilar, aunque en uno de los ensayos disminuyó apreciablemente la diferencia de temperatura entre los extremos del tubo, no obstante, esta diferencia sigue siendo considerable para las dimensiones del dispositivo.
- De las diferencias de temperatura obtenida entre las distintas secciones del tubo, en la sección correspondiente al condensador, se obtuvo la menor diferencia; y en la sección correspondiente al tramo adiabático se obtuvo la mayor diferencia.
- En los perfiles de temperatura resultantes para este conjunto de ensayos, se aprecia claramente la diferencia de temperaturas.

5.5. Síntesis de Resultados

5.5.1. Del sistema de Llenado

- Las fugas e infiltraciones existentes en el sistema de llenado, las cuales, en algunas secciones del sistema no pudieron ser selladas en su totalidad, ocasionaron retardos en la realización del llenado del mini tubo de calor con la masa de fluido circulante. Además de aumentaron la fuente de errores en el ensayo experimental.
- La flexibilidad de las tuberías de cobre del sistema de llenado, así como su diámetro reducido, dificultaban la posibilidad de sellar completamente las fugas e infiltraciones, debido a que no se podían ajustar en demasía las uniones por el riesgo de ruptura o doblez de las tuberías.
- La necesidad de utilizar nitrógeno líquido como agente congelante en el proceso de llenado, condicionaba la realización del proceso a la existencia de este en las plantas criogénicas.

5.5.2. Del Montaje Experimental

- La forma en espiral de los calentadores, debido a que tiende a unirse, dificultaba su distribución uniforme sobre la superficie en donde se iba a colocar. En este sentido, no se puede garantizar el suministro de una tasa de flujo de calor uniforme en el evaporador del mini tubo de calor.
- La tapa de aislante térmico colocada en el extremo del evaporador, provocó el incremento de la temperatura en el punto 1, debido a que en ese punto, el tubo tiene menor libertad para rechazar calor. Este incremento de temperatura se vio reflejado en los perfiles obtenidos.
- La inestabilidad en la tensión de la línea de alimentación, ocasionó la realización de ajustes en los valores de voltaje suministrados a los potenciómetros.
- La duración de las pruebas experimentales fue prolongada, debido a los ajustes continuos en los potenciómetros, lo cual no permitía una rápida estabilización del mini tubo de calor.

5.5.3. De las Variables Ambientales

- Las condiciones ambientales provocaron cambios en la distribución de temperaturas a lo largo del mini tubo de calor, debido a que éstas variaban continuamente durante la realización de los ensayos experimentales.
- El mini tubo de calor, estuvo sometido a la variación de las condiciones ambientales durante el período de ejecución de las pruebas experimentales, lo que afectó las variables y parámetros de estudio. Período que comprende los meses entre febrero y mayo del presente año.

5.5.4. De los Ensayos Experimentales

Con la primera modificación realizada a la estructura capilar (colocar una malla de fieltro en el interior), no se observaron cambios significativos con relación al mini tubo original. Por su parte, con la segunda modificación a la estructura capilar (introducir un núcleo de cobre en el espacio anular del tubo), se evidenció una mejora en el

dispositivo, lográndose disminuir las diferencias de temperatura entre los distintos puntos del tubo; aunque de igual manera no se consiguió desarrollar la presión capilar necesaria para su funcionamiento.

CONCLUSIÓN

De los resultados obtenidos en el estudio experimental, se puede decir que el dispositivo puede comportarse como tubo de calor. Sin embargo, se sobrepasó el límite capilar por lo que el exceso de calor que no pudo ser transferido a través de la estructura capilar, fue transferido mediante los mecanismos de conducción y convección a través de las paredes del contenedor, esto según los valores de las tasas de flujo de calor obtenidas para las tres secciones del dispositivo.

La poca capacidad de bombeo capilar, se debe en parte a la gran diferencia en cuanto las secciones transversales para el flujo de líquido y el flujo de vapor dentro del dispositivo. Debido a esa área de flujo de vapor, se obtuvo valores muy altos del límite sónico, esto quiere decir, que se debe suministrar una tasa de flujo de calor muy elevada para que el vapor pueda alcanzar la velocidad del sonido. Las otras limitaciones, también arrojaron valores muy elevados, quedando el dispositivo muy lejos de alcanzarlos en las condiciones de operación en las cuales se estaba estudiando. Además es importante destacar, que para facilitar el cálculo de los límites, no se tomaron las condiciones más rigurosas, por lo que de esta manera se garantiza que el mini tubo de calor no los va a exceder.

RECOMENDACIONES

- Diseñar y construir un sistema de llenado de uniones fijas con la finalidad de reducir las infiltraciones y fugas en el sistema.
- Actualizar y automatizar el banco de prueba mediante la implementación de equipos de controles automáticos e instrumentos de medición modernos, para obtener resultados más precisos y de manera más rápida.
- Construir un banco de prueba con varios sistemas para suministrar calor al tubo, para poder ensayar varios dispositivos a la vez, a las mismas condiciones ambientales, y reducir el tiempo de realización de todas las pruebas experimentales.
- Conectar los potenciómetros a un estabilizador de voltaje o a un ups que permita mantener el voltaje de manera constante durante el desarrollo de la prueba experimental.
- Utilizar un nuevo sistema de suministro de calor al mini tubo de calor, que sea más uniforme y estable.
- Construir mini tubos de calor con diferentes estructuras capilares para estudiarlos a las mismas condiciones y comparar los perfiles de temperatura.
- Construir mini tubos de calor de materiales como plexiglás con la finalidad de observar los fenómenos de evaporación, condensación y circulación de fluido que se producen en el interior.
- Realizar ensayos experimentales con un mini tubo de calor liso, utilizando como estructura capilar la malla de fieltro para comparar los resultados con los que se obtuvieron en el presente trabajo.
- Efectuar ensayos experimentales colocando el mini tubo de calor en posición vertical con el condensador hacia arriba, para que la gravedad asista a la estructura capilar, debido a que según cálculos realizados para esta disposición, se lograría un aumento en el límite capilar de hasta 100 veces su valor actual.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, Fidas G., 2006. *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica*, Episteme, 5ª ed., Caracas.
- Chi, S.W., 1976. *Heat pipe theory and practice*. McGraw-Hill, New York.
- Dunn, P., Reay, D.A., 1994. *Heat pipes*. 4th ed., Pergamon Press, New York.
- Faghri, A., 1995. *Heat pipe science and technology*, Taylor and Francis, Washington, DC.
- García, F., 2000. *Modelo de Simulación Numérica del Comportamiento en Régimen Transitorio de Micro Tubos de Calor*. Tesis M. Sc. Ingeniería Mecánica, Tutor: Zarea, S., Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Gaugler, R., 1942. *Heat transfer devices*, U.S. patent 2350348, December.
- Grover, G.M. 1964. *Evaporation-condensation heat transfer device*. US Patent 3229759.
- Herrera, C., 2000. *Efecto de la Inclinación del Contenedor sobre el Comportamiento Termo Fluidodinámico de Micro Tubos de Calor*. Tesis Ing. Mecánico, Tutores: García, F. y Segura, J., Universidad Central Venezuela, Caracas.
- Jiao, A. J., Ma, H. B., Crister, J. K. 2007. Evaporation Heat Transfer Characteristics of a Grooved Heat Pipe with Micro-Trapezoidal Grooves. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 50, Nº 10, 2905 – 2911.
- Lanchao, L., Faghri, A. 1999. Heat Transfer in Micro Region of a Rotating Miniature Heat Pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 42, Nº 16, 1363 – 1369.
- Lin, L., Ponnappan, R., Leland J. 2002. High Performance Miniature Heat Pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 45, Nº 7, 3131 – 3142.
- Murer, S., Lybaert, P., Gleton, L., Sturbois, A. 2005. Experimental and numerical analysis of the transient response of a miniature heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 25, Nº 21, 2566 – 2577.

