



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO EXPERIMENTAL**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**

---

“ANÁLISIS TÉRMICO EN TUBOS DE CALOR EXPERIMENTALES  
APLICANDO TERMOGRAFÍA EN EL LABORATORIO DE ENERGÍA  
DE LA FICM”

---

**AUTOR:** Medina López Edwin Fabricio

**TUTOR:** Ing. Mg. Escobar Luis

**AMBATO – ECUADOR**

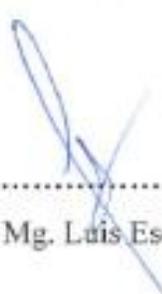
2019

## CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del trabajo experimental sobre el tema, "ANÁLISIS TÉRMICO EN TUBOS DE CALOR EXPERIMENTALES APLICANDO TERMOGRAFÍA EN EL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA FICM", ejecutado por el señor EDWIN FABRICIO MEDINA LÓPEZ, egresado de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, CERTIFICO que el presente trabajo de investigación reúne los requisitos para ser sometidos a evaluación de jurado examinador designado por el H. Consejo Directivo.

Ambato, 05 de octubre de 2019

EL TUTOR



-----  
Ing. Mg. Luis Escobar

## AUTORÍA DEL TRABAJO

Yo, Edwin Fabricio Medina López con C.I. 1803215621, declaro que los criterios emitidos, resultados obtenidos y expuestos en el presente trabajo experimental sobre el tema, “ANÁLISIS TÉRMICO EN TUBOS DE CALOR EXPERIMENTALES APLICANDO TERMOGRAFÍA EN EL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA FICM”, son de mi autoría, y es de exclusiva responsabilidad de mi persona.

Ambato, 05 de octubre de 2019



.....  
EDWIN FABRICIO MEDINA LÓPEZ

C.I. 1803215621

AUTOR

## DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para la lectura, consulta y proceso de investigación según las normas de la institución.

Sedo los derechos en línea patrimoniales de este Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción del mismo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, 05 de octubre de 2019



EDWIN FABRICIO MEDINA LÓPEZ

C.I. 1803215621

AUTOR

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

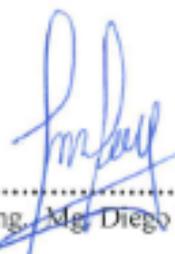
Los distinguidos miembros del tribunal de grado acuerdan dar su aprobación del informe emitido del trabajo experimental realizado por el estudiante Edwin Fabricio Medina López de la carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: "ANÁLISIS TÉRMICO EN TUBOS DE CALOR EXPERIMENTALES APLICANDO TERMOGRAFÍA EN EL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA FICM"

Ambato, 05 de octubre de 2019

Para constancia Firman:



.....  
Ing. Mg. Santiago Cabrera



.....  
Ing. Mg. Diego Núñez

## **DEDICATORIA**

Esta Tesis está dedicada principalmente a mi amado Hashem por darme la vida, guiarme, ser el apoyo y fortaleza en los momentos de dificultad y debilidad, pues no ha permitido que me quebrante.

Gracias a mis amados padres por su infinito amor, por su grande y enorme paciencia y por infundir muchos valores en mi vida, por su esfuerzo, tenacidad, trabajo y valentía para convertirme en la persona que ahora soy.

Mi enorme agradecimiento a mi amada esposa Verito, por estar en los momentos más difíciles dándome su apoyo incondicional y su infinito amor.

Finalmente, a mis hermanos y a toda mi familia por estar en cada momento brindándome su apoyo y buenos consejos a lo largo de esta carrera, les doy las gracias a todos expresándoles mis más sinceros sentimientos de afecto y amor, siempre los tengo presente en mi corazón.

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso mi gratitud a Hashem quien guía mi camino, a mi familia y a mi esposa por su apoyo constante.

Agradezco a los docentes de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la Carrera, especialmente a mi Tutor Ing. Mg. Luis Escobar quien me guió de forma incondicional, brindándome sus valiosos consejos para hacer posible el desarrollo de este proyecto experimental.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

TRABAJO EXPERIMENTAL .....	i
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO .....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
Índice de Tablas .....	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Ecuaciones.....	xvi
RESUMEN EJECUTIVO .....	xviii
ABSTRACT .....	xix
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes Investigativo .....	1
1.1.1. Investigaciones preliminares .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo general: .....	2
1.2.2. Objetivos específicos: .....	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Fundamentación Teórica.....	3
1.4.1. Transferencia de calor.....	3
1.4.1.1. Mecanismos de transferencia .....	4
1.4.2. Tubo de calor.....	7
1.4.2.1. Parámetros de tubos de calor.....	7
1.4.2.2. Características de los fluidos de trabajo.....	8
1.4.2.3. Clasificación de los tubos de calor .....	10
1.4.2.4. Bombeo por capilaridad .....	12
1.4.2.5. Capilaridad .....	12
1.4.2.6. Altura Capilar disponible .....	14

1.4.3.	Caídas de presión.....	15
1.4.3.1.	Caídas de presión por fricción.....	17
1.4.3.2.	Caída de presión en el vapor .....	22
1.4.3.3.	Caída de presión en el líquido .....	22
1.4.3.4.	Longitud efectiva.....	23
1.4.3.5.	Caídas de presión debida a los efectos de la inercia.....	24
1.4.3.6.	Caídas de presión hidrostáticas. ....	25
1.4.4.	Características del relleno .....	26
1.4.4.1.	Tela de alambre <<Screen Mech>>.....	26
1.4.4.2.	Esferas empacadas, metal sinterizado.....	28
1.4.4.3.	Estructura del espacio anular.....	29
1.4.6.	Fabricación.....	31
1.4.6.1.	Elementos constructivos básicos .....	31
1.4.6.2.	Limpieza y montaje .....	32
1.4.6.3.	Evacuación y carga.....	33
1.5.	Hipótesis.....	34
1.6.	Señalamiento de variables.....	34
1.6.1.	Variable independiente .....	34
1.6.2.	Variable dependiente .....	34
1.6.3.	Término de relación .....	34
CAPÍTULO II.....		35
METODOLOGÍA.....		35
2.1	Materiales.....	35
2.1.1	Materiales y equipos utilizados en la elaboración de tubos de calor.....	35
2.1.2	Materiales y equipos utilizados en la elaboración de tubos de calor.....	36
2.2	Métodos.....	37
2.2.1	Proceso para la elaboración de probetas de tubos de calor .....	37
2.2.2	Cálculos hidráulicos.....	38
2.2.3	Dimensionamiento geométrico.....	43
2.2.4	Ensayos experimentales para obtener la porosidad adecuada.....	46
2.2.4.1	Prácticas realizadas primer ensayo .....	46
2.2.4.2	Prácticas realizadas segundo ensayo.....	48

2.2.4.3	Prácticas realizadas tercer ensayo.....	50
2.2.4.4	Prácticas realizadas cuarto ensayo.....	53
2.2.4.5	Prácticas realizadas quinto ensayo.....	55
2.2.4.6	Práctica final.....	57
2.2.4.7.	Resumen final de la composición general de los ensayos .....	59
CAPÍTULO III .....		61
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		61
3.1.	Resultados de los análisis.....	61
3.1.1	Descripción del análisis térmico usando termografía.....	61
3.1.2	Descripción de resultado de los análisis Térmico en Tubos de calor ejecutado por MEF.....	78
3.1.3	Verificación de la Hipótesis .....	87
3.1.3.1	Hipótesis Nula (H0):.....	88
3.1.3.2	Hipótesis Alternativa (H1):.....	88
3.1.3.3	Variable independiente .....	88
3.1.3.4	Variable dependiente .....	88
3.1.4	Verificación estadística .....	88
3.1.5	Regla de decisión.....	89
3.1.5.1	Verificación de la hipótesis con respecto a la temperatura promedio originada en los tubos de calor.....	90
3.1.5.2	Cálculo de varianza de la muestra.....	91
3.1.5.3	Varianza combinada .....	91
3.1.5.4	Desviación estándar de las diferencias .....	91
3.1.5.5	Valor de t .....	91
CAPÍTULO IV .....		93
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		93
4.1	Conclusiones .....	93
4.2	Recomendaciones .....	94
Bibliografía.....		95
ANEXOS.....		97

## Índice de Tablas

Tabla 1-1: Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente ..5	5
Tabla 1-2: Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección .....6	6
Tabla 1-3: Radio capilar..... 15	15
Tabla 1-4: Valores para C y (fRe) para diferentes condiciones ..... 22	22
Tabla 1-5: Valores de la permeabilidad para distintos materiales, de relleno..... 26	26
Tabla 1-6: Dimensiones características de un relleno..... 28	28
Tabla 1-7: Producto $f_l Re_l$ , para un pasaje en forma de anillo circular ..... 30	30
Tabla 2-1: Probetas elaboradas primer ensayo ..... 46	46
Tabla 2-2: Probetas elaboradas segundo ensayo ..... 48	48
Tabla 2-3: Probetas elaboradas tercer ensayo ..... 51	51
Tabla 2-4: Probetas elaboradas cuarto ensayo..... 53	53
Tabla 2-5: Probetas elaboradas quinto ensayo ..... 55	55
Tabla 3-1: Mediciones termográficas tomadas en la fuente que va a generar calor para el análisis..... 62	62
Tabla 3-2: Mediciones termográficas tomadas variando el tiempo en cada medición en la configuración de 6 tubos de calor. .... 63	63
Tabla 3-3: Tabla de resultados obtenidos de la termografía en la configuración de 6 tubos..... 65	65
Tabla 3-4: Tabla de resultados obtenidos de la termografía en la configuración de 3 tubos..... 69	69
Tabla 3-5: Resultados obtenidos de la termografía en la configuración de 2 tubos ..... 71	71
Tabla 3-6: Mediciones termográficas con 2 tubos de calor en el quemador..... 72	72
Tabla 3-7: Resultados obtenidos de la termografía en la configuración de tubos..... 75	75

Tabla 3-8: Resultados obtenidos de la termografía en la configuración de 6 tubos en el calderin .....	76
Tabla 3-9: Resultados de comparación de temperaturas dadas .....	81
Tabla 3-10: Resultados de comparación de temperaturas dadas .....	83
Tabla 3-11: Resultados de comparación de temperaturas dadas .....	85
Tabla 3-12: Resumen de resultados de temperaturas.....	86
Tabla 3-13: Comparación de resultados de temperaturas Lado Caliente.....	86
Tabla 3-14: Comparación de resultados de temperaturas Lado Frío .....	87
Tabla 3-15: Comparación de resultados de temperaturas Lado Adiabático .....	87
Tabla 3-16: Verificación de las temperaturas promedios .....	90

## Índice de Figuras

Figura 1-1: Rango de la conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente .....	5
Figura 1-2: Parámetros principales de un tubo de calor.....	8
Figura 1-3: Tipos de relleno .....	11
Figura 1-4: Fuerzas sobre una semiesfera líquida .....	13
Figura 1-5: Altura capilar .....	14
Figura 1- 6: Diferentes presiones en un tubo de calor .....	16
Figura 1-7: Fuerzas sobre un elemento de corriente.....	17
Figura 1-8: Distribución de velocidades en una sección circular, régimen laminar .....	18
Figura 1- 9: Porción de malla. ....	27
Figura 1- 10: Esquema de llenado.....	33
Figura 2-1: Proceso de elaboración de las probetas de tubos de calor experimentales ...	37
Figura 2-2: Modelado 3D de la configuración de los tubos de calor.....	44
Figura 2-3: Edición de la Geometría.....	44
Figura 2-4: Pantalla inicial del modelo .....	45
Figura 2-5: Mallado - Mesh.....	45
Figura 3-1: Curva de la temperatura lado frío con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor.....	65
Figura 3-2: Curva de la temperatura lado caliente con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor.....	66
Figura 3-3: Curva de la temperatura lado adiabático con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor .....	66
Figura 3-4: Curva de la $\Delta T$ con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor.....	67

Figura 3-5: Curva de la temperatura lado frio con respecto al tiempo con 3 Tubos de Calor.....	69
Figura 3-6: Curva de la temperatura lado caliente con respecto al tiempo con 3 Tubos de calor.....	70
Figura 3-7: Curva de la temperatura lado adiabático con respecto al tiempo con 3 Tubos de Calor .....	70
Figura 3-8: Curva de la $\Delta T$ con respecto al tiempo con 3 Tubos de Calor.....	71
Figura 3-9: Curva de la temperatura lado frio con respecto al tiempo con 2 Tubos de Calor.....	73
Figura 3-10: Curva de la temperatura lado caliente con respecto al tiempo con 2 Tubos de calor .....	73
Figura 3-11: Curva de la temperatura lado adiabático con respecto al tiempo con 2 Tubos de calor .....	74
Figura 3-12: Curva de la temperatura promedio con respecto al tiempo con 2 Tubos de calor.....	74
Figura 3-13: Curva de la temperatura lado frio con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor en el Calderín. ....	76
Figura 3-14: Curva de la temperatura lado caliente con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor en el Calderin. ....	77
Figura 3-15: Curva de la temperatura lado adiabático con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor en el Calderin. ....	77
Figura 3-16: Curva de la temperatura promedio con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor en el Calderín. ....	78
Figura 3-17: Primera medición con el Haz de 6 Tubos de Calor. ....	79
Figura 3-18: Segunda medición con el Haz de 6 Tubos de calor.....	79
Figura 3-19: Tercera medición con el Haz de 6 Tubos de calor. ....	80

Figura 3-20: Cuarta medición con el Haz de 6 Tubos de calor. ....	80
Figura 3-21: Primera medición con el Haz de 3 Tubos de calor. ....	81
Figura 3-22: Segunda medición con el Haz de 3 Tubos de calor. ....	82
Figura 3-23: Tercera medición con el Haz de 3 Tubos de calor. ....	83
Figura 3-24: Primera medición con el Haz de 2 Tubos de calor. ....	84
Figura 3-25: Segunda medición con el Haz de 2 Tubos de calor. ....	85

## Índice de Ecuaciones

Ec. 1-1 Transferencia de calor por conducción .....	5
Ec. 1-2 Transferencia de calor por convección .....	6
Ec. 1-3 Transferencia de calor por radiación .....	7
Ec. 1-4 Factor de transporte .....	9
Ec. 1-5 Empuje de fluido .....	9
Ec. 1-6 Radio hidráulico .....	12
Ec. 1-7 Radio equivalente .....	12
Ec. 1-8 Capilaridad .....	12
Ec. 1-9 la diferencia de presión entre el interior y la presión atmosférica.....	13
Ec. 1-10 Altura de elevación .....	14
Ec. 1-11 Altura capilar 1 .....	14
Ec. 1-12 Altura capilar 2 .....	14
Ec. 1-13 Presión de vapor .....	16
Ec. 1-14 Presión del líquido .....	16
Ec. 1-15 Esfuerzo Cortante 1 .....	17
Ec. 1-16 Esfuerzo Cortante 2 .....	18
Ec. 1-17 Constante C .....	18
Ec. 1-18 Caudal Másico .....	18
Ec. 1-19 Ecuación Hagen-Poiseuille .....	19
Ec. 1-20 Ecuación caída de presión .....	19
Ec. 1-21 Diametro Equivalente .....	19
Ec. 1-22 Número de Reynolds.....	20
Ec. 1-23 Caudal Másico .....	20
Ec. 1-24 Número de Mach .....	21
Ec. 1-25 Velocidad sónica.....	21

Ec. 1-26 Velocidad de gas.....	21
Ec. 1-27 Caída de presión en el vapor .....	22
Ec. 1-28 Caída de presión en el líquido .....	23
Ec. 1-29 Permeabilidad .....	23
Ec. 1-30 Longitud Efectiva .....	23
Ec. 1-31 Caídas de presión debida a los efectos de la inercia.....	24
Ec. 1-32 Velocidad de vapor .....	24
Ec. 1-33 Caída hidrostática longitudinal.....	25
Ec. 1-34 Caída hidrostática transversal.....	25
Ec. 1-35 Número Mesh, N .....	27
Ec. 1-36 Radio capilar.....	27
Ec. 1-37 Diámetro equivalente del poro .....	27
Ec. 1-38 Área transversal de relleno .....	27
Ec. 1-39 Ecuación de Blake-Kozeny .....	28
Ec. 1-40 Ecuación de conductividad efectiva .....	28
Ec. 1-41 Radio capilar.....	28
Ec. 1-42 Permeabilidad .....	28
Ec. 1-43 Conductividad especifica para esferas empacadas .....	29
Ec. 1-1 Conductividad especifica si es material sinterizado.....	29
Ec. 1-45 Permeabilidad estructura del espacio anular.....	29
Ec. 1-46 cantidad máxima de fluido.....	33
Ec. 3-1 Grados de Libertad .....	89
Ec. 3-2 varianza de la muestra.....	91
Ec. 3-3 Varianza combinada .....	91
Ec. 3-4 Desviación estándar de las diferencias .....	91
Ec. 3-5 Valor de t.....	91

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

TEMA:

“ANÁLISIS TÉRMICO EN TUBOS DE CALOR EXPERIMENTALES APLICANDO TERMOGRAFÍA EN EL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA FICM”

Autor: Edwin Fabricio Medina López

Tutor: Ing. Mg. Luis Escobar

**RESUMEN EJECUTIVO**

El presente trabajo experimental, consiste en la elaboración de tubos de calor que servirán para el estudio y análisis de flujos de calor, que permitirán al investigador tener una mejor conceptualización de como es el funcionamiento de estos dispositivos; pues son elementos altamente conductivos, ya que pueden estar conformados en su interior por diferentes tipos y formas de materiales, llamados “mecha”, por el cual se conduce el fluido de trabajo.

Se realizaron tubos de calor de fabricación experimental, seleccionando cada uno de los materiales para su elaboración, así como también los porcentajes adecuados de polvo de cobre como de perlas de urea para someterlos al proceso de compactación, y de esta manera obtener la porosidad adecuada, realizando pruebas en el laboratorio de la FICM; aplicando técnicas de termografía, en los tubos de calor experimentales, tanto en la chimenea del calderin, como también en el quemador que dispone de 3 anillos que proporcionan la fuente de calor. Para su elaboración, se utilizaron equipos como: balanza electrónica para medir la cantidad y peso exacto de los materiales que se utilizaron, prensa manual donde se comprimieron las probetas aplicando la presión adecuada, horno con paredes refractarias que soporta hasta una temperatura de 1200°C, donde se ingresaron los tubos de calor para obtener la técnica de sinterizado, y cámara termográfica que proporcionó diferentes temperaturas tanto en la zona del evaporador, condensador y en la zona adiabática, de acuerdo a la variación en la configuración que se realizó con los tubos de calor.

**Palabras clave:** Mecha, sinterizado, termografía.

TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO  
FACULTY OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING

THEME:

“THERMAL ANALYSIS IN EXPERIMENTAL HEAT TUBES APPLYING THERMOGRAPHY IN THE FICM ENERGY LABORATORY”

Author: Edwin Fabricio Medina López

Tutor: Ing. Mg. Luis Escobar

**ABSTRACT**

The present experimental work consists in the elaboration of heat pipes that will be used for the study and analysis of heat flows, which will allow the researcher to have a better conceptualization of how these devices work; because they are highly conductive elements, since they can be formed inside by different types and forms of materials, called "wick", through which the working fluid is conducted.

Experimental heat pipes were made, selecting each one of the materials for its elaboration, as well as the appropriate percentages of copper powder and urea beads to be subjected to the compaction process, and thus obtain the appropriate porosity, performing tests in the FICM laboratory; applying thermography techniques, in the experimental heat pipes, both in the boiler chimney, as well as in the burner that has 3 rings that provide the heat source. For its elaboration, equipment was used such as: electronic balance to measure the exact quantity and weight of the materials that were used, manual press where the specimens were compressed applying the appropriate pressure, oven with refractory walls that supports up to a temperature of 1200°C , where the heat pipes were entered to obtain the sintering technique, and thermal imager that provided with different temperatures both in the evaporator, condenser and adiabatic zones, according to the variation in the configuration that was made with the heat pipes

**Keywords:** Wick, sintered, thermography.

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **1.1. Antecedentes Investigativos**

##### **1.1.1. Investigaciones preliminares**

La tecnología de tubos de calor, se caracteriza por generar un impacto positivo en la recuperación de la energía y en la disminución de la contaminación ambiental de efluentes gaseosos que se presentan diariamente en los procesos comúnmente conocidos en la industria, como el cementero, siderúrgico y petroquímico.

Los tubos de calor son implementados en las siguientes áreas:

En la industria del plástico, los tubos de calor son importantes en el moldeo e inyección, porque remueven el calor durante los procesos de solidificación, minimizando los choques térmicos por causa de enfriamiento prolongado de la pieza, y disminuyen el tiempo requerido para llevar a cabo la fabricación.

En la industria solar, los tubos de calor se han enfocado en los colectores solares para ayudar en la captación y transporte de la energía solar que se utiliza en la calefacción de aire para uso residencial, o en su defecto, para el almacenamiento de la energía en tanques de agua. [1]

En tanto, se pudo determinar que el modelo más simple originado en un tubo de calor es uniforme a lo largo de su superficie, el cual permitió validar la malla simétrica usada en el volumen de fluido portador, deducido del “Análisis del mecanismo de transferencia de calor en colectores solares térmicos y de influencia de las condiciones de contorno”, obteniendo un número de Nusselt promedio para la zona de flujo originado, el cual en comparación con un tubo con pared del conducto, la existencia del flujo de calor, genera

resultados positivos, demostrando que las temperaturas del absorbedor que influyen sobre el funcionamiento y eficiencia térmica, son las características geométricas y de operación. [2]

Finalmente se puede indicar que en el estudio titulado como “Análisis del material de la mecha en los tubos de calor y su influencia sobre la temperatura en la zona de condensado”, concluye que al aumentar el número de mallas de acero inoxidable o de cobre en el exterior de la zona adiabática, la temperatura disminuye, provocando lo contrario si se disminuye el número de mallas; obteniendo resultados positivos mientras más finos sean estos, donde la cantidad de volumen de fluido de trabajo es un parámetro muy importante del cual dependerá el tiempo de estabilización, tardando más tiempo en cambiar de fase si se tiene un fluido abundante, por lo que es de carácter primordial conocer los rangos de temperaturas a los que se exponen, influenciando de manera directa en los diferentes límites de operatividad. [3]

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general:**

Analizar térmicamente los tubos de calor de fabricación experimental aplicando termografía en el Laboratorio de Energía de la FICM.

### **1.2.2. Objetivos específicos:**

- Investigar las aplicaciones y funcionamiento de los tubos de calor utilizados con fluidos a altas temperaturas.
- Construir tubos de calor con materiales disponibles en el mercado local.
- Analizar la distribución de temperatura en los tubos de calor aplicando termografía infrarroja.
- Modelar la distribución de temperaturas en tubos de calor aplicando el Método de Elementos Finitos.

### **1.3. Justificación**

El presente proyecto radica su importancia en el aspecto ambiental, por los cambios de temperaturas originados en el planeta, por lo que el análisis experimental de tubos de calor aplicando termografía, brindaría ayuda al desarrollo de nuevas aplicaciones y funcionamientos a través de procesos tecnológicos, que disminuyen el efecto invernadero, provocado por la radiación térmica, de los gases que componen una determinada atmosfera como el dióxido de carbono CO<sub>2</sub>; analizando, seleccionando y mejorando los procesos energéticos determinados, pudiendo obtener hasta la caracterización de los tubos de calor, los cuales provocan absorción.

Se debe tener en cuenta que el proyecto genera un valor representativo en el ahorro de la energía, el cual, es un proceso de tipo térmico definido, que tiene al alcance la información bibliográfica necesaria para el análisis experimental propuesto, en base a equipos que se hallan en el laboratorio de energía de la facultad y materiales que se pueden encontrar de manera fácil en el mercado local y nacional, definiendo de esta manera su factibilidad.

Dentro de un sistema globalizado y competitivo de la industria de nuestro país, la utilización de recursos existentes, es la mejor iniciativa que se puede originar, para poder competir a nivel nacional e internacional, aportando al mejoramiento a la matriz productiva de manera directa e indirecta, con industrias que poseen máquinas eficientes con una aceptación adecuada y correcta, las cuales generan productos de mejor calidad, evitando que dichas maquinarias sufran averías originadas por un elevado aumento de temperatura, en los sistemas o mecanismo mecánicos como intercambiadores de calor, colectores solares, entre otras.

### **1.4. Fundamentación Teórica**

#### **1.4.1. Transferencia de calor**

Es la ciencia que estudia la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. [4]

La transferencia de calor en la ingeniería se ubica en:

- Intercambiadores de calor
- Calderas
- Condensadores
- Radiadores
- Calentadores
- Hornos
- Refrigeradores
- Colectores solares y otros. [4]

#### **1.4.1.1. Mecanismos de transferencia de calor**

Los mecanismos de transferencia de calor se dividen en tres modos diferentes:

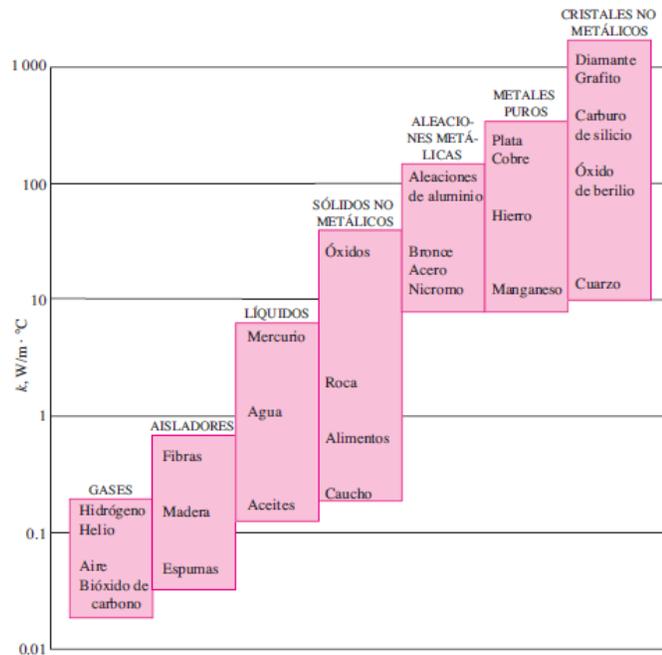
- **Conducción**, es la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas, como resultado originado por las interacciones entre partículas, pudiendo presentarse en los sólidos, presentadas en la combinación de vibraciones de moléculas en una retícula y transporte de energía originada por los electrones libres; líquidos y gases, la cual se origina en las colisiones y difusiones, durante su movimiento aleatorio, donde se generan propiedades como: [4]
- a) **La conductividad térmica**, que se define como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura, como los que se especifican en la Tabla 1-1, con un rango aceptable como la establecida en la Figura 1-1. [4]

**Tabla 1-1:** Conductividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente

Material	$k, \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}^*$
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.607
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

\*Multiplíquese por 0.5778 para convertir a Btu/h · ft · °F.

Fuente: [4]



**Figura 1-1:** Rango de la conductividad térmica de diversos materiales a la temperatura ambiente

Fuente: [4]

La conducción se obtiene de manera simplificada de la siguiente forma:

$$Q_{cond} = -KA \frac{dt}{dx} \quad \text{Ec. 1-2}$$

Donde:

- $Q_{cond}$  = Transferencia de calor por conducción[W]
  - $A$  = Área de la pared[m<sup>2</sup>]
  - $K$  = Conductividad Térmica[W/mk]
  - $\frac{dt}{dx}$  = Gradiente de temperatura[k]
- **Convección**, es la energía originada entre una superficie sólida y una líquida o gas, como los encontrados en la Tabla 1-2, dividiéndose estos en:
- Convección forzada**, si el fluido es forzado a fluir sobre una determinada superficie.
  - Convección natural o libre**, si el movimiento del fluido es originado por una fuerza de empuje inducidas por las diferencias de densidad. [4]

**Tabla 1-2:** Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección

Tipo de convección	$h$ , W/m <sup>2</sup> · °C*
Convección libre de gases	2-5
Convección libre de líquidos	10-1 000
Convección forzada de gases	25-250
Convección forzada de líquidos	50-20 000
Ebullición y condensación	2 500-100 000

\*Multiplíquese por 0.176 para convertir a Btu/h · ft<sup>2</sup> · °F.

**Fuente:** [4]

La convección se obtiene de manera simplificada de la siguiente forma:

$$Q_{conv} = hA\Delta t \quad \text{Ec. 1-3}$$

Donde:

- $Q_{conv}$  = Transferencia de calor por convección[W]
- $A$  = Área superficial[m<sup>2</sup>]
- $h$  = Coeficiente de transferencia de calor[W/m<sup>2</sup>K]
- $\Delta t$  = Diferencia de temperatura[K]

La convección se obtiene de manera simplificada de la siguiente forma:

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma A_S T_S^4 \quad \text{Ec. 1-4}$$

Donde:

- $Q_{rad}$  = Transferencia de calor por radiación [W]
- $\varepsilon$  = Emisividad
- $\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann [N/m<sup>2</sup>]
- $A_S$  = Área de la superficie[m<sup>2</sup>]
- $T_S$  = Temperatura de la superficie[K]

#### **1.4.2. Tubo de calor.**

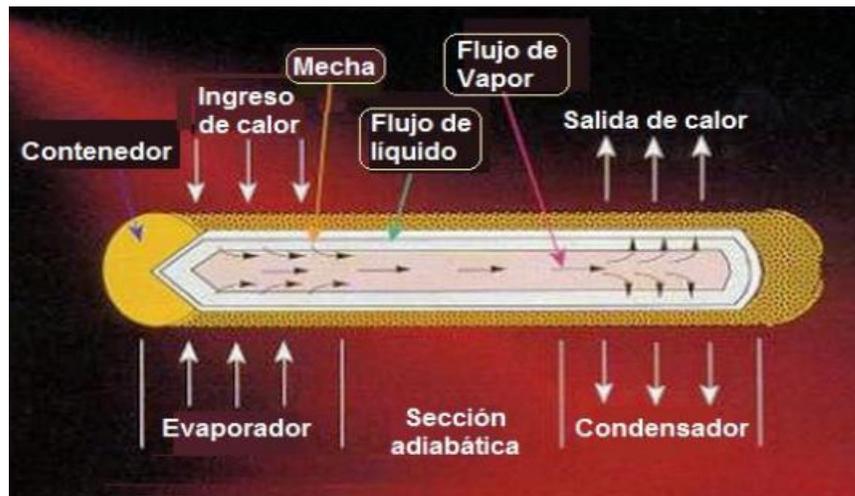
El tubo de calor se trata de un dispositivo térmico, que permite transportar cantidades relativamente grandes constituido por un material capilar con un fluido líquido, donde su funcionamiento radica en la zona de evaporación, cuando el líquido es calentado de manera externa, donde el vapor se transporta de hacia el condensado, finalizando su recorrido, a través de la entrega de calor a un determinado proceso industrial y en su retorno hacia la zona de evaporación, originado por la fuerza capilar que impone la membrana porosa, la cual es al responsable de incrementar la tensión superficial. [5]

##### **1.4.2.1. Parámetros de tubos de calor.**

Los parámetros a tener en cuenta en un tubo de calor son:

- **Contenedores**, sellado de una pared tubular.

- **Mecha**, la cual se trata de una estructura porosa.
- **Fluido de trabajo**
- **Longitud del tubo de calor**, dividida en tres partes:
  1. Evaporador.
  2. Sección adiabática.
  3. Condensador. [6]



**Figura 1-2:** Parámetros principales de un tubo de calor

Fuente: [6]

#### 1.4.2.2. Características de los fluidos de trabajo

- Debe ser una sustancia inerte con respecto al recipiente que lo contiene para evitar oxidaciones.
- Debe tener un calor latente de evaporación alto con la finalidad de que pequeñas masas de fluido transporten elevadas cantidades de energía latente.
- Elevada tensión superficial.
- Viscosidad baja. Estas dos últimas propiedades para mejorar el bombeo capilar del líquido a través del relleno poroso.

- Una conductividad térmica alta del líquido para hacer más pequeña la caída de temperatura en el evaporador y en el condensador.

Algunas de estas propiedades recogidas en un parámetro característico llamado factor de transporte,  $M$ , definido a partir de la expresión:

$$M = \frac{\rho_1 \sigma_1 h_{fg}}{\mu_1} \quad \text{Ec. 1-5}$$

Donde:

- $\rho_1$  es la densidad del líquido [kg/m<sup>3</sup>]
- $\sigma_1$  la tensión superficial del líquido [(kgm/s<sup>2</sup>)/m]
- $h_{fg}$  el calor latente de vaporización [J/kg]
- $\mu_1$  la viscosidad dinámica del líquido [kg/ms]

Las dimensiones de  $M$  son [W/m<sup>2</sup>] [7]

Otro parámetro característico es el empuje del fluido (también llamado altura del fluido),  $h$ , dado por la expresión:

$$h = \frac{\sigma_1}{\rho_1 g} \quad \text{Ec. 1-6}$$

Donde:

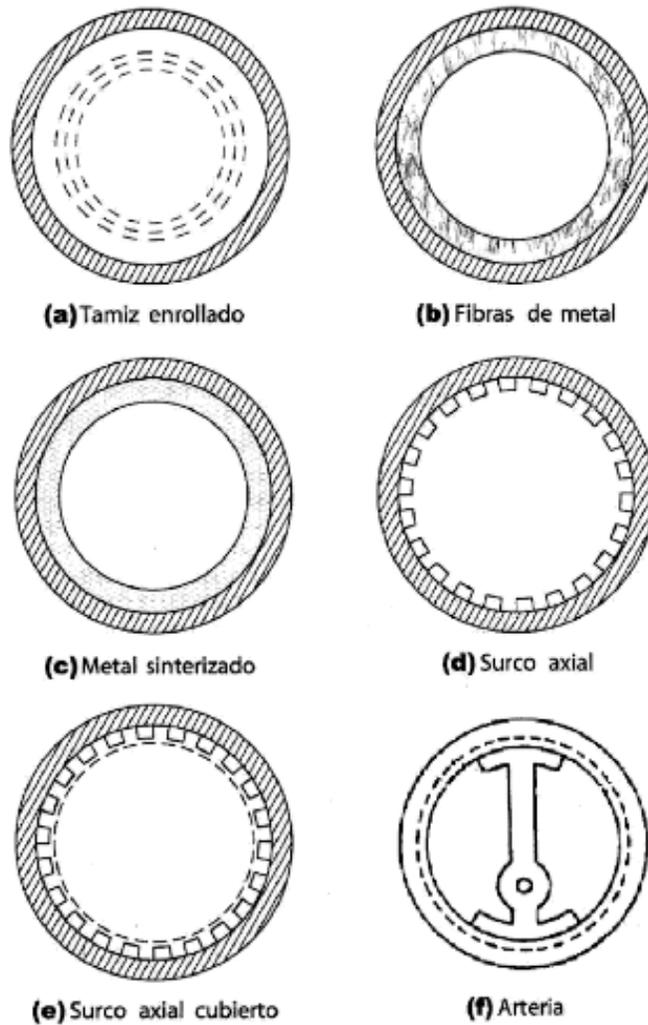
- $\rho_1$  es la densidad del líquido [kg/m<sup>3</sup>]
- $\sigma_1$  la tensión superficial del líquido [N/m]
- $g$  es la aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Las dimensiones de  $h$  son [m<sup>2</sup>]

### 1.4.2.3. Clasificación de los tubos de calor

Los tubos de calor pueden clasificarse en base a diferentes criterios como:

- La temperatura de trabajo
  1. Baja temperatura
  2. Media temperatura
  3. Alta temperatura [8]
- Según sus fluidos llamados:
  1. Conductancia fija, basada en un solo fluido
  2. Conductancia variable, basada en un fluido de trabajo y un gas no condensable. [8]
- Por el tipo de relleno
  1. Tamiz enrollado, el cual está constituido de una tela de alambre con una o más capas enrolladas de forma concéntrica.
  2. Relleno constituido por fibras metálicas.
  3. Relleno constituido por polvo sinterizado o esferas empacadas.
  4. Relleno constituido por espuma metálica.
  5. Surcos axiales cubiertos o descubiertos.
  6. De espacio anular
  7. Arteria transversal. [8]



**Figura 1-3:** Tipos de relleno

Fuente: [8]

- Del tipo homogéneo o heterogéneo, constituido por uno o más materiales.
- Por el tipo de fluido, esta clasificación está relacionada con la que hace referencia a las temperaturas:
  1. Temperaturas bajas para el nitrógeno y el helio.
  2. Temperaturas medias, útiles para agua, metanol, etanol y amoniaco, pero el más utilizado es el agua.
  3. Temperaturas altas para el potasio y el sodio. [8]

#### 1.4.2.4. Bombeo por capilaridad

En el estudio de tubos de calor, el vapor se desplaza siempre por la parte central del tubo de calor con una geometría cilíndrica de radio  $r_v$ . el desplazamiento del líquido es más complejo pues se lo puede hacer por a través de relleno de formas diversas, a través de surcos o canales.