- Padrón, Ricardo. 1986. *Diseño, Construcción y Evaluación de un Banco de Ensayos de Tubos de Calor*. Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Pehlivan, K., Hassan, I., Vaillancourt, M. 2006. Experimental study on two-phase flow and pressure drop in millimeter-size channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 26, Nº 5, 1506 – 1514.
- Peterson, G.P., 1994. *An introduction to heat pipes*, Wiley Series in Thermal Management of Microelectronic and Electronic Systems, Wiley, New York.
- Riffat, S. B., Zhao, X., Doherty, P. S. 2002. Analytical and numerical simulation of the thermal performance of 'mini' gravitational and 'micro' gravitational heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 22, Nº 12, 1047 – 1068
- Schneider, M., Yoshida, M., Groll, M. 2002. Investigation of Interconnected Mini Heat Pipe Arrays for Micro Electronics Cooling. Vol. 44, Nº 31, 2346 – 2352.
- Segura, J., 1998. *Modelo de Simulación para Flujo Bifásico en Mechas de Tubos de Calor*. Tesis M. Sc. Ingeniería Mecánica. Tutor: Zarea, S. Universidad Central de Venezuela.
- Silverstein, C., 1992. *Design and technology of heat pipes for cooling and heat Exchange*, Hemisphere Publishing Corp, Washington, DC.
- Soto, J. *Estudio Numérico y Experimental del Comportamiento Térmico y Fluidodinámico de un Mini Tubo de Calor Multiranurado*. Tesis M.Sc. Ingeniería Mecánica, Tutor: García G., F., Universidad Central de Venezuela, Caracas. (En proceso).
- Soto, R., J., García, G., F., Segura, A., J. 2005. *Estudio Numérico del Comportamiento Térmico y Fluidodinámico de Microtubos de Calor Multiranurados*. Revista de la Facultad de Ingeniería, UCV. Volumen 20, Número 4. Págs. 23-33.
- Vasiliev L., L. 2008. Micro and Miniature Heat Pipe – Electronic Component Coolers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 28, Nº 17, 266 – 273.

Fuentes Electrónicas

Science Direct (2008). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>. [Consultada: 2008, febrero].

Elsevier (2008). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.elsevier.com>. [Consultada: 2008, febrero].

Universidad de Texas (2008). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.tamu.edu/bitstream/handle>. [Consultada: 2008, febrero].

ESA – Thermal Control Heat Pipe Technology (2008). [Página web en línea]. Disponible en: http://www.heat pipes\SEM6ZQBE8YE_0.html. [Consultada: 2008, abril].

Scien Links Japan (2008). [Página web en línea]. Disponible en: <http://heat pipes\000020001100A0222232.php.htm>. [Consultada: 2008, abril].

ANEXOS A

A1. Relación de perfiles de Temperatura para la Primera Configuración de la Estructura Capilar del Mini Tubo de Calor

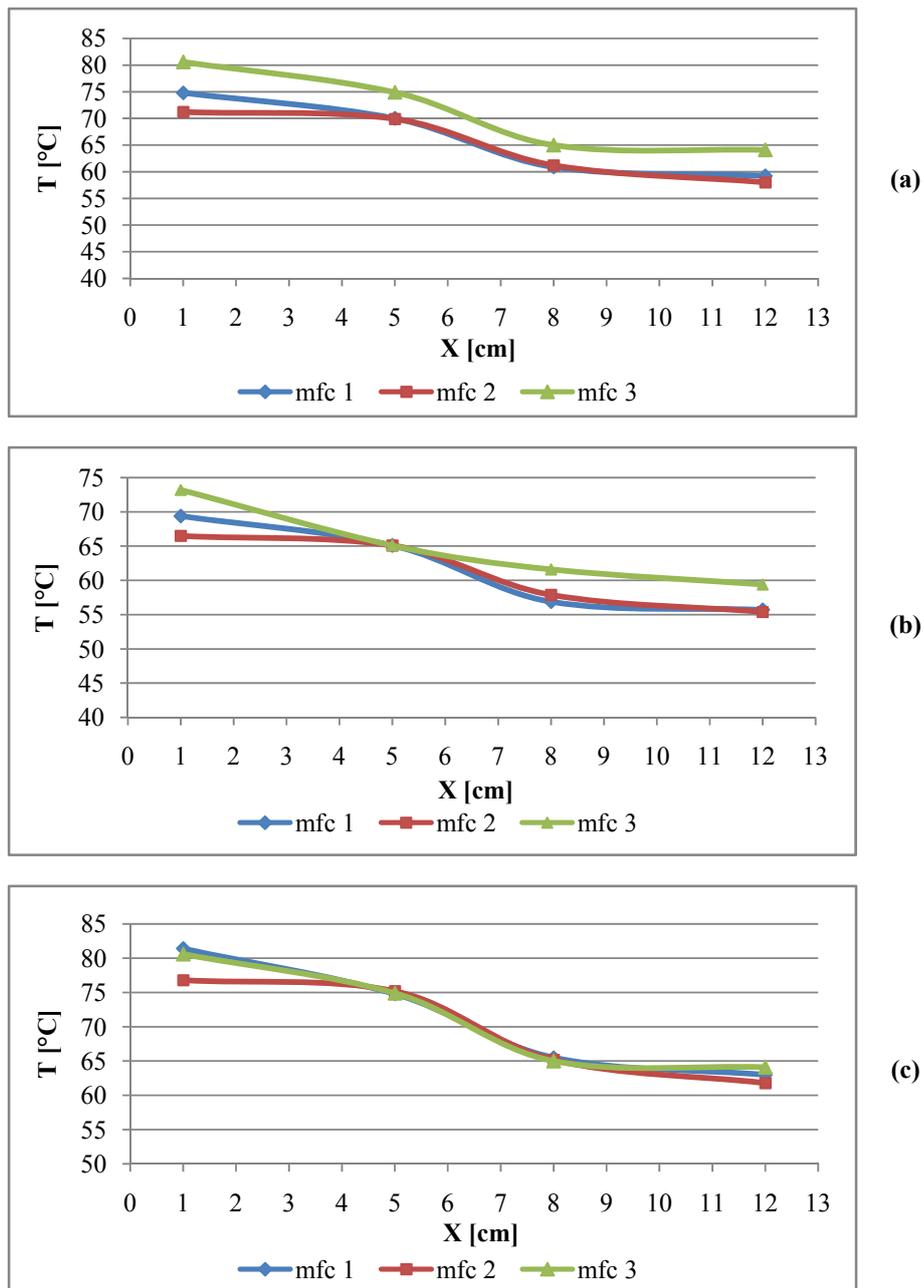


Figura A1. Combinación de perfiles de temperatura obtenidos en los ensayos realizados con la primera estructura capilar: (a) 65 °C, (b) 70 °C y (c) 75 °C. (mfc1= 1,501g; mfc2 = 2,062g; mfc3 = 2,631g)

A2. Relación de perfiles de Temperatura para la Segunda Configuración (Malla de Filtro) de la Estructura Capilar del Mini Tubo de Calor