El radio hidráulico ( $r_h$ ) de un canal no circular, se define a partir de la siguiente expresión:

$$r_h = \frac{A}{P} \quad \text{Ec. 1-7}$$

Siendo:

- A el área transversal del paso del fluido y [m<sup>2</sup>]
- P el perímetro mojado [m]

Si el canal fuera circular de radio ( $r$ ), el radio hidráulico sería:

$$r_h = \frac{A}{P} = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2}$$

Por tanto, el radio equivalente  $r_e$ , a un canal no circular no es el radio hidráulico sino:

$$r_e = 2r_h \quad \text{Ec. 1-8}$$

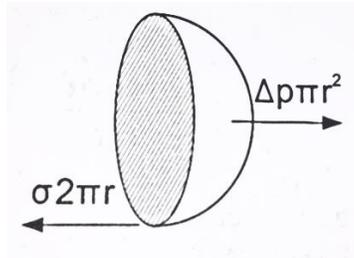
#### 1.4.2.5. Capilaridad

Si de forma virtual se separa una gota de agua en dos mitades, izquierda y derecha y consideramos las fuerzas que actúan sobre una mitad, la de la derecha tendremos por un lado la fuerza de tensión superficial que actuara a lo largo del perímetro de la lámina,  $2\pi r\sigma$  (ver Figura 1-4) y la diferencia de presiones en el interior y exterior que actuaran sobre la proyección de la superficie esférica sobre un plano vertical,  $\pi r^2\Delta p$ , por tanto

$$2\pi r\sigma = \pi r^2\Delta p \quad \text{Ec. 1-9}$$

Siendo

- $r$ , el radio de la gota [m]
- $\sigma$  la tensión superficial [N/m]
- $\Delta p$  la diferencia de presión entre el interior y la presión atmosférica [Pa]



**Figura 1-4:** Fuerzas sobre una semiesfera líquida

Fuente: [8]

De donde podremos obtener:

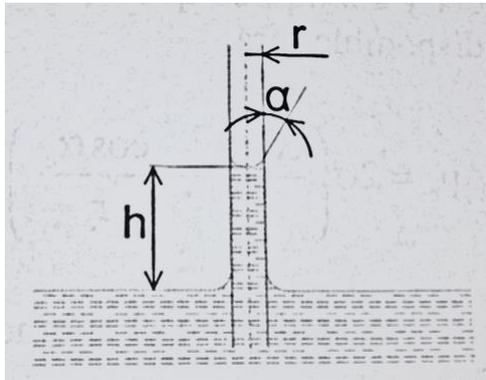
$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} \quad \text{Ec. 1-10}$$

Cuando no se trata de una superficie esférica podemos aproximar el elemento de superficie a un (parche neumático) con dos radios de curvatura distintos  $r_1$  y  $r_2$  distintos entre sí. En este caso la diferencia de presiones viene dada por

$$\Delta p = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

Para un cilindro uno de los radios de curvatura sería infinito y para una porción esférica  $r_1 = r_2$ .

Uno de los efectos de la capilaridad es la elevación del líquido en un tubo capilar sumergido en un líquido humectante o la de presión en el caso que no moje las paredes del tubo. En la Figura 1-5 en esquema de la situación planteada con líquido humectante. El equilibrio de presión se cumplirá:



**Figura 1-5:** Altura capilar  
Fuente: [8]

Donde:

$$h = \frac{2\sigma \cos\alpha}{\rho_1 g r} \quad \text{Ec. 1-11}$$

Siendo:

- $h$  la altura de elevación [m]
- $r$  el radio del capilar [m]
- $\rho_1$  la densidad del líquido [ $\text{kg/m}^3$ ]

#### 1.4.2.6. Altura Capilar disponible

La altura capilar disponible será:

$$\Delta p_c = 2\sigma \left( \frac{\cos\alpha_e}{r_c} - \frac{\cos\alpha_c}{r_c} \right) \quad \text{Ec. 1-12}$$

Siendo  $r_c$  l radio capilar, indicando con el subíndice e el evaporador y con el c el condensador.

El máximo valor disponible lo tendremos con  $\alpha_e = 0^\circ$  y  $\alpha_c = 90^\circ$ , por lo tanto, la altura capilar máxima, será:

$$\Delta p_c = \frac{2\sigma}{r_c} \quad \text{Ec. 1-13}$$

En la tabla siguiente, se indican los radios capilares de algunos materiales homogéneos utilizados como relleno en los tubos de calor.

**Tabla 1-3:** Radio capilar

<b>Tipos de relleno</b>	<b>Radio capilar (mm)</b>
Surcos axiales	0,25 a 1,5
Fibras o polvo metálico sinterizado	0,01 a 0,1
Tela de alambre 30	0,43
Tela de alambre 100	0,12
Tela de alambre 200	0,063

Fuente: [8]

### 1.4.3. Caídas de presión

El tubo de calor puede estar en posición horizontal o inclinada, con el evaporador situado en la parte superior. Si el evaporador está en la parte superior, el líquido tiene que fluir únicamente por capilaridad sin contar con la gravedad. En la siguiente Figura, se representa el esquema de un tubo de calor inclinado con un ángulo  $\phi$  con el evaporador en la parte inferior.

Utilizaremos el siguiente convenio de signos:

$\phi$  Positivo: el evaporador situado en la parte superior

$\phi$  Negativo: el evaporador situado en la parte inferior

Deberá cumplirse,

$$Pv_1 - Pv_2 = \Delta p_v + \Delta p_i \quad \text{Ec. 1-14}$$

Siendo

$Pv_1$  la presión de vapor en el evaporador [Pa]

$Pv_2$  la presión de vapor en el condensador [Pa]

$\Delta p_v$  la caída de presión del vapor [Pa]

$\Delta p_i$  la caída de presión debido a los cambios de velocidad [Pa]

$$Y \quad P_{12} - P_{11} = \Delta P_1 - \Delta P_{g,t} - \Delta P_{g,l} \quad \text{Ec. 1-15}$$

Siendo

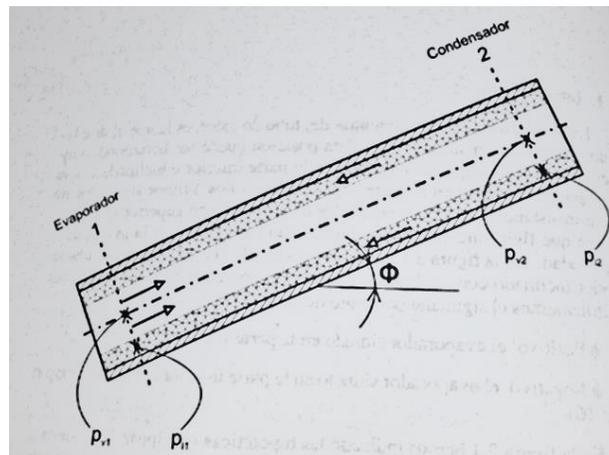
$P_{12}$  la presión del líquido en el condensador [Pa]

$P_{11}$  la presión del líquido en el evaporador [Pa]

$\Delta P_1$  la caída de presión del líquido [Pa]

$\Delta P_{g,t}$  la caída hidrostática transversal y [Pa]

$\Delta P_{g,l}$  la caída hidrostática longitudinal [Pa]



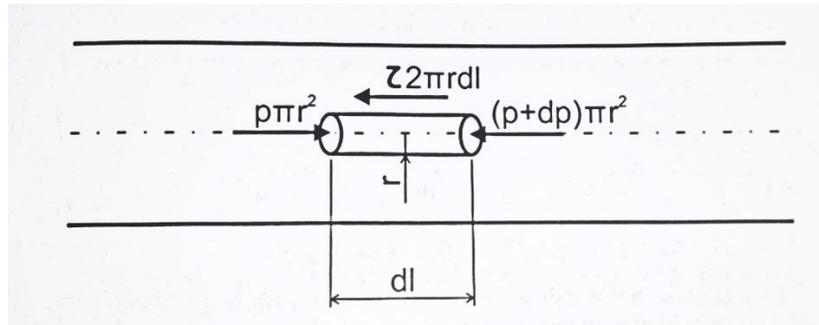
**Figura 1- 6:** Diferentes presiones en un tubo de calor

Fuente: [8]

### 1.4.3.1. Caídas de presión por fricción

#### Ecuación de Poiseuille

Si consideramos las fuerzas que actúan en un elemento libre de fluido de forma cilíndrica, con radio  $r$  y longitud  $dl$ , en régimen de flujo laminar con un sentido de circulación de izquierda a derecha tendremos.



**Figura 1-7:** Fuerzas sobre un elemento de corriente  
Fuente: [8]

Fuerza de rozamiento sobre la superficie exterior del elemento hacia la izquierda (contraria al movimiento):  $\tau 2\pi r dl$ .

Fuerza resultante hacia la derecha debido a la presión:  $[(p+dp)-p] \pi r^2$

Siendo

- $\tau$  el esfuerzo cortante
- $p$  la presión [kPa]

Deberá cumplirse,

$$\tau 2\pi r dl = [(p + dp) - p] \pi r^2$$

de donde,

$$\tau = -\frac{dp}{dl} \frac{r}{2} \quad \text{Ec. 1-16}$$

La ley de Newton relaciona el esfuerzo cortante con el gradiente de velocidad,

$$\tau = -\mu \frac{dc}{dr} \quad \text{Ec. 1-17}$$

Siendo  $\mu$  la viscosidad dinámica. Combinando (1-15) y (1-16) se obtiene,

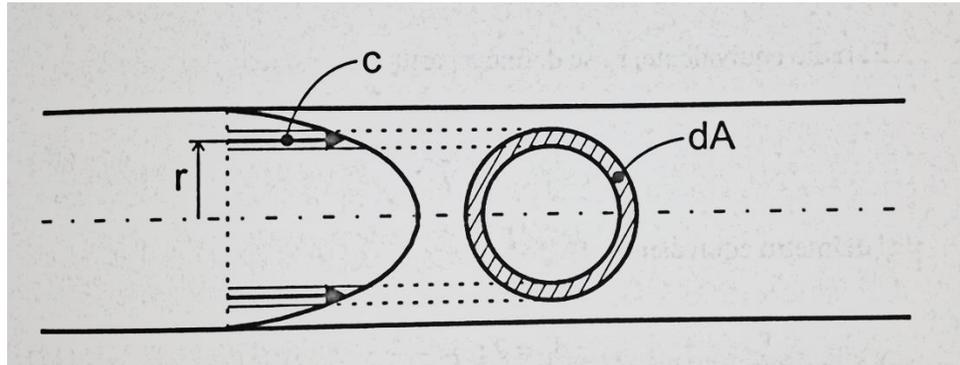
$$\mu \frac{dc}{dr} = \frac{dp}{dl} \frac{r}{2}$$

Ecuación que podemos integrar desde  $r = r_0$ ,  $c = 0$  hasta  $r$  y  $c$  obteniendo,

$$c = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dl} (r^2 - r_0^2) \quad \text{Ec. 1-18}$$

Esta expresión nos indica un perfil parabólico para la distribución radial de velocidades en una sección.

El caudal másico  $\dot{m}$  lo obtendremos aplicando la ecuación de continuidad a la sección circular de paso, considerando una porción elemental del área con una forma de corona circular, como se muestra en la figura.



**Figura 1-8:** Distribución de velocidades en una sección circular, régimen laminar

Fuente: [8]

$$\dot{m} = \int_{r=0}^{r=r_0} c \rho 2\pi r dr \quad \text{Ec. 1-19}$$

Sustituyendo (1.17) en la (1.18) e integrando se obtiene

$$\dot{m} = -\frac{1}{8\mu} \frac{dp}{dl} \rho \pi r_0^4$$

si admitimos una caída  $\Delta p$  para un tramo  $L$  tendremos,

$$\dot{m} = -\frac{1}{8\mu} \frac{\Delta p}{L} \rho \pi r_0^4$$

y despejando  $\Delta p$ ,

$$\Delta p = -\frac{8\mu L \dot{m}}{\rho \pi r_0^4} \quad \text{Ec. 1-20}$$

Ecuación que recibe el nombre de Hagen-Poiseuille valida solamente si el régimen es laminar.

De forma más general podemos determinar que la caída de presión por rozamiento es una ecuación del tipo.

$$\Delta p = 2f\rho \frac{L}{d_e} c^2 \quad \text{Ec. 1-21}$$

Donde

- $f$  es el factor de fricción y
- $d_e$  el diámetro equivalente del conducto [m]

El diámetro equivalente está relacionado con el radio hidráulico,  $r_h$

$$r_h = \frac{A}{P}$$

El radio equivalente,  $r_e$ , se define a partir de,

$$r_e = 2r_h = \frac{2A}{P}$$

Y el diámetro equivalente,  $d_e$ ,

$$d_e = 2r_e = \frac{4A}{P} \quad \text{Ec. 1-22}$$

En el caso de un canal constituido por el espacio comprendido entre dos cilindros concéntricos de diámetro  $d_1$  y  $d_2$ , el diámetro equivalente sería.

$$d_e = \frac{4A}{P} = \frac{4\left[\left(\frac{\pi}{4}\right)d_2^2 - \left(\frac{\pi}{4}\right)d_1^2\right]}{\pi d_2 + \pi d_1}$$

Teniendo en cuenta que el número de Reynolds vale,

$$R_e = \frac{d_e \rho c}{\mu} \quad \text{Ec. 1-23}$$

Y reorganizando la ecuación 1.20

$$\Delta p = 2f \frac{d_e \rho c}{\mu} \rho \frac{L}{d_e} c^2 \frac{\mu}{d_e \rho c}$$

Tendremos,

$$\Delta p = 2f R_e \frac{L c \mu}{d_e^2}$$

Y dado que,

$$\dot{m} = c \rho A \quad \text{Ec. 1-24}$$

siendo

- $\dot{m}$  el caudal másico de fluido
- $A$  el área transversal del paso de fluido. [ $\text{m}^2$ ]

Finalmente,

$$\Delta p = 2f R_e \frac{L \dot{m} \mu}{A \rho d_e^2}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} h_{fg}$$

Siendo  $h_{fg}$  el calor latente, tendremos, [kJ/kg]

$$\Delta p = \frac{2CfL\dot{Q}\mu}{A\rho d_e^2 h_{fg}}$$

Recordemos que el número de Mach es la relación,

$$Ma = \frac{C}{C_s} \quad \text{Ec. 1-25}$$

Siendo,

- $C$  la velocidad del gas y [m/s]
- $C_s$  la velocidad sónica, que vale, [m/s]

$$C_s = (k R' T)^{1/2} \quad \text{Ec. 1-26}$$

Siendo

- $k$  el cociente de  $C_p/C_v$ 
  - $C_p$  el calor específico a presión constante, [ J/Kg. °K]
  - $C_v$  el calor específico a volumen constante, [ J/Kg. °K]
- $R'$  la constante específica del gas ( $R' = R/M$ ),
- $R$  la constante universal de los gases ( $R= 8314$  J/kmol K) y
- $M$  la masa molecular del gas [mol] [8]

La velocidad del gas puede relacionarse con la tasa de calor,

$$C = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{\dot{Q}}{\rho A h_{fg}} \quad \text{Ec. 1-27}$$

Con el número de Mach sería,

$$Ma = \frac{\dot{Q}}{\rho A h_{fg} (k R' T)^{\frac{1}{2}}}$$

### 1.4.3.2. Caída de presión en el vapor

Aplicaremos la expresión (1-28),

$$\Delta p_v = \frac{2C f_v Re_v L_{ef} \dot{Q} \mu_v}{A_v \rho_v d_v^2 h_{fg}} \quad \text{Ec. 1-28}$$

Siendo

$L_{ef}$  la longitud efectiva del recorrido del vapor. [m]

El Reynolds es,

$$Re_v = \frac{\rho_v d_v c_v}{\mu_v} = \frac{\dot{m} d_v}{\mu_v A_v} = \frac{\dot{Q} d_v}{\mu_v A_v h_{fg}}$$

Según el tipo de régimen y el grado de compresibilidad, podemos utilizar los siguientes valores de  $C$  y ( $fRe$ ) [9] que se indican en la tabla a continuación.

**Tabla 1-4:** Valores para  $C$  y ( $fRe$ ) para diferentes condiciones

$C$	$f_v Re_v$	Condiciones
1	16	$Re < 2300$ y $Ma < 0,2$
$[1+0,5(k-1)Ma^2]^{-0,5}$	16	$Re < 2300$ y $Ma > 0,2$
1	$0,038 Re^{0,75}$	$Re > 2300$ y $Ma < 0,2$
$[1+0,5(k-1)Ma^2]^{-0,5}$	$0,038 Re^{0,75}$	$Re > 2300$ y $Ma < 0,2$

Fuente: [8]

### 1.4.3.3. Caída de presión en el líquido

En el caso del líquido se tiene régimen laminar, y el único problema radica en que el líquido fluya por un canal o conducto de forma libre o a través de una red capilar. Para tener en cuenta todas las posibilidades aplicaremos la ecuación (1-27), con una pequeña variación.

$$\Delta p_1 = \frac{2f_1 Re_1 L_{ef} \dot{Q} \mu_1}{\varepsilon A_1 \rho_1 d_{el}^2 h_{fg}} \quad \text{Ec. 1-29}$$

Donde:

- $\varepsilon$  es la porosidad un factor que aplicado al área transversal del relleno.
- $d_{el}$  es el diámetro equivalente del área transversal del relleno y, [m]
- $A_1$  es el área transversal de relleno, que coincidirá con la del paso del líquido cuando  $\varepsilon = 1$  [m<sup>2</sup>].

Si se introduce el concepto de la permeabilidad,  $\kappa$ ,

$$\kappa = \frac{\varepsilon d_{el}^2}{2f_1 Re_1} \quad \text{Ec. 1-30}$$

Y sustituimos en (1-35) se obtiene,

$$\Delta p_1 = \frac{L_{ef} \dot{Q} \mu_1}{\kappa A_1 \rho_1 h_{fg}}$$

La determinación de la permeabilidad se verá en el capítulo correspondiente a las características de relleno.

#### 1.4.3.4. Longitud efectiva

En las caídas de presión por fricción correspondientes al vapor, aparece la longitud efectiva del tubo de calor, que se define a partir de

$$L_{ef} = 0,5L_e + L_a + 0,5L_c \quad \text{Ec. 1-31}$$

Donde:

$L_e$  es la longitud del evaporador, [m]

$L_a$  la longitud del tramo adiabático y [m]

$L_c$  la longitud del condensador [m]

#### 1.4.3.5. Caídas de presión debida a los efectos de la inercia

La aceleración del vapor que sale del evaporador para que adquiera su velocidad axial requiere un consumo de presión que tendrá que añadirse a la lista de caídas de presión que se alimenta de la presión de capilaridad. Parte de esta pérdida de presión, llamada inercia, se recupera en el condensador.

$$\Delta p_i = \frac{\rho_v C_v^2}{2g} \left[ 3,11 - \frac{0,68 Re_v}{\left(\frac{29L_c}{d_v}\right) + Re_v} \exp\left(\frac{-60L_a}{Re_v d_v}\right) \right] \quad \text{Ec. 1-32}$$

Donde,

$C_v$  es la velocidad de vapor, [m/s<sup>2</sup>]

$\rho_v$  la densidad del vapor, [kg/m<sup>3</sup>]

$d_v$  el diámetro del paso de vapor y [m]

$Re_v$  el Reynolds del vapor

La velocidad de vapor se determina a partir de,

$$C_v = \frac{\dot{m}}{A_v \rho_v} = \frac{\dot{Q}}{A_v \rho_v h_{fg}} \quad \text{Ec. 1-33}$$

Sustituyendo  $C_v$  en (1-37) se obtiene,

$$\Delta p_i = \frac{\dot{Q}^2}{2g A_v^2 \rho_v h_{fg}^2} \left[ 3,11 - \frac{0,68 Re_v}{\left(\frac{29L_c}{d_v}\right) + Re_v} \exp\left(\frac{-60L_a}{Re_v d_v}\right) \right]$$

Probablemente  $\left(\frac{29L_c}{d_v}\right) + Re_v \cong Re_v$  y entonces,

$$\Delta p_i = \frac{\dot{Q}^2}{2g A_v^2 \rho_v h_{fg}^2} \left[ 3,11 - 0,68 \exp\left(\frac{-60L_a}{Re_v d_v}\right) \right]$$

Teniendo en cuenta la expresión de Reynolds, se determina de la siguiente manera:

$$Re_v = \frac{\dot{Q}d_v}{\mu_v A_v h_{fg}}$$

Quedaría,

$$\Delta p_i = \frac{\dot{Q}^2}{2gA_v^2 \rho_v h_{fg}^2} [3,11 - 0,68 \exp(\frac{-60L_a \mu_v A_v h_{fg}}{\dot{Q}d_v^2})]$$

#### 1.4.3.6. Caídas de presión hidrostáticas.

Si el líquido está influenciado por la gravedad tendremos que considerar estas caídas de presión.

##### a. Caída hidrostática longitudinal.

Viene dada por la expresión,

$$\Delta p_{g,l} = \rho_l g L \text{Sen} \phi \quad \text{Ec. 1-34}$$

Donde  $\rho_1$  es la densidad del liquido, [kg/m<sup>3</sup>]

L la longitud neta del tubo de calor [m]

g la gravedad y [m/s<sup>2</sup>]

$\phi$  el ángulo que forma el eje longitudinal del tubo de calor con la horizontal.

##### b. Caída hidrostática transversal.

Viene dada por la expresión,

$$\Delta p_{g,t} = \rho_l g d_v \text{cos} \phi \quad \text{Ec. 1-35}$$

Donde  $d_v$  es el Diámetro del pasaje del vapor en el tubo de calor. [8]

#### 1.4.4. Características del relleno

La presión de bombeo es la suma de la presión capilar más las hidrostáticas, con su signo correspondiente.

El relleno del tubo de calor es la parte principal por cuanto garantiza el retorno del líquido al evaporador. Se necesita un tamaño de poro pequeño en la región del evaporador para garantizar una presión de bombeo alta, necesitamos una viscosidad del líquido baja para que la caída de presión del líquido sea baja.

Las características fundamentales del relleno son la *permeabilidad* y la *porosidad*, que se verán con mayor detalle a continuación.

Los valores de la permeabilidad pueden obtenerse por vía experimental, como se puede apreciar en la tabla siguiente.

**Tabla 1-5:** Valores de la permeabilidad para distintos materiales, de relleno

Tipo de relleno	Radio Capilar (mm)	$K \times 10^{10} (m^2)$	$\epsilon$
Fibras metálicas sinterizadas	0,034 - 0,041	2,0 - 11,6	0,81 - 0,83
Polvo metálico sinterizado	0,01 - 0,1	0,1 - 10	–
Tela de alambre:			
N° de Mesh = 1181	0,43	25	0,59
N° de Mesh = 2938	0,12	1,8	0,68
N° de Mesh = 7876	0,063	0,55	0,89
Surco axial	0,25 - 1,5	0,1 - 10	1

Fuente: [8]

##### 1.4.4.1. Tela de alambre <<Screen Mech>>

El relleno consiste en varias capas de tela de alambre como se indica, con un tamaño de poro  $w$  y un diámetro de alambre  $d_w$ . Se define, el número define una característica básica de este relleno, el número de malla o el número de **Mesh**, **N**, como el número de aberturas o poros por unidad de longitud. Deberá cumplirse,

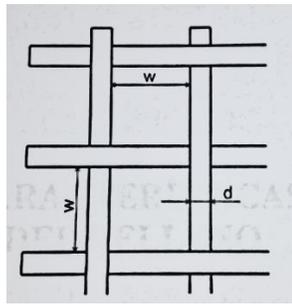
$$N(w + d_w) = 1 \quad \text{Ec. 1-36}$$

El radio capilar según [10] es,

$$r_c = \frac{w+d_w}{2} = \frac{1}{2N} \quad \text{Ec. 1-37}$$

y el diámetro equivalente del poro,  $d_c$ , que se define,

$$d_c = w = d_c - d_w \quad \text{Ec. 1-38}$$



**Figura 1- 9:** Porción de malla.

**Fuente:** [8]

El área transversal de relleno (no debe interpretarse como área transversal de paso del líquido) es,

$$A_r = \left(\frac{\pi}{4}\right)(d_i^2 - d_v^2) \quad \text{Ec. 1-39}$$

Siendo,

$d_i$  el diámetro interior del tubo de calor [m]

$d_v$  el diámetro del espacio cilíndrico interior por el que circula el vapor. [m]

La permeabilidad se calcula mediante una formula empírica [11],

$$k = \frac{d_w^2 \varepsilon^3}{122(1 - \varepsilon)^2}$$

Siendo  $d_w$  el diámetro del alambre el aparece como  $d$ ;  $\varepsilon$  es la porosidad que viene dada por la expresión, una forma modificada de la ecuación de Blake-Kozeny,

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi 1,05 N d_w}{4} \quad \text{Ec. 1-40}$$

Otra característica importante del relleno es la conductividad efectiva; se trata de una conductividad equivalente del conjunto formado por la parte solida del relleno y el líquido que lo atraviesa, según [10] para la tela de alambre vale,

$$k_{ef} = \frac{k_l[(k_l+k_w)-(1-\varepsilon)(k_l-k_w)]}{(k_l+k_w)+(1-\varepsilon)(k_l-k_w)} \quad \text{Ec. 1-41}$$

En la tabla a continuación se muestran algunas dimensiones típicas relacionadas con el relleno de tela de alambre [9] que no puede utilizarse de forma generalizada sino únicamente orientativa puesto que no se trata de medidas estandarizadas.

**Tabla 1-6:** Dimensiones características de un relleno

N	$d_w$ (mm)	w(mm)	$\varepsilon$	k (m <sup>2</sup> )
315	0,71	2,46	0,8156	6,5892 x 10 <sup>-8</sup>
472	0,58	1,54	0,7742	2,5108 x 10 <sup>-8</sup>
630	0,46	1,13	0,7610	1,3384 x 10 <sup>-8</sup>
709	0,43	0,98	0,7486	1,0058 x 10 <sup>-8</sup>
1181	0,34	0,51	0,6689	2,5858 x 10 <sup>-9</sup>
1969	0,23	0,28	0,6265	7,6457 x 10 <sup>-10</sup>
3937	0,11	0,14	0,6429	2,0658 x 10 <sup>-10</sup>

Fuente: [8]

#### 1.4.4.2. Esferas empacadas, metal sinterizado

El relleno es un material constituido por pequeños gránulos esféricos de radio menor  $r_s$

El radio capilar viene dado por la expresión [12] ,

$$r_c = 0,41r_s \quad \text{Ec. 1-42}$$

La permeabilidad,

$$k = \frac{r_s^2 \varepsilon^3}{37,5(1-\varepsilon)^2} \quad \text{Ec. 1-43}$$

Para la porosidad deben utilizarse valores empíricos proporcionados por el fabricante.

La conductividad efectiva si se trata de esferas empaçadas,

$$k_{ef} = \frac{k_1[(2k_1+k_w)-2(1-\varepsilon)(k_1-k_w)]}{2k_1+k_w+(1-\varepsilon)(k_1-k_w)} \quad \text{Ec. 1-44}$$

O si se trata de metal sinterizado,

$$k_{ef} = \frac{k_1[(2k_w+k_1)-2\varepsilon(k_w-k_1)]}{2k_w+k_1+\varepsilon(k_w-k_1)} \quad \text{Ec. 1-45}$$

#### 1.4.4.3. Estructura del espacio anular.

Se prefiere la denominación de estructura en lugar de relleno. El líquido discurre por un espacio anular limitado por la pared interior del tubo de calor y una red o malla que hace de separación con el canal de vapor.

Llamaremos  $d_{ex}$  el diámetro exterior del espacio anular y  $d_i$  el diámetro interior. El diámetro equivalente será.

$$r_c = 0,41r_s = 0,41 \times 0,00012 = 0,0000492m$$

La permeabilidad se puede determinar a partir de,

$$k = \frac{d_e^2}{2(f_1Re_1)} \quad \text{Ec. 1-46}$$

La porosidad valdría la unidad.

El producto ( $f Re$ ) puede obtenerse a partir de unos gráficos [9] , sin embargo, para los valores usuales (relaciones  $r_i/r_e > 0,4$ ) puede tomarse el valor constante de 24.

Si se trata de un canal libre en forma de anillo circular puede utilizarse los valores indicados en la tabla siguiente:

**Tabla 1-7:** Producto  $f_1 Re_1$ , para un pasaje en forma de anillo circular

$r_2/r_1$	$f_1 Re_1$
0	16,00
0,1	21,80
0,2	23,05
0,3	23,51
0,4	23,75
0,5	23,91
0,6	24,00
0,7	24,00
0,8	24,00
0,9	24,00
1	24,00

Fuente: [8]

#### 1.4.5. Fabricación de esponjas de cobre por pulvimetalurgia

Se presenta un método de fabricación de esponjas de cobre por pulvimetalurgia, empleando perlas de urea como formadores de poros que son removidas por disolución en agua antes de sinterizar el compacto. Este método permite un control preciso de las características de las celdas (tamaño, forma y distribución), obteniéndose una porosidad de celdas interconectadas.

#### **Materiales y procedimiento**

Los materiales que se utilizaron fueron:

- Polvo de cobre
- Perlas de urea

- Etilenglicol

### **Procedimiento:**

La urea es un compuesto químico cristalino e incoloro, de fórmula  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ . Es soluble en agua y en alcohol. El 90% de la urea producida se emplea como fertilizante y se comercializa en forma de perlas. Se trata de una materia prima económica y fácil de conseguir por su gran uso en otras áreas industriales. El proceso para formar las esponjas tiene como primera etapa el recubrimiento de las perlas de urea con cobre en polvo marca Alfa Aesar 99%, con un tamaño de partícula menor a  $44 \mu\text{m}$ . Para ello se humedeció la urea con etilenglicol para favorecer la adherencia del metal a las mismas y se mezcló manualmente agregando suficiente metal para lograr un recubrimiento parejo a la vista. Se colocó esta mezcla en una matriz de 1 pulgada y se efectuó un prensado uniaxial a presiones entre 180 MPa y 250 MPa. Las pastillas así obtenidas se sumergieron en agua a  $60^\circ\text{C}$  durante 1 hora para remover la urea por disolución y obtener una estructura verde de porosidad abierta. Luego del secado al aire por 24 horas se sinterizaron a  $900^\circ\text{C}$  durante 2 horas. Debido a que el cobre se oxida fácilmente con el aumento de la temperatura, se ensayaron 2 atmósferas diferentes durante el sinterizado: argón y Ar-10% H<sub>2</sub> (atmósfera reductora).

### **1.4.6. Fabricación**

La fabricación y montaje de tubos de calor son importantes tanto para el cálculo y diseño, un tubo de calor nunca podrá funcionar según dichas condiciones si no se han tenido en cuenta especificaciones relativas a la limpieza de los diferentes componentes y una correcta carga del fluido de trabajo, donde es muy importante la carga del producto y la presión.

#### **1.4.6.1. Elementos constructivos básicos**

Los elementos básicos son:

- **Envoltura.** La forma cilíndrica es la más común, pero no es la única. Los materiales más comunes son el cobre, el aluminio y el acero inoxidable.

- **Tapón de cierre.** Está situado al otro lado del tubo de llenado y proporciona el cerrado natural del tubo de calor. Puede ir soldado o incluso construir un todo con las paredes del cilindro.
- **Tubo de llenado.** Permite la carga y la limpieza previa del tubo de calor, una vez montado el tubo puede eliminarse.
- **Relleno.** Es la parte más importante del tubo de calor forma parte de la envoltura, es un elemento independiente que debe ser introducido en el tubo una vez que se le ha dado la forma conveniente para que pueda entrar.
- **Fluido de trabajo.** Los más habituales son el agua, el amoníaco, el metanol, el etanol, para temperaturas medias, el potasio y el sodio para temperaturas altas, el nitrógeno y el helio para aplicaciones criogénicas. La pureza del producto es esencial para garantizar el buen funcionamiento del tubo de calor.

#### 1.4.6.2. Limpieza y montaje

La limpieza de los diferentes elementos es esencial, la presencia de impurezas sólidas, líquidas o gaseosas alteraran negativamente el funcionamiento del tubo de calor. Las sustancias en estado líquido o sólido pueden disolverse en el fluido de trabajo alterando sus propiedades coligativas o producir tapones en el relleno poroso, disminuyendo la capilaridad. Debe proceder a una limpieza exhaustiva que comprenderá los siguientes procesos:

- Desengrase con un disolvente.
- Eliminación de partículas sólidas mediante la utilización de un disolvente, previo al cepillado o simple agitación mecánica.
- Desoxidación mediante un tratamiento de reducción.
- Eliminación de los gases no condensables mediante la purga y evacuación.

El montaje consta básicamente de la introducción de relleno que puede hacerse, mediante un pequeño tubo portador, retirándolo más tarde, la soldadura del tapón de cierre en la envoltura, la colocación y soldadura del tubo de llenado y a continuación proceder a los pasos que constituyen la delicada operación de purga y llenado con fluido de trabajo.

### 1.4.6.3. Evacuación y carga

Se presenta un esquema de la instalación básica para proceder a la evacuación de los gases no condensables y el llenado del fluido de trabajo. Con la válvula A cerrada y las válvulas B y C abiertas, se procede a un primer bombeado a la temperatura ambiente. Después el tubo de calor se calienta hasta una temperatura que depende del material y se procede a un segundo bombeado. A continuación, se lleva a cabo la limpieza con un poco de fluido por lo que deberá abrirse la válvula A.

Para cargar definitivamente el fluido de trabajo se cerrará la válvula B y se abrirán la válvula A y C. La cantidad de gas introducida se medirá mediante la presión indicada por un manómetro, teniendo en cuenta la temperatura a la que se hace el proceso.

La cantidad de fluido no debe ser menor a la requerida pues causaría una disminución en la eficiencia del tubo de calor, ni superior pues tendríamos problemas en la condensación.

El límite máximo puede establecerse mediante la ecuación:

$$m = A_v L \rho_v + A_r L \varepsilon \rho_l \quad \text{Ec. 1-47}$$

Siendo:  $A_v$  el área transversal del paso del vapor [m<sup>2</sup>]

$L$  la longitud del tubo de calor [m]

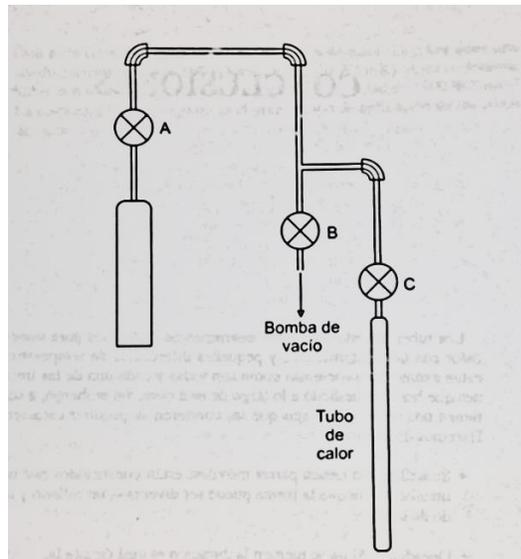
$\rho_v$  la densidad del vapor [kg/m<sup>3</sup>]

$A_r$  el área transversal del relleno poroso [m<sup>2</sup>]

$\varepsilon$  la porosidad

$\rho_l$  la densidad del líquido [kg/m<sup>3</sup>]

$m$  la cantidad máxima de fluido [kg]



**Figura 1- 10:** Esquema de llenado.  
**Fuente:** [8]

## 1.5. Hipótesis

La variación en la configuración en arreglos de los tubos de calor permitirá obtener diferentes distribuciones de temperatura.

## 1.6. Señalamiento de variables

### 1.6.1. Variable independiente

Variación en la configuración de los tubos de calor

### 1.6.2. Variable dependiente

Distribuciones de temperatura

### 1.6.3. Término de relación

Permitirá obtener

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

#### **2.1 Materiales.**

##### **2.1.1 Materiales y equipos utilizados en la elaboración de tubos de calor**

Los materiales utilizados son:

- Eje de acero de 8mm de diámetro.
- Polvo de cobre.
- Cortador manual de tubos.
- Flexómetro de medición.
- Martillo.
- Improntas para marcar las probetas y enumerarlas.
- Bocín prensor.
- Perlas de urea para facilitar la porosidad deseada.
- Etilenglicol.
- Platos para pesaje.

Equipos utilizados del laboratorio de la FICM:

- Horno electrico con paredes refractarias que soporta hasta una temperatura de 1200°C.

- Balanza electrónica
- Prensa manual
- Soldadora eléctrica.

### **2.1.2 Materiales y equipos utilizados en la elaboración de tubos de calor**

Los materiales utilizados en el análisis térmico.