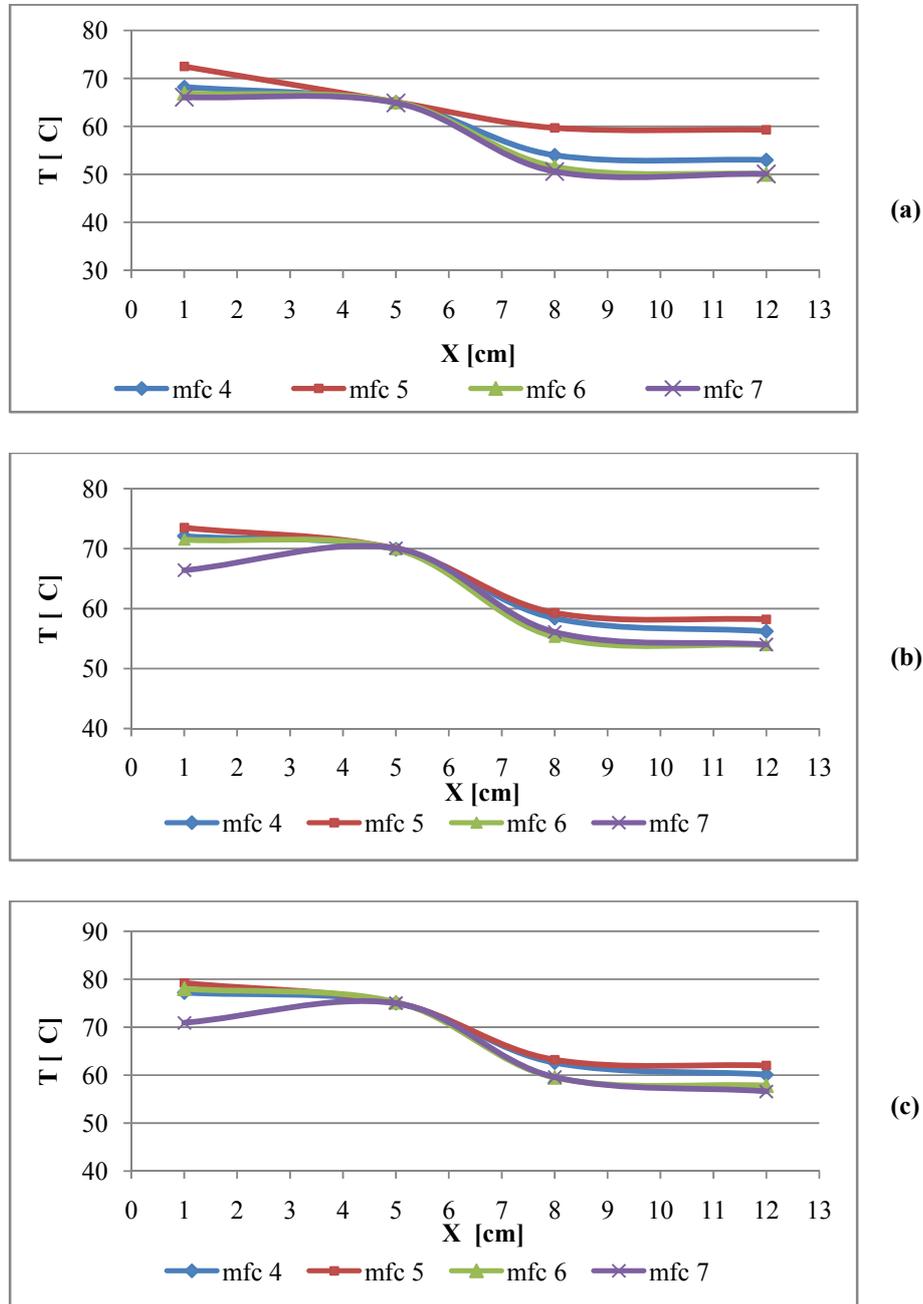


Figura A2. Combinación de perfiles de temperatura obtenidos en los ensayos realizados con la segunda la estructura capilar: (a) 65 °C, (b) 70 °C y (c) 75 °C. (mfc4 = 0,751g; mfc5 = 1,501g; mfc6 = 2,062g; mfc7 = 2,631)

A3. Relación de perfiles de Temperatura para la Tercera Configuración (Corazón de Cobre) de la Estructura Capilar del Mini Tubo de Calor

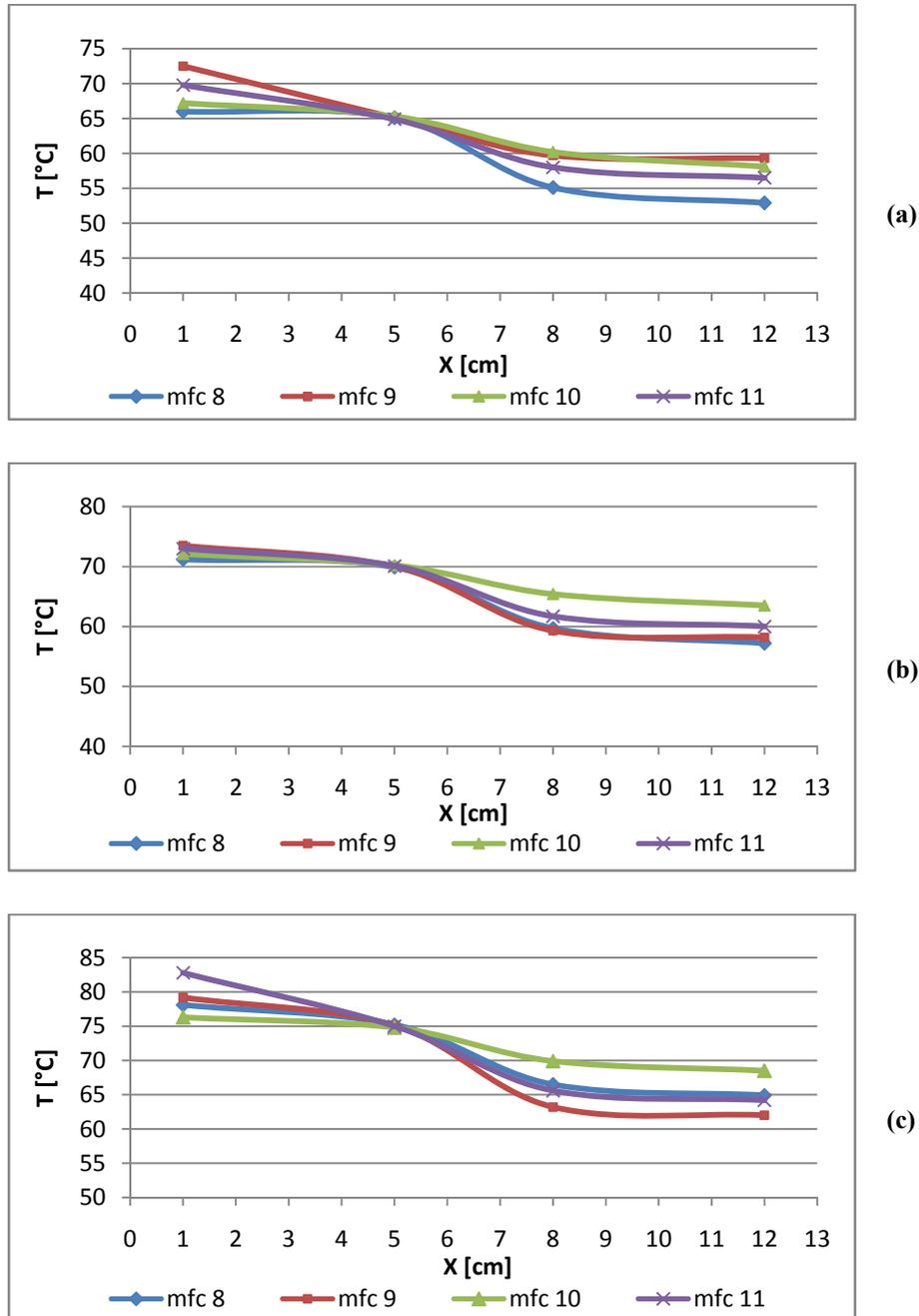


Figura A3. Combinación de perfiles de temperatura obtenidos en los ensayos realizados con la tercera estructura capilar: (a) 65 °C, (b) 70 °C y (c) 75 °C. (mfc8 = 0,063g; mfc9 = 0,119; mfc10 = 0,158g; mfc11= 0,237g)