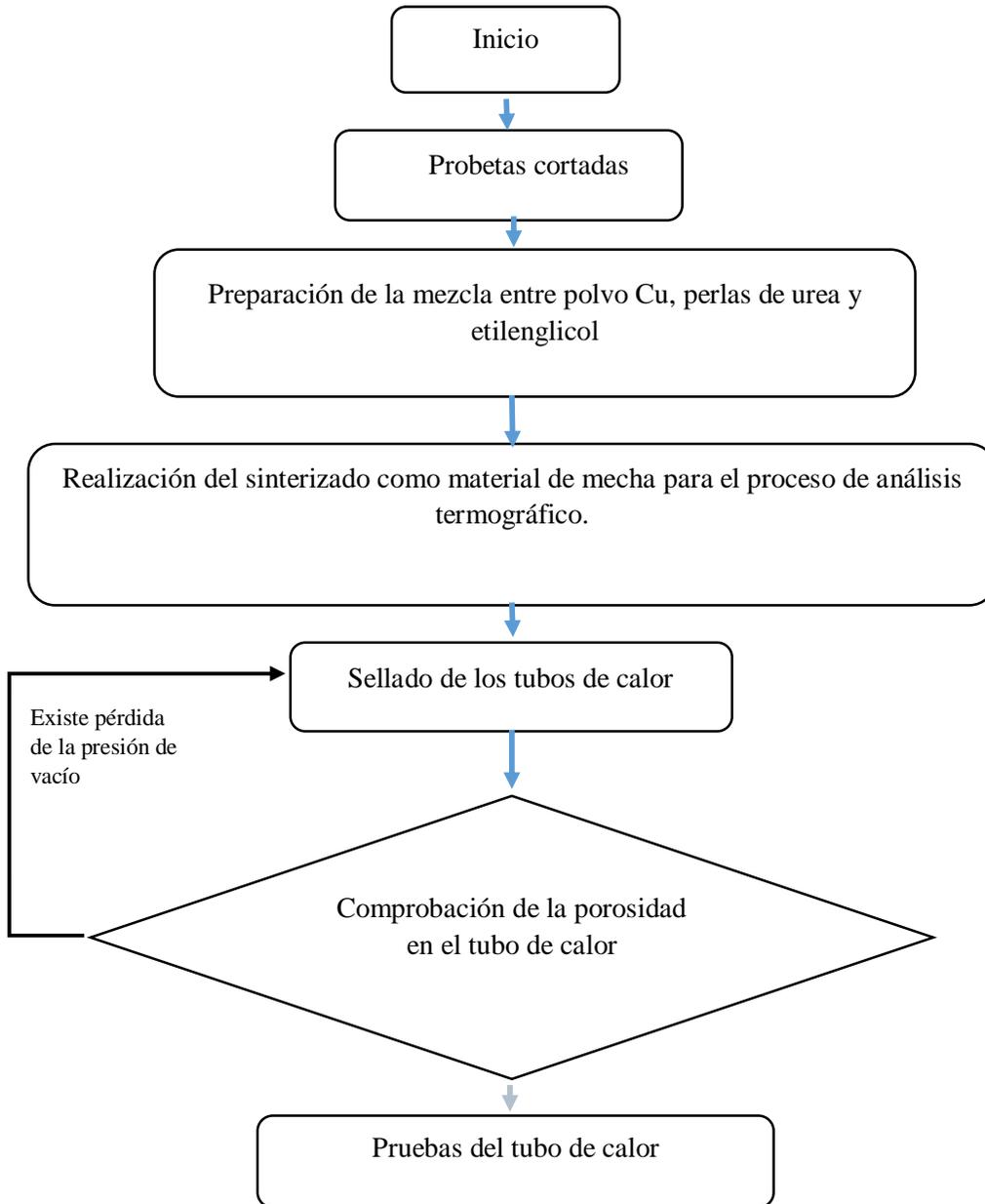
- Placa de acero.
- Tuercas para sujetar los tubos de calor
- Tapones de Cobre
- Tubos de Cobre sinterizados
- Uniones roscadas
- Tubos de calor soldados
- Conjuntos armados de los tubos de calor

Los equipos utilizados son:

- Banco de pruebas de presión a gas.
- Quemador de 3 anillos.
- Chimenea del Calderin.
- Cámara termográfica tipo pistola Marca FLIR

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Proceso para la elaboración de probetas de tubos de calor



**Figura 2-1:** Proceso de elaboración de las probetas de tubos de calor experimentales

Fuente: Autor

### 2.2.2 Cálculos hidráulicos

#### Calculo del factor de transporte M:

$$M = \frac{\rho_1 \sigma_1 h_{fg}}{\mu_1}$$

Tomando los valores del Apéndice 1 de la tabla n° 1B, propiedades del agua, a una temperatura de 300K.

$$M = \frac{996.1 \text{Kg/m}^3 \times 0.071700 (\text{Kgm/s}^2) / \text{m} \times 2437.0 \text{ J/kg}}{8.670 \times 10^{-4} \text{kg/ms}}$$

$$M = 2.007510^{-8} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

#### Calculo del empuje del fluido también llamado altura del fluido h:

$$h = \frac{\sigma_1}{\rho_1 g}$$

$$h = \frac{0.071700 (\text{Kgm/s}^2) / \text{m}}{996.1 \text{Kg/m}^3 \times 9.81 \text{m/s}^2}$$

$$h = 7.33710^{-6} \text{m}^2$$

#### Cálculos del radio hidráulico:

El radio hidráulico de un canal no circular [13] se define a partir de

$$r_h = \frac{A}{P}$$

$$r_h = \frac{A}{P} = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2}$$

$$r_h = \frac{0.0127m}{2}$$

$$r_h = 6.35 \times 10^{-3}m$$

### Calculo del radio equivalente

$$r_e = 2r_h$$

$$r_e = 2 \times 6.35 \times 10^{-3}m$$

$$r_e = 0.0127m$$

### Calculo del diámetro equivalente, $d_e$ ,

$$d_e = 2r_e = \frac{4A}{P}$$

$$d_e = 2(0.0127m)$$

$$d_e = 0.0254m$$

### Calculo de la longitud efectiva:

Teniendo en cuenta las medidas del tubo de calor son de 7.5cm en la zona del evaporador, 7cm en la zona adiabática y 7,5cm en la zona de condensado.

$$L_{ef} = 0,5L_e + L_a + 0,5L_c$$

$$L_{ef} = 0,5(0,075) + 0.07 + 0,5(0.075)$$

$$L_{ef} = 0,145m$$

### Calculo del área de la sección de vapor:

Tomando en cuenta el diámetro en la sección de paso de vapor de 9,5 mm, y un diámetro interior de 12.5 mm

$$A_v = \left(\frac{\pi}{4}\right) d_v^2$$

$$A_v = \left(\frac{\pi}{4}\right) 0.0095^2 m^2$$

$$A_v = 7.0882 \times 10^{-5} m^2$$

Determinamos el número de Reynolds, utilizando una tasa operativa de 50W.

$$Re_v = \frac{\dot{Q} d_v}{\mu_v A_v h_{fg}}$$

$$Re_v = \frac{50W \times 0.0095m}{0.0909 \times 10^{-4} kg/(ms) \times 7.0882 \times 10^{-5} m^2 \times 2437.0 \times 10^3 J/Kg}$$

$$Re_v = 302.51 < 2300 \text{ (Laminar)}$$

### Cálculo de la velocidad sónica:

Teniendo los siguientes datos tomados (TABLA A1 y TABLA A2 CENGEL).

$$C_p = 1,8723 \frac{KJ}{kgK}$$

$$C_v = 1,4108 \frac{KJ}{kgK}$$

$$R' = 0,4615 \frac{KJ}{kgK}$$

$$M = 18,015 \text{ kg/kmol}$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} = 1,327$$

$$C_s = (k R'T)^{1/2}$$

$$C_s = (1.327 \times 461.57 \times 300)^{1/2}$$

$$C_s = 428.66 \frac{m}{s}$$

**Cálculo de la velocidad del vapor.**

$$C_v = \frac{\dot{m}}{A_v \rho_v} = \frac{\dot{Q}}{A_v \rho_v h_{fg}}$$

$$C_v = \frac{50W}{0.0255Kg/m^3 \times 7.0882 \times 10^{-5} m^2 \times 2437.0 \times 10^3 J/Kg}$$

$$C_v = 11,351 \frac{m}{s}$$

**Cálculo del número de Mach**

$$Ma = \frac{C_v}{C_s}$$

$$Ma = \frac{11,351 \frac{m}{s}}{428.66 \frac{m}{s}}$$

$$Ma = 0,0264 < 0,2 \text{ (incompresible)}$$

**Esferas empacadas metal sinterizado.**

El relleno es un material constituido por pequeños gránulos esféricos de radio menor  $r_s$ .

El radio capilar viene dado por la expresión [12]

$$r_c = 0,41r_s$$

$$r_c = 0,41(0.00125m)$$

$$r_c = 5.125 * 10^{-4}m$$

**Calculo de la permeabilidad:**

$$k = \frac{r_s^2 \varepsilon^3}{37.5(1 - \varepsilon)^2}$$

$$k = \frac{(0.00125m)^2 0.85^3}{37.5(1 - 0.85)^2}$$

$$k = 1.574 * 10^{-6}m^2$$

Para la porosidad se debe utilizar valores empíricos proporcionados por el fabricante, con  $\varepsilon = 0.85$ .

**Calculo de la conductividad efectiva:**

$$k_{ef} = \frac{k_1[(2k_w + k_1) - 2\varepsilon(k_w - k_1)]}{2k_w + k_1 + \varepsilon(k_w - k_1)}$$

Tomando como referencia la temperatura de  $82^\circ C + 273 = 355^\circ K$

Fluido de trabajo agua destilada se tiene los siguientes datos:

Apéndice 1 tabla n° 1B Propiedades del agua

- Temperatura de operación de 355K,
- Porosidad de 0.85
- $k_1 = 0.6730 W/(m^\circ K)$
- $k_w = 56 W/(m^\circ K)$

$$k_{ef} = \frac{0.6730[(2 \times 56 + 0.6730) - 2 \times 0.85(56 - 0.6730)]}{2 \times 56 + 0.6730 + 0.85(56 - 0.6730)}$$

$$k_{ef} = 0.07845 W/(mK)$$

**Calculo de la cantidad máxima de fluido:**

$$m = A_v L \rho_v + A_r L \varepsilon \rho_l$$

$$A_r = \left(\frac{\pi}{4}\right) d_r^2 = \left(\frac{\pi}{4}\right) (12.7 \times 10^{-3} m)^2 = 1.2667 \times 10^{-4} m^2$$

Datos:

$A_v = 7.0882 \times 10^{-5} m^2$ ,  $L_{ef} = 0.145 m$ , APÉNDICE B (tabla n° 1B. propiedades del agua)  $\rho_v = 0.303 kg/m^3$ ,  $\rho_l = 969.5 kg/m^3$ , a una temperatura de 355K,  $\varepsilon = 0.85$ ,  $A_r = 1.2667 \times 10^{-4} m^2$

$$m = (7.0882 \times 10^{-5} m^2)(0.145 m) \left(0.303 \frac{kg}{m^3}\right) + (1.2667 \times 10^{-4} m^2)(0.145 m)(0.85) \left(969.5 \frac{kg}{m^3}\right)$$

$$m = 0.015139 kg$$

Transformamos 1kg de agua a (4°C) a m<sup>3</sup>

$$1Kg = 0.001 m^3$$

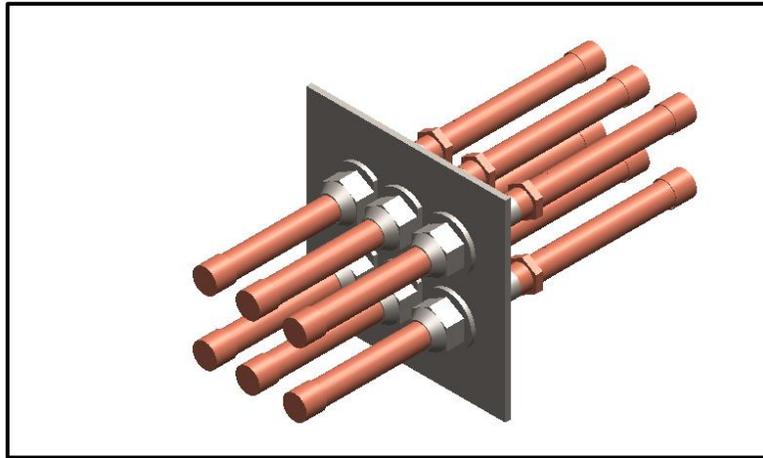
**Volumen requerido:**

$$v = 0.015139 kg \left(\frac{0.001 m^3}{1Kg}\right) = 1.5139 \times 10^{-5} m^3$$

**2.2.3 Dimensionamiento geométrico.**

**Análisis térmico en tubos de calor**

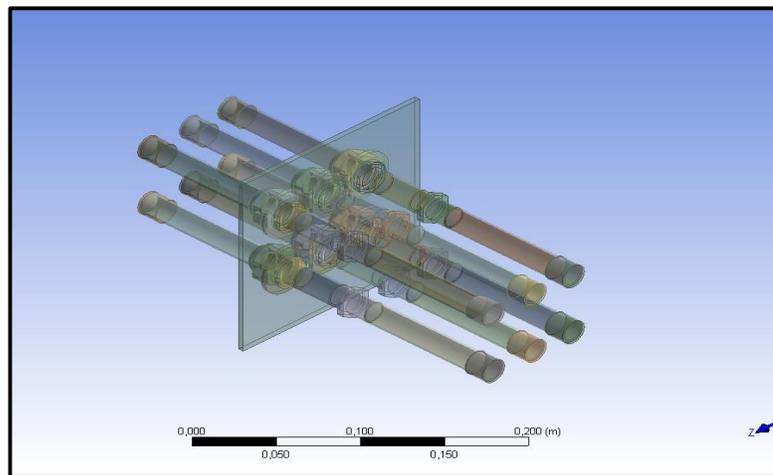
Se inicia con el modelado.



**Figura 2-2:** Modelado 3D de la configuración de los tubos de calor

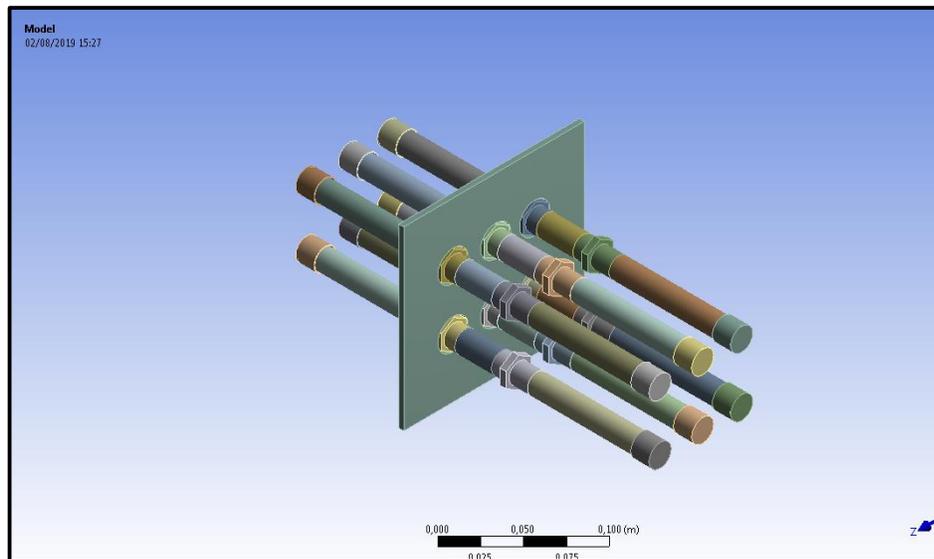
El siguiente paso es elegir el material de la configuración de los tubos de calor los cuales son de Aceros Estructural (Structural Steel) y Cobre (Copper).

Una vez seleccionado el material se procede a elegir la Geometría Requerida, se continúa con la edición de la Geometría, donde se debe elegir las propiedades de diseño requeridas.



**Figura 2-3:** Edición de la Geometría

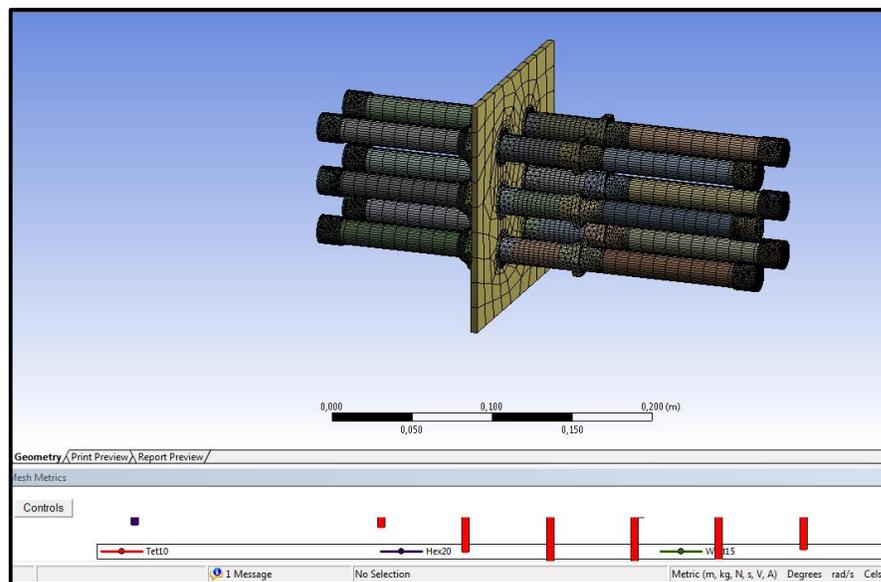
Se continúa con la edición del modelo de la siguiente manera, como se muestra a continuación



**Figura 2-4:** Pantalla inicial del modelo

Se continua con la ubicación de las Condiciones de Contorno señalados como es la Temperatura inicial y la Radiación, obteniendo los siguientes resultados.

El siguiente paso definir el mallado, generando los siguientes resultados.



**Figura 2-5:** Mallado - Mesh

Finalmente, el último paso es la ejecución del programa.

## 2.2.4 Ensayos experimentales para obtener la porosidad adecuada.

### 2.2.4.1 Prácticas realizadas primer ensayo

Descripción de las prácticas

Las prácticas se dan de la siguiente manera:

- Pesaje del polvo de cobre y la urea de acuerdo a la medida que posee el tubo de Cu.
- Dimensionamiento del volúmen del etilenglicol.

Tabla 2-1: Probetas elaboradas primer ensayo

<b>PRIMER ENSAYO</b>			
<b>PROBETAS</b>	<b>PESO DE POLVO DE COBRE EN (gr)</b>	<b>PESO DE POLVO DE UREA EN (gr)</b>	<b>VOLUMEN DE ETILENGLICOL (ml)</b>
Probeta # 1	29.9	4.4	2
Probeta #2	22.3	10	3
Probeta #3	22.2	31.9	4

Elaborado por: El Autor

- **Probeta # 1**

Se utiliza un 75% de polvo de Cu y un 25% en polvo de urea, en una probeta de longitud de 10 cm.

Procedimiento:

- a) El siguiente paso es la colocación del etilenglicol sobre el polvo de urea, para originar una buena adherencia con el polvo de cobre, obteniendo una mezcla apropiada para colocar en el interior de la probeta #1.
- b) Se continua con la colocación de la mezcla en la probeta, la cual se arma con el bocín prensor.

c) Otro paso es el ajuste de tuercas, con un apriete de 6 vueltas.

d) Finalmente se procede a ingresar la probeta al horno electrico a una temperatura de 800°C, durante 1 hora.

### **Probeta # 2**

Se utiliza un 50% de polvo de Cu y un 50% en polvo de urea, en una probeta de longitud de 10 cm.

Procedimiento:

a) Al igual que en la probeta anterior, se coloca el etilenglicol sobre el polvo de urea, para originar una buena adherencia con el polvo de cobre, obteniendo una mezcla apropiada para colocar en el interior de la probeta #2.

b) Se continua con la colocación de la mezcla en la probeta, la cual se arma con el bocín prensor.

c) Otro paso es el ajuste de tuercas, con un apriete de 6 vueltas.

d) Finalmente se procede a ingresar la probeta al horno electrico a una temperatura de 800°C, durante 1 hora.

### **Probeta # 3**

Se utiliza un 25% de polvo de Cu y un 75% en polvo de urea, en una probeta de longitud de 10 cm.

Procedimiento:

a) Al igual que en la probeta anterior, se coloca el etilenglicol sobre el polvo de urea, para originar una buena adherencia con el polvo de cobre, obteniendo una mezcla apropiada para colocar en el interior de la probeta #3.

- b) Se continua con la colocación de la mezcla en la probeta, la cual se arma con el bocín prensor.
- c) Otro paso es el ajuste de tuercas, con un apriete de 6 vueltas.
- d) Finalmente se procede a ingresar la probeta al horno electrico a una temperatura de 800°C, durante 1 hora.

### Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos son:

- Por falta de compactación en la mezcla no se obtuvo los resultados esperados ocasionando desperdicio del material, estando muy lejos de obtener la porosidad requerida. (ver Anexo D2).
- Debido al problema de evaporación que se produjo, ocasionando desperdicio de los materiales, se procede a realizar un segundo ensayo.

#### 2.2.4.2 Prácticas realizadas segundo ensayo.

Las practicas se inicia con:

- La compactación de cada una de las probetas mediante el uso de la prensa manual del Laboratorio de Soldadura de la FICM.

**Tabla 2-2:** Probetas elaboradas segundo ensayo

<b>SEGUNDO ENSAYO</b>			
<b>PROBETAS</b>	<b>PESO DE POLVO DE COBRE EN (gr)</b>	<b>PESO DE POLVO DE UREA EN (gr)</b>	<b>VOLUMEN DE ETILENGLICOL (ml)</b>
<b>Probeta # 1</b>	12	32	4
<b>Probeta #2</b>	33,3	15	4
<b>Probeta #3</b>	30	10	4

Elaborado por: El Autor

### **Probeta # 1**

Se genera la mezcla con un 25% de polvo de Cu, un 75% en polvo de urea y 4ml de etilenglicol en una probeta de longitud de 10 cm.

Procedimiento:

- a) El siguiente paso una vez generada la mezcla es el llenado de las probetas.
- b) Se continua con la compactación de la mezcla a una presión de 10bar en la prensa manual.
- c) Otro paso es el rellenado de los sobrantes y compactación a una presión de 20 bares.

### **Probeta # 2**

Se genera la mezcla con un 25% de polvo de Urea, un 75% en polvo de Cu y 4ml de etilenglicol en una probeta de longitud de 10 cm.

Procedimiento:

- a) El siguiente paso una vez generada la mezcla es el llenado de las probetas.
- b) Se continua con la compactación de la mezcla a una presión de 30 bares en la prensa manual.

### **Probeta # 3**

Se origina la mezcla con un 25% de perlas de urea, un 75% en polvo de Cu y 3ml de etilenglicol en una probeta de longitud de 10 cm.

Procedimiento:

- a) El siguiente paso una vez generada la mezcla es el llenado de las probetas.
- b) Se continua con la compactación de la mezcla a una presión de 20 bares en la prensa manual.
- Finalmente se procede a ingresar las probetas al horno eléctrico a una temperatura de 800°C, durante 1 hora.

### **Resultados obtenidos**

- Los resultados obtenidos son:
  - a) Las probetas 1 y 2, no han obtenido una porosidad adecuada, por una compactación deficiente e imperceptible.
  - b) La probeta 3, en la que se utilizo perlas de urea, en lugar de polvo de urea, se aprecia que existe mejor porosidad.(ver Anexo D3).

### **2.2.4.3 Prácticas realizadas tercer ensayo.**

Para este procedimiento se adquirió un manómetro de glicerina con una oscilación variada entre 40 y 60 bares, para tener una mejor visualización de la presión de compactación.

Las prácticas se inician con:

- El encendido del horno hasta que alcance la temperatura de 700°C.
- Se continúa con la preparación de las probetas y materiales como son: el polvo de cobre, las perlas de urea y el etilenglicol.
- Para este ensayo se utilizarán 4 probetas, en las cuales se especificarán los porcentajes de cada material de forma clara, las cuales son:

**Tabla 2-3:** Probetas elaboradas tercer ensayo

<b>TERCER ENSAYO</b>			
<b>PROBETAS</b>	<b>PESO DE POLVO DE COBRE EN (gr)</b>	<b>PESO DE POLVO DE UREA EN (gr)</b>	<b>VOLUMEN DE ETILENGLICOL (ml)</b>
<b>Probeta # 1</b>	27	6,6	3
<b>Probeta #2</b>	37	6	3
<b>Probeta #3</b>	39,7	4,7	4
<b>Probeta #4</b>	46	3	4

**Elaborado por:** El Autor

**Probeta #1:**

Se origina la mezcla en un porcentaje del 50% de polvo de cobre y 50% de perlas de urea, medido en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica:

**Procedimiento:**

- a) El siguiente paso es el llenado de la probeta
- b) Continuamos con la compactación en la prensa manual a una presión de 29 bares o 410 psi.

**Probeta #2:**

Se origina la mezcla en un porcentaje del 60% de polvo de cobre y 40% de perlas de urea, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica:

**Procedimiento:**

- a) El siguiente paso es el llenado de la probeta

- b) Continuamos con la compactación en la prensa manual a una presión de 19 bares o 270 psi.

**Probeta #3:**

Se origina la mezcla en un porcentaje del 70% de polvo de cobre y 30% de perlas de urea, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica:

**Procedimiento:**

- a) El siguiente paso es el llenado de la probeta
- b) Continuamos con la compactación en la prensa manual a una presión de 11 bares o 170 psi.

**Probeta #4:**

Se origina la mezcla en un porcentaje del 80% de polvo de cobre y 20% de perlas de urea, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica:

**Procedimiento:**

- a) El siguiente paso es el llenado de la probeta
- b) Continuamos con la compactación en la prensa manual a una presión de 18 bares o 225 psi.

**Resultados obtenidos:**

Los resultados obtenidos fueron:

Una vez elaboradas las 4 probetas, se procede a ingresarlas al horno, por un lapso de 1 hora a una temperatura de 700°C.

- El ensayo se diferencia en que:
  - a) Las probetas 1 y 2, se ingresan al horno, bien cubiertas.
  - b) Las probetas 3 y 4, se ingresaron al horno cubiertas en la parte inferior y descubiertas en la parte superior.

### **Resultados obtenidos**

Los resultados obtenidos fueron:

- Las probetas 1 y 2, la porosidad se acercaba a la requerida.
- Las probetas 3 y 4, la porosidad originada, es mínima, por lo que no es la adecuada. (ver Anexo D4).

#### **2.2.4.4 Prácticas realizadas cuarto ensayo.**

Para este procedimiento no se utilizará etilenglicol para experimentar si se presenta alguna diferencia con las probetas anteriores.

**Tabla 2-4:** Probetas elaboradas cuarto ensayo

<b>CUARTO ENSAYO</b>		
<b>PROBETAS</b>	<b>PESO DE POLVO DE COBRE EN (gr)</b>	<b>PESO DE POLVO DE UREA EN (gr)</b>
<b>Probeta # 1</b>	20	10
<b>Probeta #2</b>	25	8,1
<b>Probeta #3</b>	29	12

**Elaborado por:** El Autor

### **Probeta #1.**

Procedimiento:

- a) Se origina la mezcla en un porcentaje del 50% de polvo de cobre y 50% de perlas de urea, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica:
- b) El siguiente paso es el llenado de la probeta
- c) Se finaliza con la compactación en la prensa manual a una presión de 26 bares o 380 psi.

### **Probeta #2.**

Procedimiento:

- a) Se origina la mezcla en un porcentaje del 60% de polvo de cobre y 40% de perlas de urea, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica:
- b) El siguiente paso es el llenado de la probeta
- c) Se finaliza con la compactación en la prensa manual a una presión de 32 bares o 460 psi.

### **Probeta #3.**

Procedimiento:

- a) Se origina la mezcla en un porcentaje del 70% de polvo de cobre y 30% de perlas de urea, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica:
- b) El siguiente paso es el llenado de la probeta

- c) Se finaliza con la compactación en la prensa manual a una presión de 31 bares o 450 psi.

### Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos fueron:

- Las probetas 1 y 2, la porosidad se acercaba a la requerida, pero tiene muchos espacios huecos en el centro de la probeta.
- La probeta 3, la porosidad se aproxima a la requerida, pero aún existen espacios sin porosidad, requiere aplicar la presión correcta para compactar. (ver Anexo D5).

#### 2.2.4.5 Prácticas realizadas quinto ensayo.

Para este procedimiento únicamente se utiliza polvo de cobre y perlas de urea para realizar la mezcla que se introducirá en cada una de las probetas, donde sus porcentajes distribuidos son:

**Tabla 2-5:** Probetas elaboradas quinto ensayo

<b>QUINTO ENSAYO</b>		
<b>PROBETAS</b>	<b>PESO DE POLVO DE COBRE EN (gr)</b>	<b>%DE PERLAS DE UREA EN PESO (gr)</b>
<b>Probeta # 1</b>	21,2	12
<b>Probeta #2</b>	27	7,9
<b>Probeta #3</b>	31,2	12

Elaborado por: El Autor

## **Probeta #1.**

### **Procedimiento:**

- a) Se origina la mezcla en un porcentaje del 50% de polvo de cobre y 50% de perlas de urea, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica:
- b) El siguiente paso es el llenado de la probeta
- c) Se finaliza con la compactación en la prensa manual a distintas presiones como son: cuando se ubica el 30% inicial de mezcla se aplicará una presión de 45bar o 650 psi, al aplicará un 30% más de mezcla esta se ejecutará a una presión de 35bar y finalmente al ubicar el 40% restante la probeta se someterá a una presión de 34 bares o 490 psi.

## **Probeta #2.**

### **Procedimiento:**

- a) Se origina la mezcla en un porcentaje del 60% de polvo de cobre y 40% de perlas de urea, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica:
- b) El siguiente paso es el llenado de la probeta
- c) Se finaliza con la compactación en la prensa manual a distintas presiones como son: cuando se ubica el 30% inicial de mezcla se aplicará una presión de 30 bar o 435 psi, al aplicará un 30% más de mezcla esta se ejecutará a una presión de 29 bar o 420 psi y finalmente al ubicar el 40% restante la probeta se someterá a una presión de 31 bares o 440 psi.

### **Probeta #3.**

#### **Procedimiento:**

- a) Se origina la mezcla en un porcentaje del 70% de polvo de cobre y 30% de perlas de urea, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica:
  - b) El siguiente paso es el llenado de la probeta
  - c) Se finaliza con la compactación en la prensa manual a distintas presiones como son: cuando se ubica el 30% inicial de mezcla se aplicará una presión de 30 bar o 435 psi, al aplicará un 30% más de mezcla esta se ejecutará a una presión de 30 bar o 435 psi y finalmente al ubicar el 40% restante la probeta se someterá a una presión de 30 bar o 435 psi.
- Finalmente se procede a ingresar las probetas al horno electrico a una temperatura de 750°C, durante 1 hora, colocándose arena con la que se cubrirá totalmente las probetas

#### **Resultados obtenidos**

Los resultados obtenidos son:

Probetas con una porosidad adecuada, pero deformadas. (ver Anexo D6)

#### **2.2.4.6 Práctica final**

Para evitar deformaciones de las probetas, durante el proceso de compactación, fue necesario mandar a elaborar un bocín para protegerlas, evitando que se deformen y fracturen, de igual manera se mecanizó un pistón para ayudar a retirar las probetas que se encuentren en el bocín, donde los porcentajes de materiales distribuidos son:

**Tabla 2-6:** Probetas elaboradas ensayo final

<b>QUINTO ENSAYO</b>		
<b>PROBETAS</b>	<b>PESO DE POLVO DE COBRE EN (gr)</b>	<b>%DE PERLAS DE UREA EN PESO (gr)</b>
<b>Probeta # 1</b>	23	13
<b>Probeta #2</b>	28	9
<b>Probeta #3</b>	30	12,5

**Elaborado por:** El Autor

### **Probeta #1.**

Procedimiento:

- a) Se origina la mezcla en un porcentaje del 30% de polvo de cobre y 70% de perlas de urea, con una medida de 4ml de etilenglicol, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica.
- b) El siguiente paso es el llenado de la probeta
- c) Se finaliza con la compactación en la prensa manual a distintas presiones como son: cuando se ubica el 30% inicial de mezcla se aplicará una presión de 40 bar o 590 psi, al aplicará un 30% más de mezcla esta se ejecutará a una presión de 50 bar o 720 psi y finalmente al ubicar el 40% restante la probeta se someterá a una presión de 30 bar o 435 psi.

### **Probeta #2.**

Procedimiento:

- a) Se origina la mezcla en un porcentaje del 40% de polvo de cobre y 60% de perlas de urea, con una medida de 4ml de etilenglicol, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica.
- b) El siguiente paso es el llenado de la probeta

- c) Se finaliza con la compactación en la prensa manual a distintas presiones como son: cuando se ubica el 30% inicial de mezcla se aplicará una presión de 40 bar o 590 psi, al aplicará un 30% más de mezcla esta se ejecutará a una presión de 31 bar o 440 psi y finalmente al ubicar el 40% restante la probeta se someterá a una presión de 33 bar o 480 psi.

### **Probeta #3.**

Procedimiento:

- a) Se origina la mezcla en un porcentaje del 40% de polvo de cobre y 60% de perlas de urea, con una medida de 4ml de etilenglicol, medidos en volumen en la probeta los mismos que se procede a pesar en la balanza electrónica.
- b) El siguiente paso es el llenado de la probeta
- c) Se finaliza con la compactación en la prensa manual a distintas presiones como son: cuando se ubica el 30% inicial de mezcla se aplicará una presión de 31 bar o 450 psi, al aplicará un 30% más de mezcla esta se ejecutará a una presión de 31 bar o 450 psi y finalmente al ubicar el 40% restante la probeta se someterá a una presión de 30 bar o 435 psi.

### **Resultados obtenidos**

Los resultados obtenidos son:

- Probetas con una porosidad y compactación adecuada, con resultados esperados. (ver Anexo D7).

#### **2.2.4.7. Resumen final de la composición general de los ensayos**

A continuación, se detalla en la Tabla 2-7 un resumen general de todos los ensayos experimentados que explica cómo se han realizado cada una de las prácticas, efectuando un sinnúmero de pruebas hasta llegar a los ensayos finales para determinar cuáles fueron

los adecuados y concluir cuáles serán los que permitirán continuar con este trabajo experimental.

**Tabla 2-7:** resumen final de la composición general de los ensayos

Composicion General de los Ensayos						
Probeta	Urea gr		Polvo de Cu gr	Etilenglicol ml	Aceptabilidad de Probetas	
	Polvo	Perlas			Aceptable	No Aceptable
ENSAYO 1						
P1	4.4	-	29.9	2	-	evaporacion de mezcla
P2	10	-	22.3	3	-	evaporacion de mezcla
P3	31.9	-	22.2	4	-	evaporacion de mezcla
ENSAYO 2						
P1	32	-	12	4	-	nada de porosidad
P2	15	-	33,3	4	-	nada de porosidad
P3	-	10	30	4	-	se aprecia algo de porosidad
ENSAYO 3						
P1	-	6,6	27	3	-	mejora la porosidad pero no es uniforme
P2	-	6	37	3	-	mejora la porosidad pero no es uniforme
P3	-	4,7	39,7	4	-	falta de compactacion porosidad min.
P4	-	3	46	4	-	falta de compactacion porosidad min.
ENSAYO 4						
P1	-	10	20	-	-	porosidad adecuada en los extremos pero deficiente en la zona intermedia
P2	-	8,1	25	-	-	porosidad adecuada en los extremos pero deficiente en la zona intermedia
P3	-	12	29	-	-	mejora la porosidad pero aun falta compactar
ENSAYO 5						
P1	-	12	21,2	-	probetas con porosidad adecuada pero deformadas	-
P2	-	7,9	27	-	probetas con porosidad adecuada pero deformadas	-
P3	-	12	31,2	-	probetas con porosidad adecuada pero deformadas	-
ENSAYO FINAL (se utiliza un bocin para evitar la deformacion de las probetas)						
P1	-	13	23	-	porosidad adecuada y comprobada realizando pruebas	-
P2	-	9	28	-	porosidad adecuada y comprobada realizando pruebas	-
P3	-	12,5	30	-	porosidad adecuada y comprobada realizando pruebas	-

**Elaborado por:** Autor

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Resultados de los análisis**

##### **3.1.1 Descripción del análisis térmico usando termografía.**

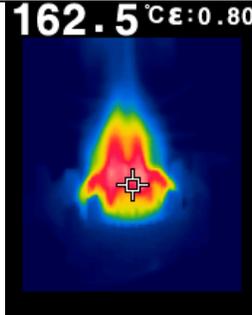
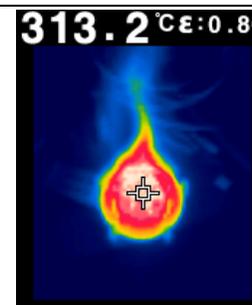
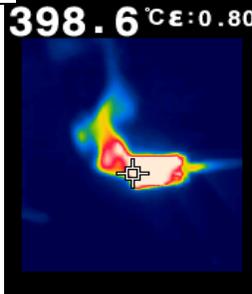
Luego de haber realizado todos los ensayos y después de haber obtenido como resultado las probetas con la porosidad adecuada, se procede a efectuar el armado de los tubos de calor con sus respectivos componentes, elaborando posteriormente una placa, que irán atravesados los tubos de calor, para someterlas a un análisis térmico en el laboratorio de la FICM.

#### **Resultados obtenidos**

El análisis térmico se inicia:

- Conectando el quemador redondo al banco de pruebas de presión a gas.
- Se continúa revisando que no haya fugas de gas antes de encender el quemador.
- Por último, se continúa encendiendo el quemador, el cual tiene 3 anillos que proporcionará la fuente de calor, como se indica a continuación:

**Tabla 3-1:** Mediciones termográficas tomadas en la fuente que va a generar calor para el análisis.

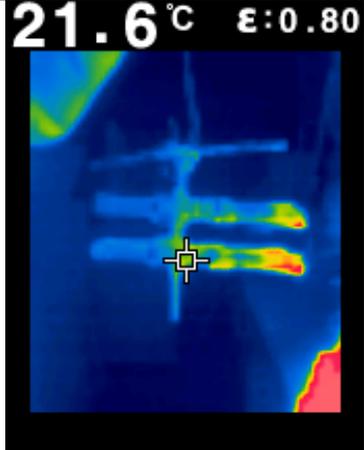
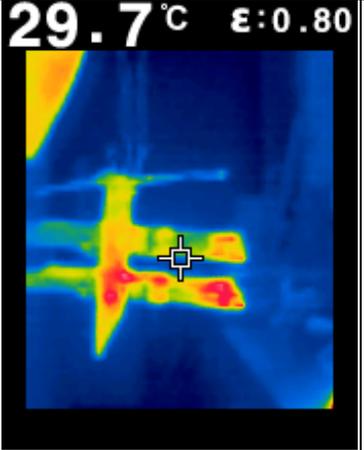
Encendido de los anillos del quemador	Mediciones termográficas de la fuente de calor
Anillo Central	 <p>162.5 °C ε: 0.80</p>
Anillo central e intermedio	 <p>282.3 °C ε: 0.80</p>
Anillo intermedio y externo	 <p>313.2 °C ε: 0.80</p>
Tres anillos encendidos	 <p>398.6 °C ε: 0.80</p>

Elaborado por: El Autor

Una vez analizada las mediciones se procede aplicar el conjunto armado con los tubos de calor experimentales, ubicándoles en la zona donde se encuentra la fuente de calor, realizando las mediciones respectivas, visualizando la variación de temperatura en tres puntos diferentes:

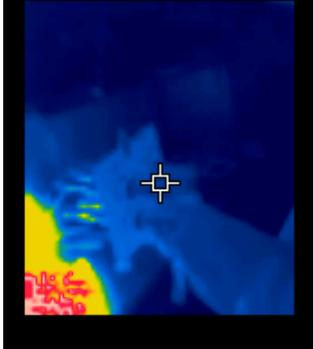
Una vez que se ha tomado en cuenta las mediciones realizadas en los anillos del quemador, se procede a aplicar el conjunto armado con los tubos de calor experimentales hacia la zona donde se encuentra nuestra fuente de calor, permitiendo de esta manera visualizar la variación de temperatura y pérdidas de calor que se producen en los tubos de calor, realizándolo en tres puntos diferentes.