A4. Resultados del Tercer Ensayo Experimental con la segunda Estructura Capilar

Para este ensayo se utilizó una masa de fluido circulante de 2,062 g, lo que es equivalente a un volumen de metanol cargado de 2,61 ml. Los resultados y diferencias de temperatura obtenidos para el estudio realizado al mini tubo de calor con la mecha de fieltro para las tres condiciones de temperatura establecida, se reflejan en la tabla 4.11 y 4.12 respectivamente.

Tabla A4.1 Resultados obtenidos en el ensayo experimental

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	30,0	0,09	23,2	0,06	66,9	65,1	51,6	50,0	64,9	68,4	22,3	48,2
70	31,9	0,12	24,2	0,07	71,5	69,9	55,3	53,9	69,7	73,5	23,1	46,5
75	34,2	0,12	26,0	0,07	78,0	75,2	59,5	57,8	74,8	80,1	22,9	49,0

TablaA4.2 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
16,9	1,8	13,5	1,6
17,6	1,6	14,6	1,4
20,2	2,8	15,7	1,7

Los resultados arrojados por la prueba N° 6 nos llevan nuevamente a los perfiles de temperatura obtenidos para las dos primeras pruebas, grandes diferencias de temperaturas, especialmente entre los puntos 2 y 3. En este ensayo, se obtuvieron los mayores deltas de temperatura de todas las pruebas realizadas, demostrando que estas condiciones de estudio no son nada favorables para el funcionamiento del dispositivo con esta configuración de la estructura capilar (mecha de fieltro). Las máximas temperaturas se evidenciaron en la prueba a 75 °C, en donde la diferencia entre los extremos es de 20,2 °C y entre los puntos 2 y 3 es de 15,7 °C. Las mínimas diferencias de temperatura fueron 16,9 °C y 1,4 °C para los extremos del

mini tubo y para el tramo 3-4 respectivamente. En la figura 4.6 se muestran los perfiles de temperatura obtenidos.

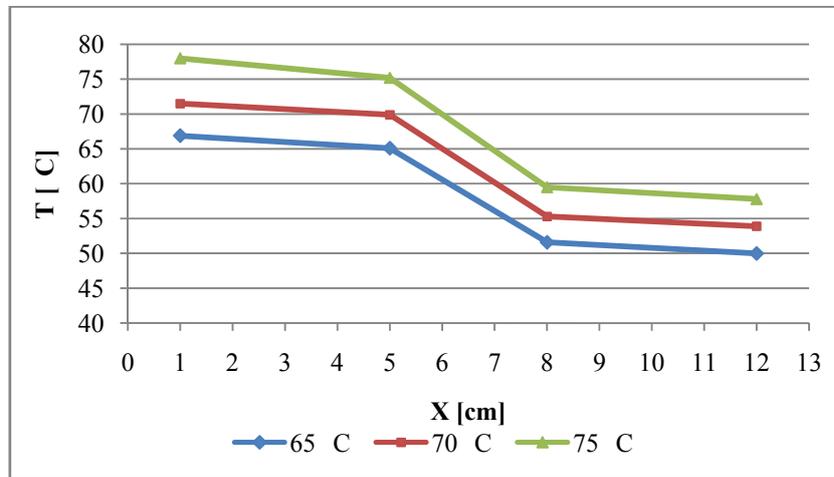


Figura A4 Perfiles de temperatura

A5. Resultados del Cuarto Ensayo Experimental con la Segunda Estructura Capilar

En este ensayo la masa de fluido circulante correspondiente es de 2,631 g, lo que es equivalente a un volumen de metanol cargado de 3,33 ml. Los resultados y diferencias de temperatura obtenidos para el estudio realizado al mini tubo de calor en diferentes condiciones de temperatura, se reflejan en la tabla 4.13 y 4.14 respectivamente.

Tabla A5.1 Resultados obtenidos en el ensayo experimental

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	27,0	0,08	21,2	0,05	66,1	64,9	50,6	50,1	64,6	65,6	24,0	47,6
70	29,8	0,09	23,3	0,06	66,4	70,1	56,1	54,0	69,8	72,4	23,8	47,3
75	31,7	0,11	25,4	0,08	70,9	75,0	59,6	56,6	75,4	79,0	23,2	50,0

En lo concerniente a esta ensayo, encontramos que la temperatura en el punto 1 es menor que la temperatura obtenida en el punto 2 para las pruebas realizadas a 70 y a 75 °C, esto es debido posiblemente a un error en la lectura del instrumento o a un error en la ubicación de la termocupla. Nuevamente se obtuvieron amplias diferencias de temperatura para los extremos del mini tubo de calor, en donde se obtuvo una diferencia máxima de 16 °C y una diferencia mínima de 12,4 °C. En el tramo 2-3 (tramo adiabático) se registró la máxima diferencia de temperatura, siendo esta 15,4 °C; y en el tramo 3-4 (condensador) se obtuvo la menor diferencia, la cual fue de 0,5 °C. En la figura 4.7 se reflejan los perfiles de temperatura obtenidos para la prueba experimental.

**Tabla A5.2 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor
(Ensayo experimental N° 7)**

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
16,0	1,2	14,3	0,5
12,4	-3,7	14,0	2,1
14,3	-4,1	15,4	3,0

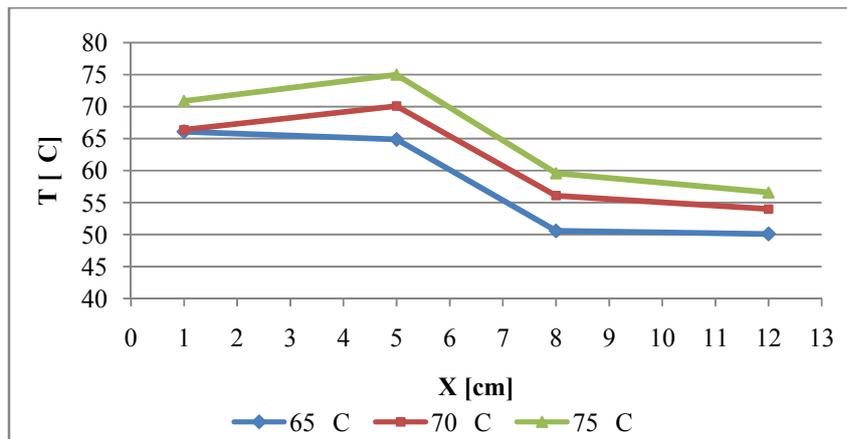


Figura A5 Perfiles de temperatura

A6. Propiedades Físicas del Aislante Térmico Utilizado

Tabla A6. Propiedades físicas y normas con las que cumple el aislante térmico utilizado (catálogo de Armaflex)

Conductividad térmica: Btu •in./h •pie ² •°F (W/mK) 75°F (24°C) temp promedio 90°F (32°C) temp promedio	0.27 (0.039) 0.276 (0.040)	ASTM C 177 o C 518
Permeabilidad de vapor de agua, perm-pulg [Kg/(s•m•Pa)]	0.08 (1.16 x 10 ⁻¹³)	ASTM E 96 Procedimiento A
Índice de generación de humo y propagación de fuego hasta 1" (25 mm)	25/50	ASTM E 84 CAN/ULC S102
Crecimiento de moho Resistencia a hongos Resistencia a bacterias	UL181 ASTM G21/C1338 ASTM G22	Cumple los requerimientos Cumple los requerimientos Cumple los requerimientos
Absorción de agua, % por volumen	0.2	ASTM C 209
Límite de uso máximo	220°F (105°C)	—
Límite de uso mínimo, °F	-70°F (-57°C)*	—
Resistencia al ozono	ADECUADA	—
Dimensiones		
Espesor de pared, (nominal)	3/8", 1/2", 3/4", 1" (10, 13, 19, 25 mm)	—
Diámetro interior, forma tubular Longitud de secciones, en pies, forma tubular	Diám. interior entre 3/8" y 6 IPS (Diám. interior entre 10 mm y 168 mm) 6 (1.8 m)	— —
Densidad, margen típico	3.0 - 6.0 lb/pie ³	ASTM D 1622 o D 1667

A7. Propiedades Físicas del Fluido de Operación Empleado

Tabla A7. Propiedades físicas del metanol fabricado por Fluka

Pureza	> 99.8 %
Miscibilidad en agua	En conformidad
H ₂ O	< 0,05 %
Resistencia a la evaporación	< 0,0005 %
Sustancias oscurecidas por H ₂ SO ₄	En conformidad
Aldehídos (CH ₃ CHO)	< 0,001 %
Etanol	< 0,1 %
Acetona	< 0,001 %
Formaldehido (HCHO)	< 0,0001 %
Libre de ácidos (HCOOH)	< 0,002 %
KM _n O ₄	< 0,00025 %
Componentes a base de carbono (CO)	< 0,005 %
Apariencia	Homogénea
APHA	10
Punto de ebullición	64 – 65 °C

ANEXOS B



Figura B1. Sistema de llenado

Figura B2. Parte superior del sistema de llenado

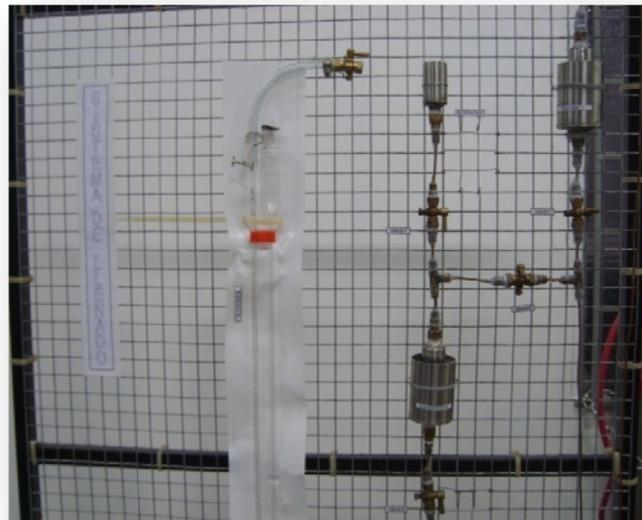




Figura B3. Parte inferior del sistema de llenado

Figura B4. Bomba de vacío acoplada al sistema de llenado





Figura B5. Mini tubo de calor acoplado al sistema de llenado al momento de la carga de la masa de fluido circulante

Figura B6. Mini tubo de calor montado en el banco de pruebas

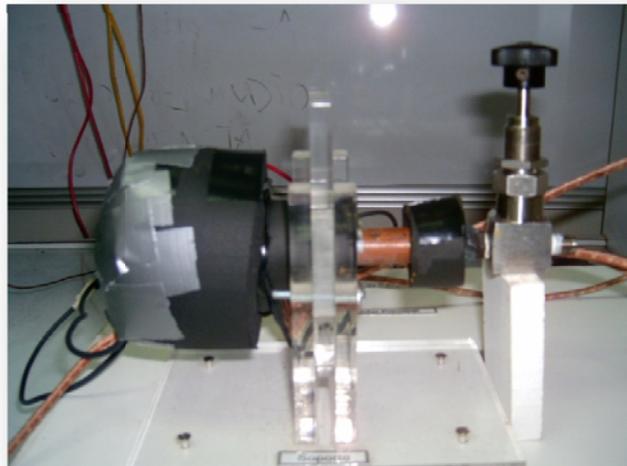




Figura B7. Mini tubo de calor montado en el banco de prueba

Figura B8. Instrumentos y equipos del banco de prueba



ANEXOS A

A1. Relación de perfiles de Temperatura para la Primera Configuración de la Estructura Capilar del Mini Tubo de Calor