**Tabla 3-2:** Mediciones termográficas tomadas variando el tiempo en cada medición en la configuración de 6 tubos de calor.

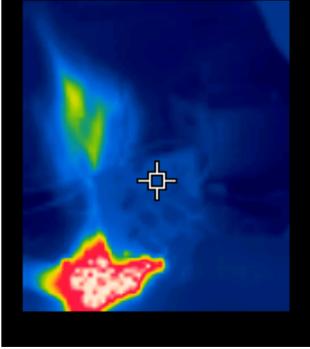
<b>Resultados de ensayos termográficos con 6 tubos de calor realizado en el quemador redondo</b>		
<b>Zona fría</b>	<b>Zona media</b>	<b>Zona caliente</b>
<b>Primera Medición - realizada a t = 5min</b>		
		

Segunda Medición - realizado a t = 10min

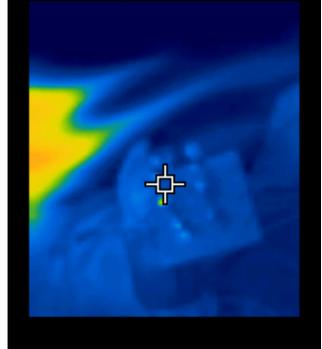
29.1 °C ε:0.80



43.4 °C ε:0.80

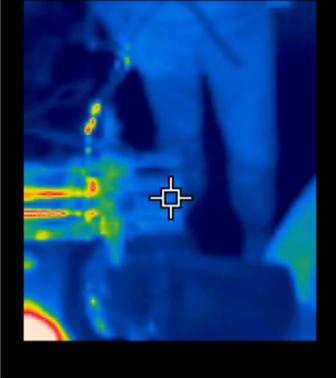


51.8 °C ε:0.80

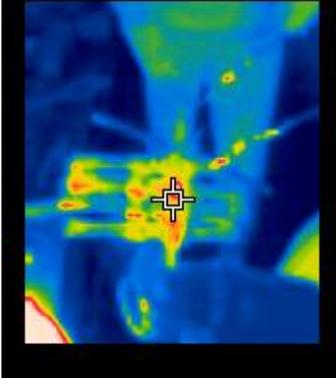


Tercera Medición - realizado a t = 15min

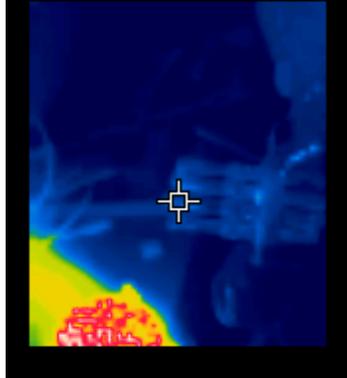
33.3 °C ε:0.80



44.7 °C ε:0.80

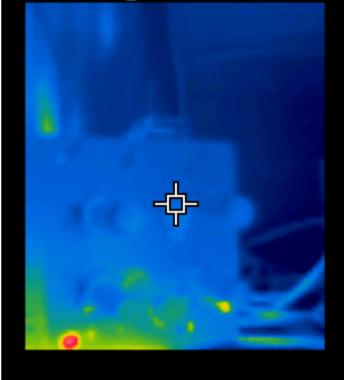


60.9 °C ε:0.80

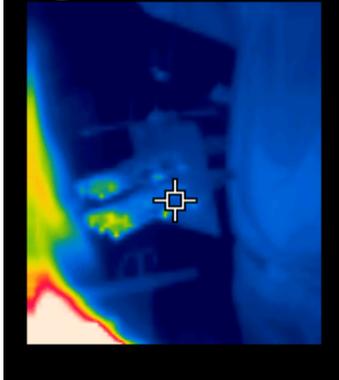


Cuarta Medición - realizado a t = 20min

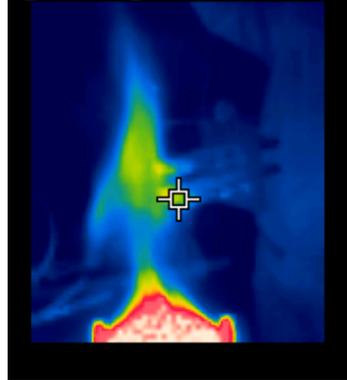
41.5 °C ε:0.80



48.4 °C ε:0.80



82.0 °C ε:0.80



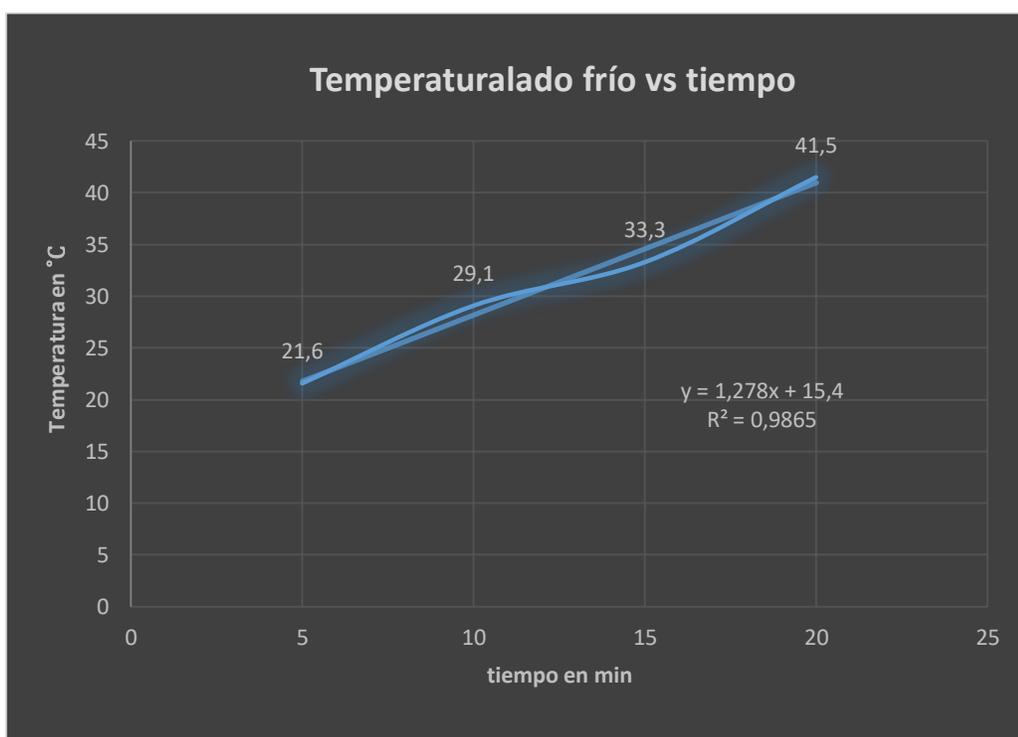
Elaborado por: El Autor

**Tabla 3-3:** Tabla de resultados obtenidos de la termografía en la configuración de 6 tubos

COMPARACION DE TEMPERATURAS DE ACUERDO A SU CONFIGURACION REALIZADO EN EL QUEMADOR					
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Tiempo en el que se realizaron las mediciones(min)	$T_{Lado\ Frio}\ ^{\circ}C$	$T_{Lado\ Adiabatico}\ ^{\circ}C$	$T_{Lado\ Caliente}\ ^{\circ}C$	$\Delta T\ ^{\circ}C$
	5	21,6	29,7	45,1	23,50
	10	29,1	43,4	51,8	22,70
	15	33,3	44,7	60,9	27,60
	20	41,5	48,4	82	40,50

Elaborado por: El Autor

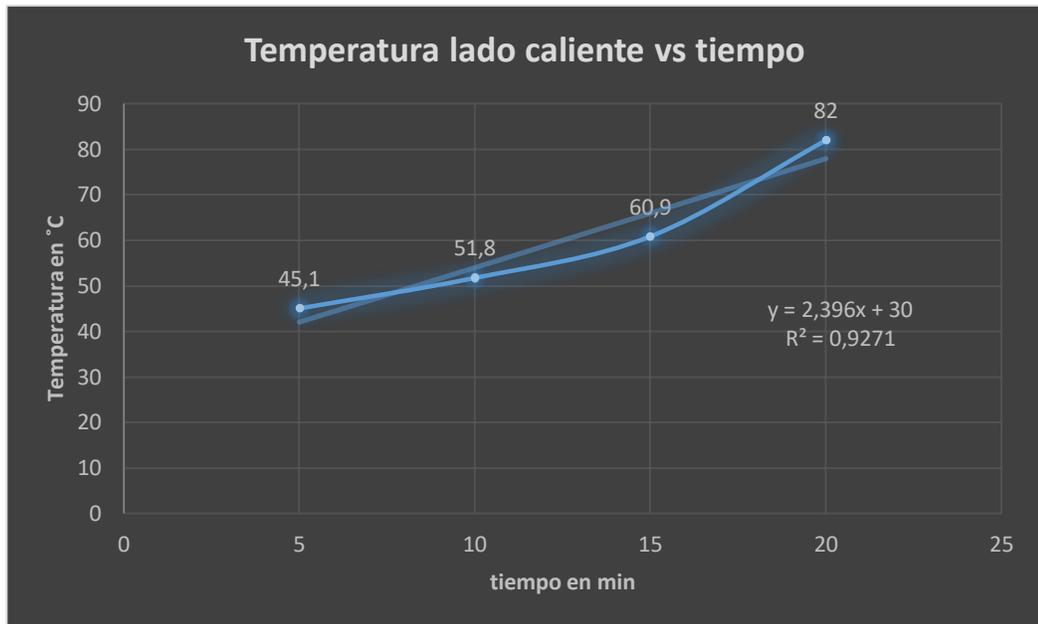
A continuación, se muestra la Figura 3-1 la temperatura del lado frío con respecto al tiempo.



**Figura 3-1:** Curva de la temperatura lado frío con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-1, se puede observar que se da un comportamiento de tipo lineal creciente.

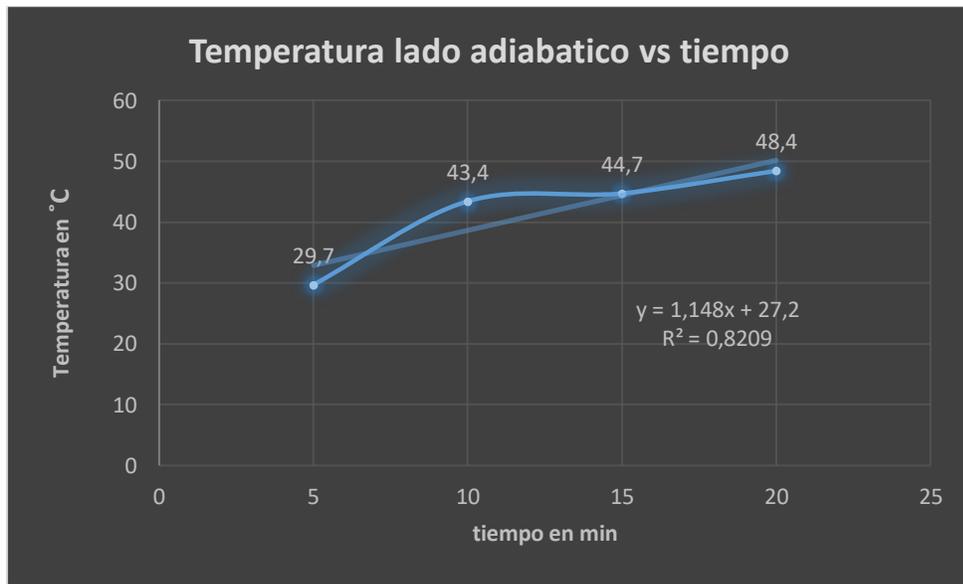
A continuación, se muestra la Figura 3-2 de la temperatura lado caliente con respecto al tiempo.



**Figura 3-2:** Curva de la temperatura lado caliente con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-2, se puede observar un comportamiento de tipo lineal creciente.

A continuación, se muestra la Figura 3-3 de la temperatura adiabática con respecto al tiempo.



**Figura 3-3:** Curva de la temperatura lado adiabático con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor

**Análisis.** De acuerdo a la figura dada se puede observar un comportamiento de tipo exponencial.

Se muestra por último la gráfica de la curva de la variación de temperatura con respecto al tiempo.



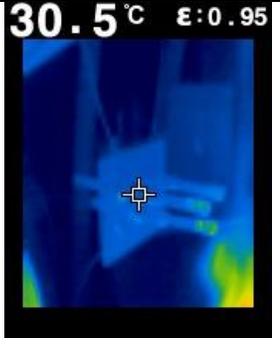
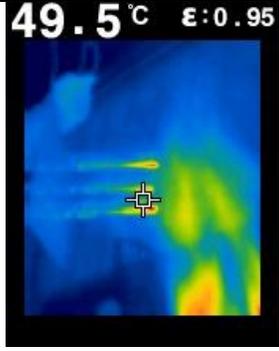
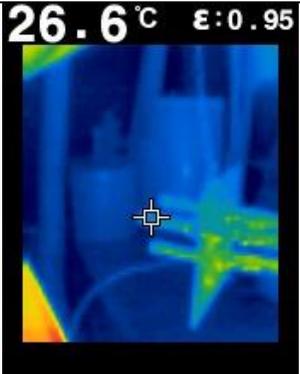
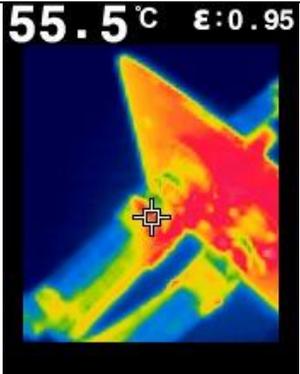
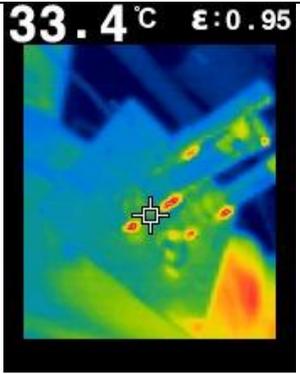
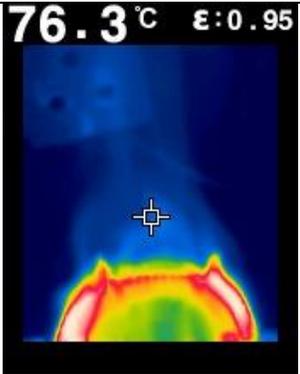
**Figura 3-4:** Curva de la  $\Delta T$  con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor

**Análisis.** De acuerdo a la figura se puede observar un comportamiento de tipo lineal creciente.

### **Configuración de 3 tubos de calor.**

A continuación, se muestra las mediciones de temperatura que se obtuvieron al realizar en la configuración con 3 tubos realizando las mediciones termográficas en el quemador de 3 anillos en el laboratorio de energía de la FICM.

**Tabla 3-4.** Mediciones termográficas tomadas en diferentes ángulos con la configuración de 3 tubos de calor.

<b>Resultados de ensayos termográficos con 3 tubos de calor</b>		
<b>Zona fría</b>	<b>Zona media</b>	<b>Zona caliente</b>
<b>Primera Medición – realizado a t = 5min</b>		
<b>26 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 	<b>30.5 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 	<b>49.5 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 
<b>Segunda Medición - realizado a t = 10min</b>		
<b>26.6 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 	<b>32.1 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 	<b>55.5 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 
<b>Tercera Medición – realizado a t = 15min</b>		
<b>32.0 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 	<b>33.4 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 	<b>76.3 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 

Elaborado por: El Autor

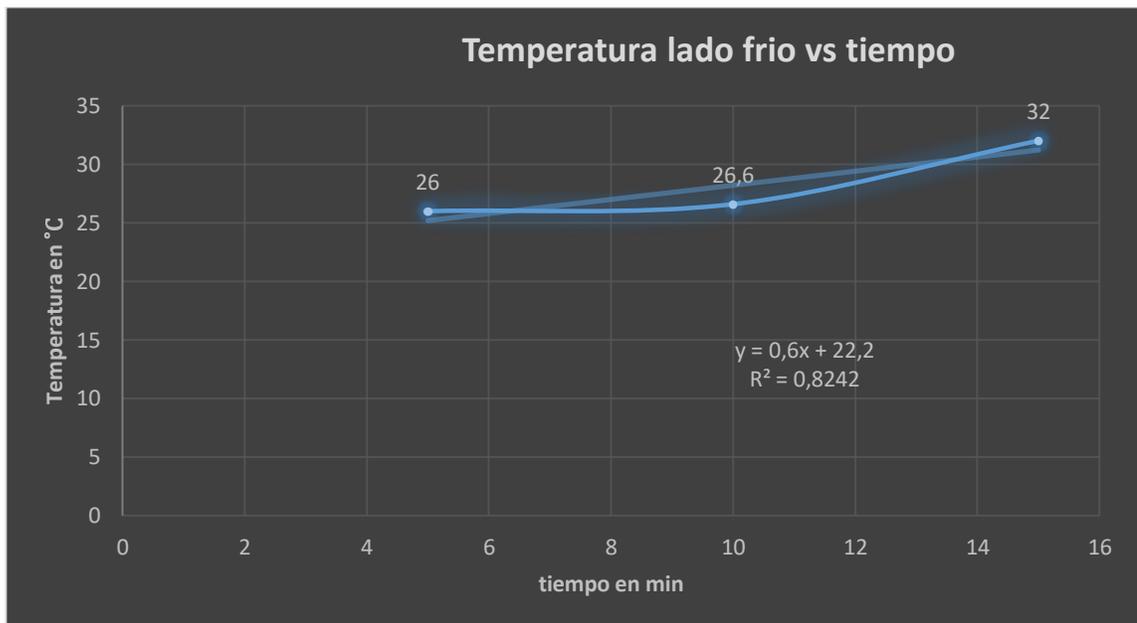
De las mediciones realizadas en la configuración hecha con tres tubos de calor se determinó los siguientes valores expresados en la Tabla 10.