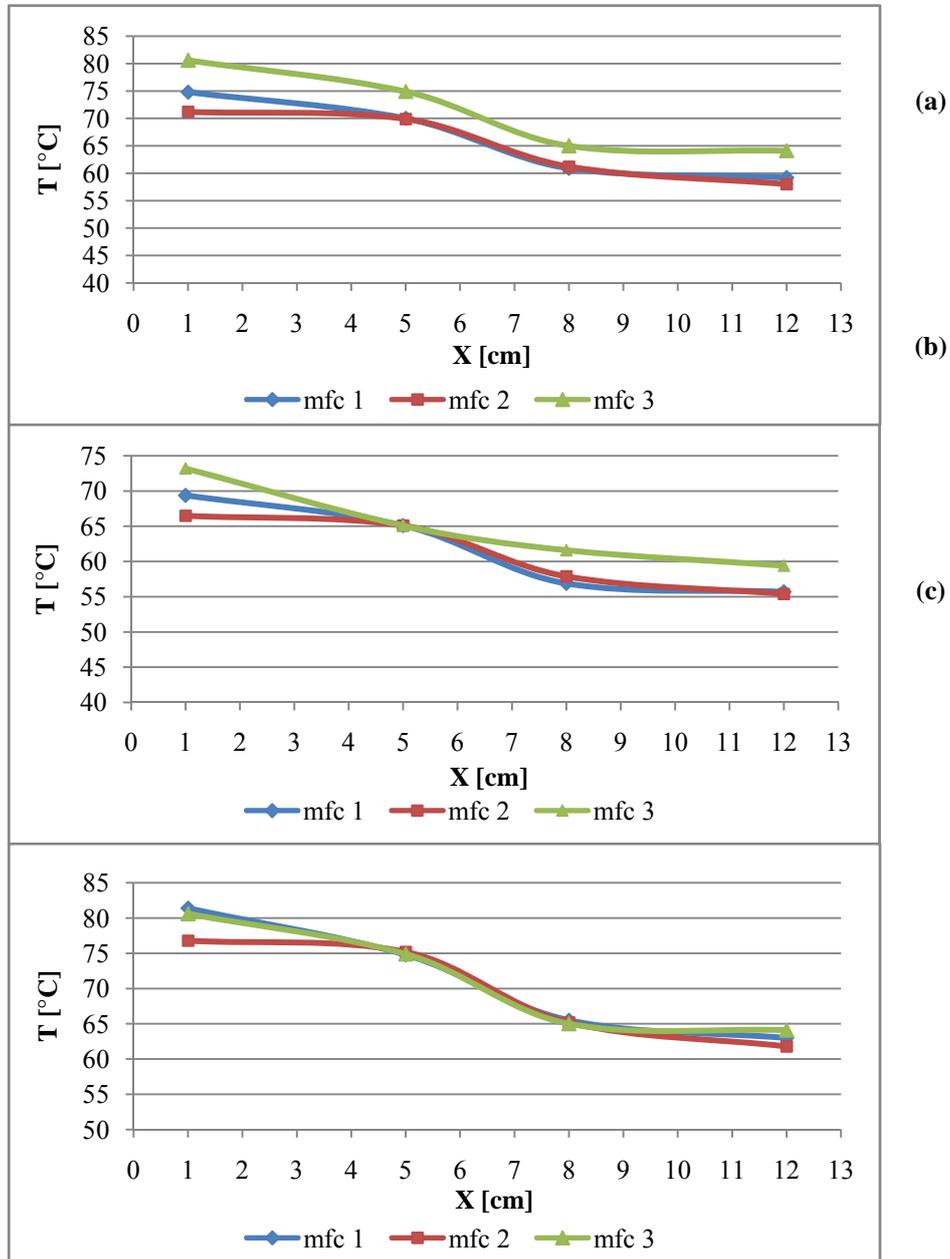


Figura A1. Combinación de perfiles de temperatura obtenidos en los ensayos realizados con la primera estructura capilar: (a) 65 °C, (b) 70 °C y (c) 75 °C. (mfc1= 1,501g; mfc2 = 2,062g; mfc3 = 2,631g)

A2. Relación de perfiles de Temperatura para la Segunda Configuración (Malla de Filtro) de la Estructura Capilar del Mini Tubo de Calor

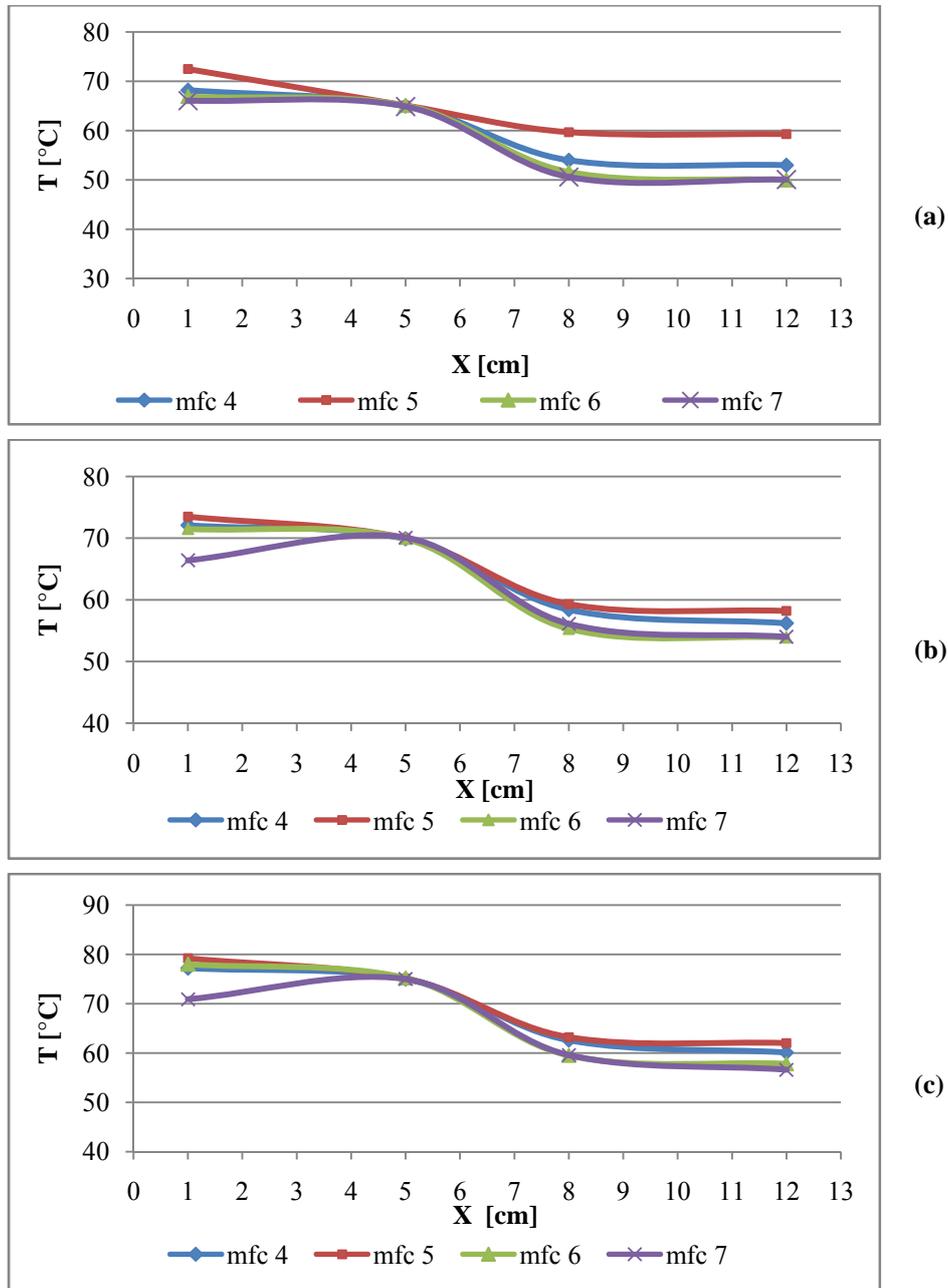


Figura A2. Combinación de perfiles de temperatura obtenidos en los ensayos realizados con la segunda la estructura capilar: (a) 65 °C, (b) 70 °C y (c) 75 °C. (mfc4 = 0,751g; mfc5 = 1,501g; mfc6 = 2,062g; mfc7 = 2,631)

A3. Relación de perfiles de Temperatura para la Tercera Configuración (Corazón de Cobre) de la Estructura Capilar del Mini Tubo de Calor

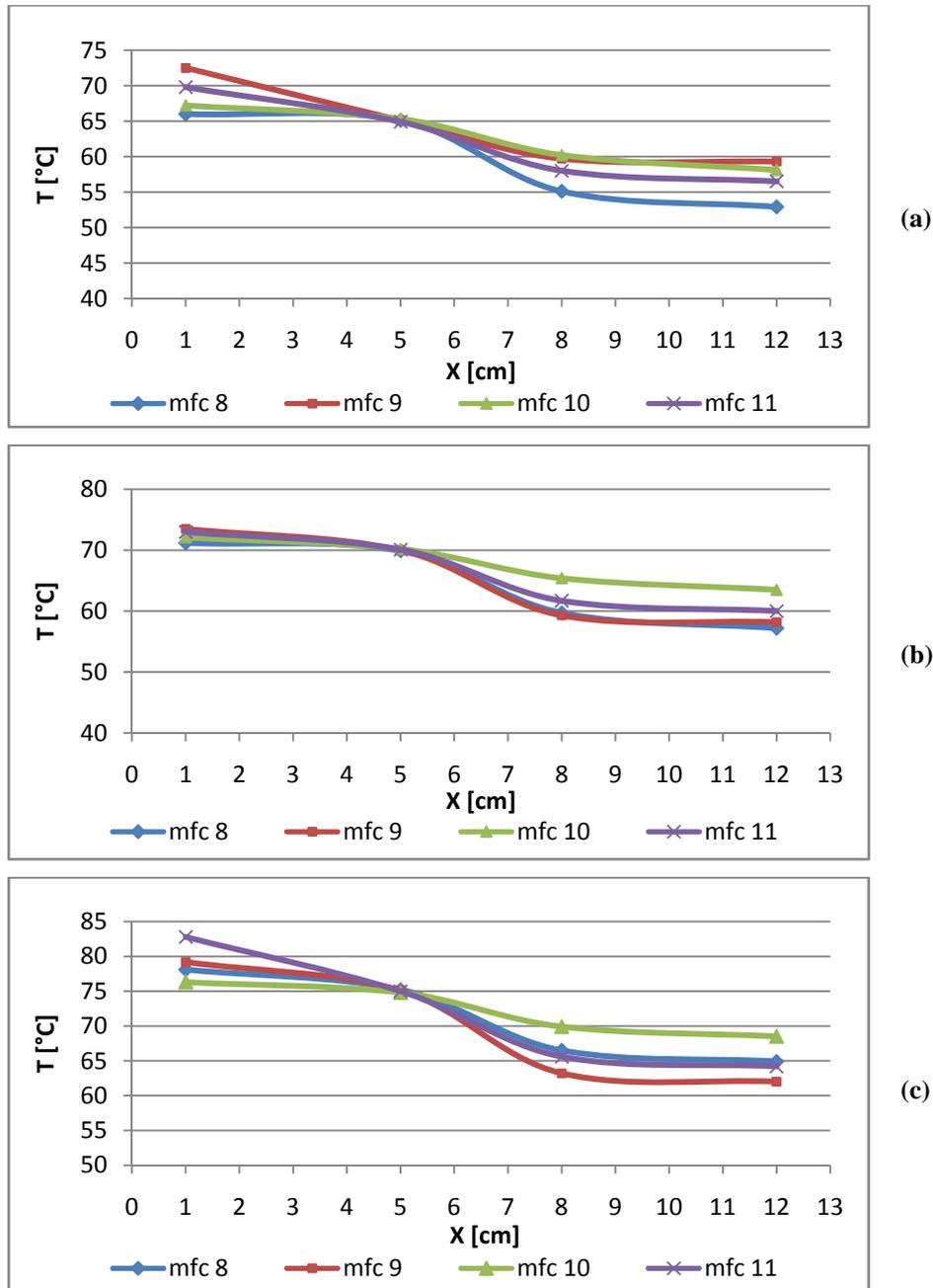


Figura A3. Combinación de perfiles de temperatura obtenidos en los ensayos realizados con la tercera estructura capilar: (a) 65 °C, (b) 70 °C y (c) 75 °C. (mfc8 = 0,063g; mfc9 = 0,119; mfc10 = 0,158g; mfc11= 0,237g)

A4. Resultados del Tercer Ensayo Experimental con la segunda Estructura Capilar

Para este ensayo se utilizó una masa de fluido circulante de 2,062 g, lo que es equivalente a un volumen de metanol cargado de 2,61 ml. Los resultados y diferencias de temperatura obtenidos para el estudio realizado al mini tubo de calor con la mecha de fieltro para las tres condiciones de temperatura establecida, se reflejan en la tabla 4.11 y 4.12 respectivamente.

Tabla A4.1 Resultados obtenidos en el ensayo experimental

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	30,0	0,09	23,2	0,06	66,9	65,1	51,6	50,0	64,9	68,4	22,3	48,2
70	31,9	0,12	24,2	0,07	71,5	69,9	55,3	53,9	69,7	73,5	23,1	46,5
75	34,2	0,12	26,0	0,07	78,0	75,2	59,5	57,8	74,8	80,1	22,9	49,0

Tabla A4.2 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
16,9	1,8	13,5	1,6
17,6	1,6	14,6	1,4
20,2	2,8	15,7	1,7

Los resultados arrojados por la prueba N° 6 nos llevan nuevamente a los perfiles de temperatura obtenidos para las dos primeras pruebas, grandes diferencias de temperaturas, especialmente entre los puntos 2 y 3. En este ensayo, se obtuvieron los mayores deltas de temperatura de todas las pruebas realizadas, demostrando que estas condiciones de estudio no son nada favorables para el funcionamiento del dispositivo con esta configuración de la estructura capilar (mecha de fieltro). Las máximas temperaturas se evidenciaron en la prueba a 75 °C, en donde la diferencia entre los extremos es de 20,2 °C y entre los puntos 2 y 3 es de 15,7 °C. Las mínimas diferencias de temperatura fueron 16,9 °C y 1,4 °C para los extremos del mini tubo y para el tramo 3-4 respectivamente. En la figura 4.6 se muestran los perfiles de temperatura obtenidos.

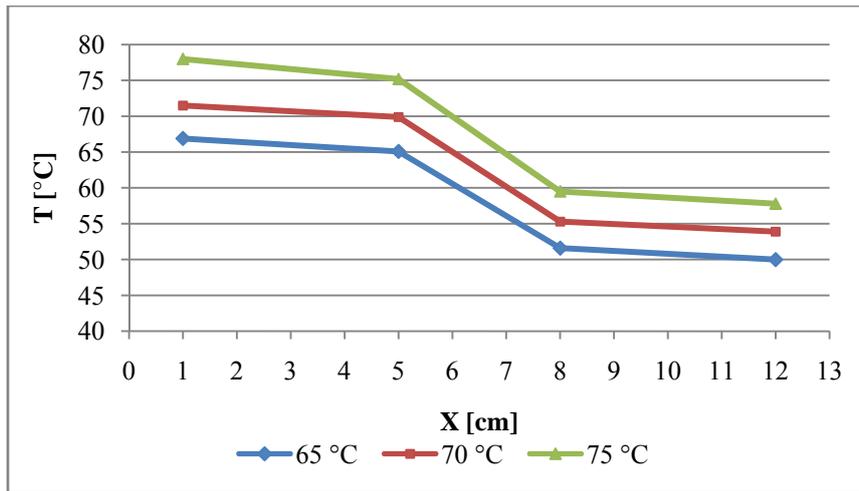


Figura A4 Perfiles de temperatura

A5. Resultados del Cuarto Ensayo Experimental con la Segunda Estructura Capilar

En este ensayo la masa de fluido circulante correspondiente es de 2,631 g, lo que es equivalente a un volumen de metanol cargado de 3,33 ml. Los resultados y diferencias de temperatura obtenidos para el estudio realizado al mini tubo de calor en diferentes condiciones de temperatura, se reflejan en la tabla 4.13 y 4.14 respectivamente.

Tabla A5.1 Resultados obtenidos en el ensayo experimental

T_{prueba}	V_{cp} [V]	I_{cp} [A]	V_{cr} [V]	I_{cr} [A]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]	$T3$ [°C]	$T4$ [°C]	$T5$ [°C]	$T6$ [°C]	T_{∞} [°C]	HR [%]
65	27,0	0,08	21,2	0,05	66,1	64,9	50,6	50,1	64,6	65,6	24,0	47,6
70	29,8	0,09	23,3	0,06	66,4	70,1	56,1	54,0	69,8	72,4	23,8	47,3
75	31,7	0,11	25,4	0,08	70,9	75,0	59,6	56,6	75,4	79,0	23,2	50,0

En lo concerniente a esta ensayo, encontramos que la temperatura en el punto 1 es menor que la temperatura obtenida en el punto 2 para las pruebas realizadas a 70 y a 75 °C, esto es debido posiblemente a un error en la lectura del instrumento o a un error en la ubicación de la termocupla. Nuevamente se obtuvieron amplias diferencias de temperatura para los extremos del mini tubo de calor, en donde se obtuvo una diferencia máxima de 16 °C y una diferencia mínima de 12,4 °C. En el tramo 2-3 (tramo adiabático) se registró la máxima diferencia de temperatura, siendo esta 15,4 °C; y en el tramo 3-4 (condensador) se obtuvo la menor diferencia, la cual fue de 0,5 °C. En la figura 4.7 se reflejan los perfiles de temperatura obtenidos para la prueba experimental.

Tabla A5.2 Diferencia de temperatura entre distintos puntos del mini tubo de calor (Ensayo experimental N° 7)

Δ_{1-4} [°C]	Δ_{1-2} [°C]	Δ_{2-3} [°C]	Δ_{3-4} [°C]
16,0	1,2	14,3	0,5
12,4	-3,7	14,0	2,1
14,3	-4,1	15,4	3,0

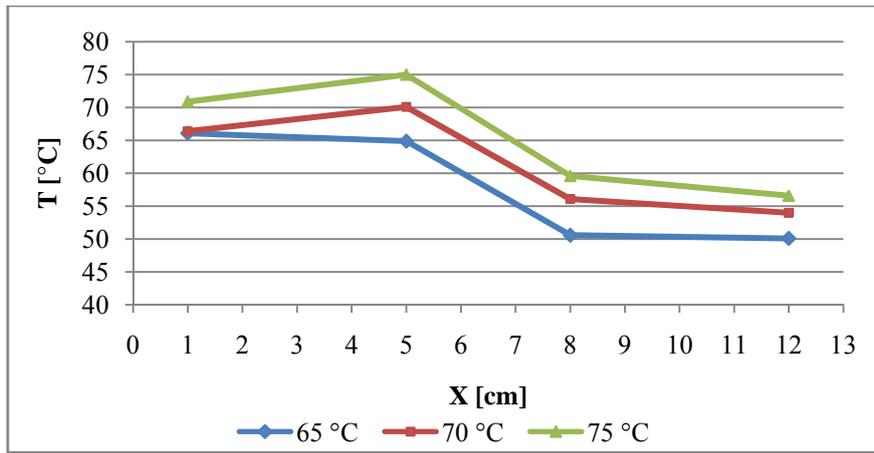


Figura A5 Perfiles de temperatura

A6. Propiedades Físicas del Aislante Térmico Utilizado

Tabla A6. Propiedades físicas y normas con las que cumple el aislante térmico utilizado (catálogo de Armaflex)

Conductividad térmica: Btu •in./h •pie ² •°F (W/mK) 75°F (24°C) temp promedio 90°F (32°C) temp promedio	0.27 (0.039) 0.276 (0.040)	ASTM C 177 o C 518
Permeabilidad de vapor de agua, perm-pulg [Kg/(s•m•Pa)]	0.08 (1.16 x 10 ⁻¹³)	ASTM E 96 Procedimiento A
Índice de generación de humo y propagación de fuego hasta 1" (25 mm)	25/50	ASTM E 84 CAN/ULC S102
Crecimiento de moho Resistencia a hongos Resistencia a bacterias	UL181 ASTM G21/C1338 ASTM G22	Cumple los requerimientos Cumple los requerimientos Cumple los requerimientos
Absorción de agua, % por volumen	0.2	ASTM C 209
Límite de uso máximo	220°F (105°C)	—
Límite de uso mínimo, °F	-70°F (-57°C)*	—
Resistencia al ozono	ADECUADA	—
Dimensiones		
Espesor de pared, (nominal)	3/8", 1/2", 3/4", 1" (10, 13, 19, 25 mm)	—
Diámetro interior, forma tubular Longitud de secciones, en pies, forma tubular	Diám. interior entre 3/8" y 6 IPS (Diám. interior entre 10 mm y 168 mm) 6 (1.8 m)	— —
Densidad, margen típico	3.0 - 6.0 lb/pie ³	ASTM D 1622 o D 1667

A7. Propiedades Físicas del Fluido de Operación Empleado

Tabla A7. Propiedades físicas del metanol fabricado por Fluka

Pureza	> 99.8 %
Miscibilidad en agua	En conformidad
H ₂ O	< 0,05 %
Resistencia a la evaporación	< 0,0005 %
Sustancias oscurecidas por H ₂ SO ₄	En conformidad
Aldehídos (CH ₃ CHO)	< 0,001 %
Etanol	< 0,1 %
Acetona	< 0,001 %
Formaldehído (HCHO)	< 0,0001 %
Libre de ácidos (HCOOH)	< 0,002 %
KM _n O ₄	< 0,00025 %
Componentes a base de carbono (CO)	< 0,005 %
Apariencia	Homogénea
APHA	10
Punto de ebullición	64 – 65 °C

ANEXOS B



Figura B1. Sistema de llenado

Figura B2. Parte superior del sistema de llenado

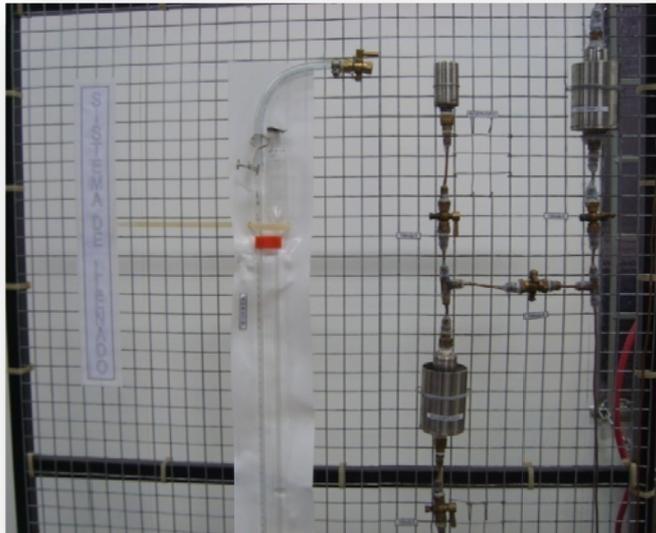




Figura B3. Parte inferior del sistema de llenado

Figura B4. Bomba de vacío acoplada al sistema de llenado





Figura B5. Mini tubo de calor acoplado al sistema de llenado al momento de la carga de la masa de fluido circulante

Figura B6. Mini tubo de calor montado en el banco de pruebas

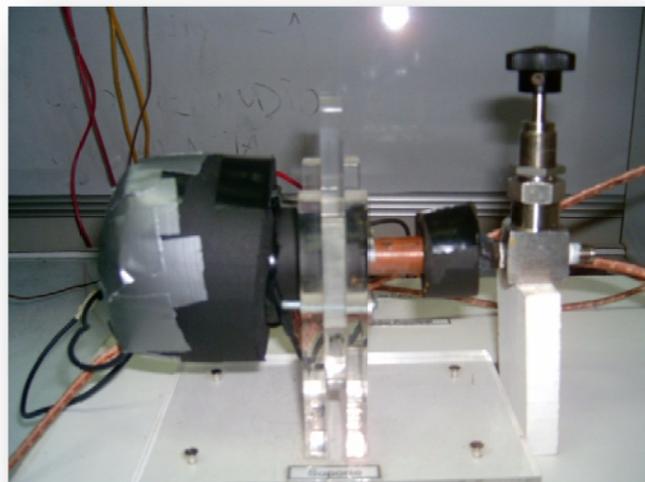




Figura B7. Mini tubo de calor montado en el banco de prueba

Figura B8. Instrumentos y equipos del banco de prueba