**Tabla 3-5:** Tabla de resultados obtenidos de la termografía en la configuración de 3 tubos

COMPARACION DE TEMPERATURAS DE ACUERDO A SU CONFIGURACION REALIZADO EN EL QUEMADOR					
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Tiempo en el que se realizaron las mediciones(min)	$T_{Lado\ Frio}\ ^\circ C$	$T_{Lado\ Adiabatico}\ \zeta$	$T_{Lado\ Caliente}\ ^\circ C$	$\Delta T\ ^\circ C$
	5	26	30,5	49,5	23,5
	10	26,6	32,1	55,5	28,9
	15	32	33,4	76,3	44,3

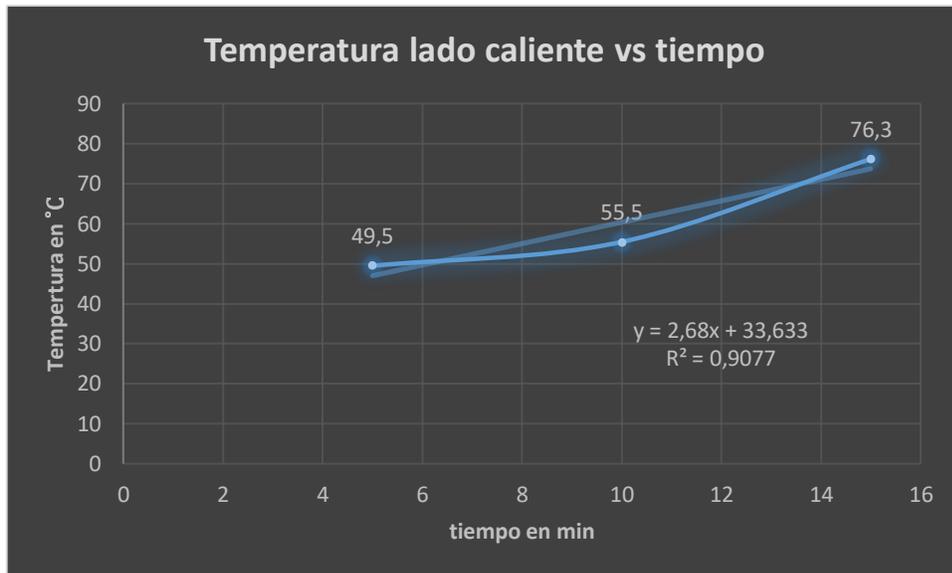
Elaborado por: El Autor

Una vez obtenidos los resultados se expresan de forma estadística por medio de tablas como se detalla a continuación:



**Figura 3-5:** Curva de la temperatura lado frío con respecto al tiempo con 3 Tubos de Calor

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-5, se puede observar un comportamiento lineal creciente.



**Figura 3-6:** Curva de la temperatura lado caliente con respecto al tiempo con 3 Tubos de calor

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-6, se puede observar un comportamiento lineal creciente.



**Figura 3-7:** Curva de la temperatura lado adiabático con respecto al tiempo con 3 Tubos de Calor

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-7, se puede observar un comportamiento lineal



**Figura 3-8:** Curva de la  $\Delta T$  con respecto al tiempo con 3 Tubos de Calor

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-8, se puede observar un comportamiento exponencial.

### Configuración de 2 tubos de calor.

A continuación, se muestra las mediciones de temperatura que se obtuvieron al realizar en la configuración con 2 tubos realizando las mediciones termográficas a diferentes ángulos realizadas en el quemador en el laboratorio de energía de la FICM.

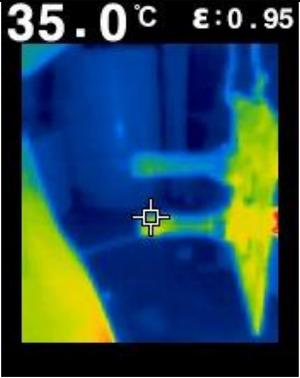
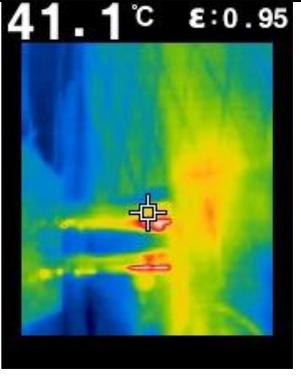
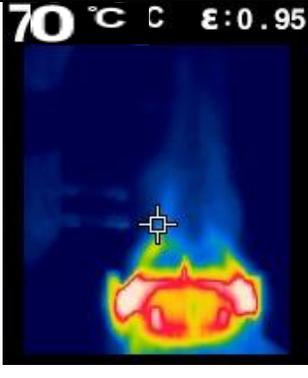
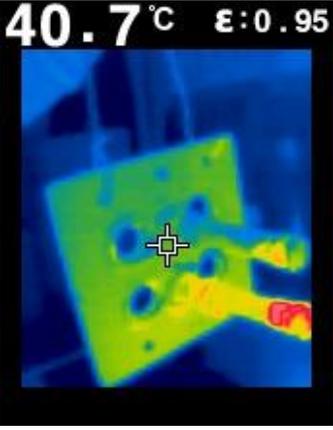
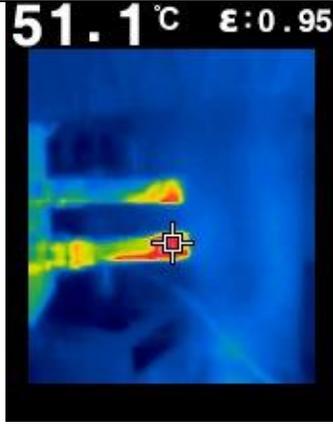
Con 2 tubos de calor se ha logrado obtener los siguientes resultados que son:

**Tabla 3-4:** Resultados obtenidos de la termografía en la configuración de 2 tubos

COMPARACION DE TEMPERATURAS DE ACUERDO A SU CONFIGURACION REALIZADO EN EL QUEMADOR					
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Tiempo en el que se realizaron las mediciones(min)	$T_{Lado\ Frio}$ °C	$T_{Lado\ Adiabatico}$ C	$T_{Lado\ Caliente}$ °C	$\Delta T$ °C
● ●	5	35	41,1	70	35,00
	10	40,7	51,1	73,6	32,90

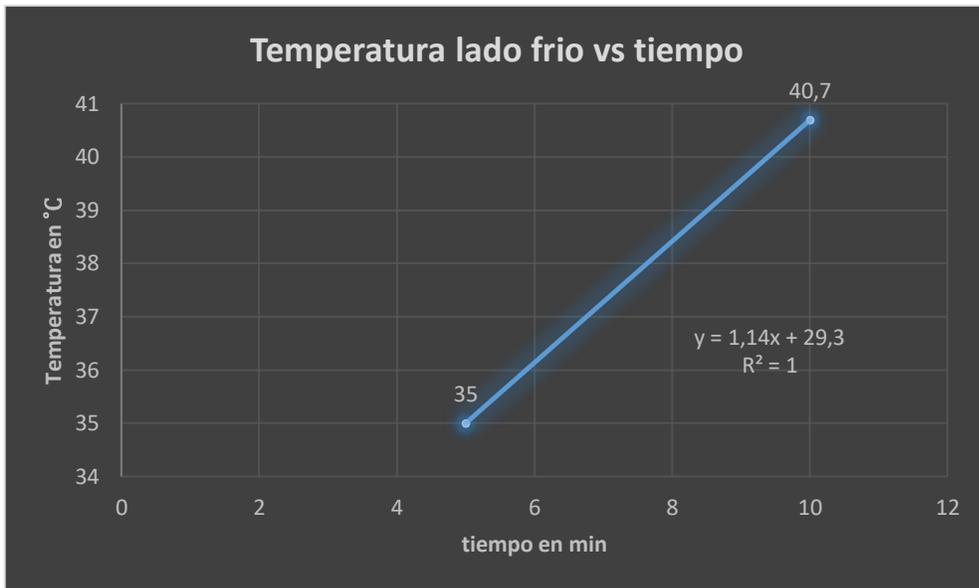
**Elaborado por:** El Autor

**Tabla 3-5:** Mediciones termográficas con 2 tubos de calor en el quemador

<b>Resultados de ensayos termográficos con 2 tubos de calor en el quemador</b>		
<b>Zona fría</b>	<b>Zona media</b>	<b>Zona caliente</b>
<b>Primera Medición –realizada a t = 5min</b>		
<b>35.0 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 	<b>41.1 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 	<b>70 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 
<b>Segunda Medición – realizada a t = 10 min</b>		
<b>40.7 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 	<b>51.1 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 	<b>73.6 °C</b> $\epsilon: 0.95$ 

Elaborado por: El Autor

Se puede observar los resultados estadísticos mostrados en la figura que se obtuvieron al comparar la temperatura del lado frío con respecto al tiempo.



**Figura 3-9:** Curva de la temperatura lado frio con respecto al tiempo con 2 Tubos de Calor

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-9, se puede observar un comportamiento de tipo lineal creciente.

A continuación, se muestra la figura la temperatura del lado caliente con respecto al tiempo.



**Figura 3-10:** Curva de la temperatura lado caliente con respecto al tiempo con 2 Tubos de calor

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-10, se puede observar un comportamiento de tipo lineal creciente.

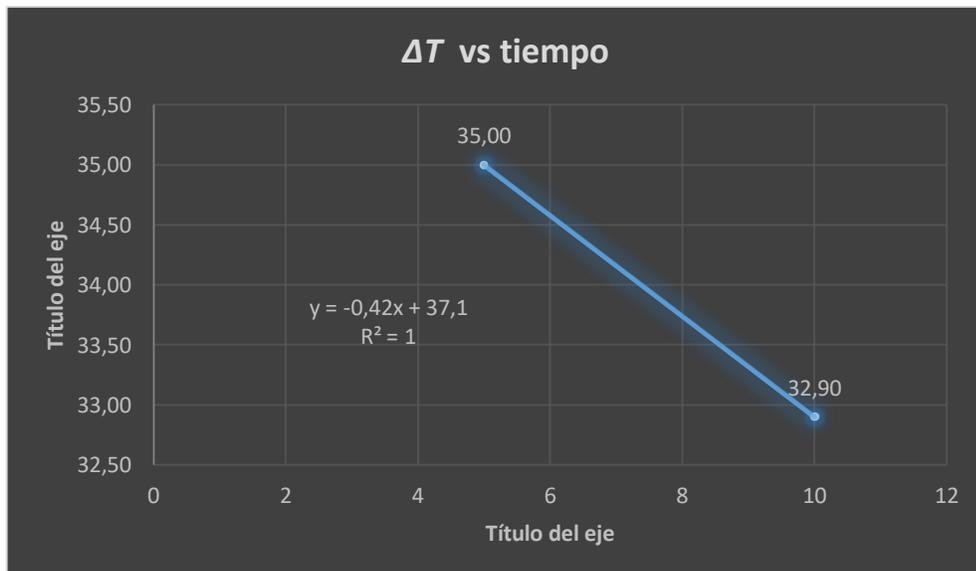
Además, se detallan en la siguiente figura el diagrama de la temperatura adiabática con respecto al tiempo.



**Figura 3-11:** Curva de la temperatura lado adiabático con respecto al tiempo con 2 Tubos de calor

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-11, se puede observar un comportamiento de tipo lineal – horizontal creciente.

Se muestra finalmente la curva  $\Delta T$  con respecto al tiempo.

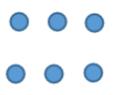
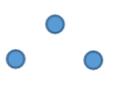


**Figura 3-12:** Curva de la temperatura promedio con respecto al tiempo con 2 Tubos de calor

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-12, se puede observar un comportamiento de tipo lineal decreciente.

Como resumen final se tiene que:

**Tabla 3-6:** Resultados obtenidos de la termografía en la configuración de tubos

COMPARACION DE TEMPERATURAS DE ACUERDO A SU CONFIGURACION REALIZADO EN EL QUEMADOR					
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Tiempo en el que se realizaron las mediciones(min)	$T_{Lado\ Frio}\ ^\circ C$	$T_{Lado\ Adiabatico}\ C$	$T_{Lado\ Caliente}\ ^\circ C$	$\Delta T\ ^\circ C$
	5	21,6	29,7	45,1	23,50
	10	29,1	43,4	51,8	22,70
	15	33,3	44,7	60,9	27,60
	20	41,5	48,4	82	40,50
	5	26	30,5	49,5	23,5
	10	26,6	32,1	55,5	28,9
	15	32	33,4	76,3	44,3
	5	35	41,1	70	35,00
	10	40,7	51,1	73,6	32,90

**Elaborado por:** El Autor

En la tabla 3-6 se puede observar los resultados que se obtuvieron del conjunto de las tres configuraciones y se concluye que en la configuración de 3 tubos el  $\Delta T$  es mayor con respecto al tiempo que el de las otras configuraciones.

En tanto que las temperaturas obtenidas en la chimenea del calderin detalladas mediante termografía son:

Aplicación de la configuración de 6 tubos de calor para realizar pruebas termográficas a la salida de gases en la chimenea del calderin.

## Con 6 Tubos de calor

**Tabla 3-7:** Resultados obtenidos de la termografía en la configuración de 6 tubos en el calderin

COMPARACION DE TEMPERATURAS DE ACUERDO A SU CONFIGURACION REALIZADO EN LA CHIMENEA DEL CALDERIN					
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Tiempo en el que se realizaron las mediciones(min)	$T_{Lado\ Frio} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{Lado\ Caliente} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{Lado\ Adiabatico} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Delta T \text{ } ^\circ\text{C}$
	5	38,4	51,9	44	13,50
	10	38,6	56	44,4	17,40
	15	39,2	60	48,5	20,80
	20	43	66,1	53,6	23,10
	25	44,8	71,8	60,5	27,00

Elaborado por: El Autor

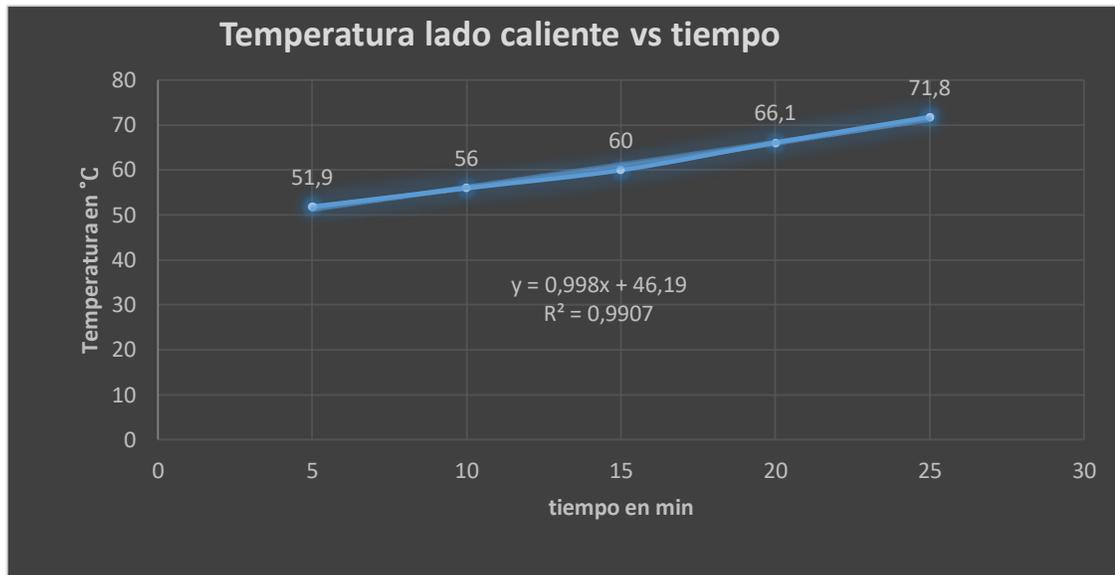
Se puede observar los resultados estadísticos mostrados que se obtuvieron al comparar la temperatura del lado frio con respecto al tiempo.



**Figura 3-13:** Curva de la temperatura lado frio con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor en el Calderín.

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-13, se puede observar un comportamiento de tipo lineal creciente.

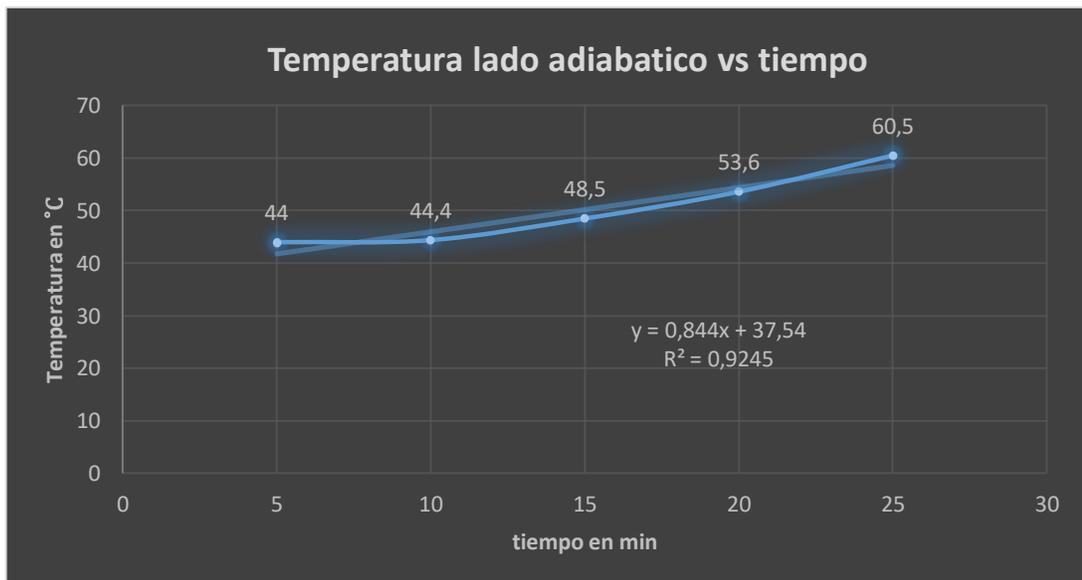
A continuación, se muestra la siguiente figura de la temperatura del lado caliente con respecto al tiempo.



**Figura 3-14:** Curva de la temperatura lado caliente con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor en el Calderin.

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-14, se puede observar un comportamiento de tipo lineal creciente.

Además, se detallan la siguiente figura de la temperatura adiabática con respecto al tiempo.



**Figura 3-15:** Curva de la temperatura lado adiabático con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor en el Calderin.

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-15, se puede observar un comportamiento de tipo lineal creciente, con un inicio de tipo horizontal.

Se muestra finalmente a continuación la curva de la temperatura promedio.



**Figura 3-16:** Curva de la temperatura promedio con respecto al tiempo con 6 Tubos de calor en el Calderín.

**Análisis.** De acuerdo a la Figura 3-16, se puede observar un comportamiento de tipo lineal creciente.

### 3.1.2 Descripción de resultado de los análisis Térmico en Tubos de calor ejecutado por MEF.

El Análisis Térmico realizado en los Tubos de calor por el Método de Elementos Finitos son:

#### **Configuración con 6 tubos de calor.**

En la configuración de los 6 tubos de calor aplicado distintas temperaturas se tiene los siguientes resultados:

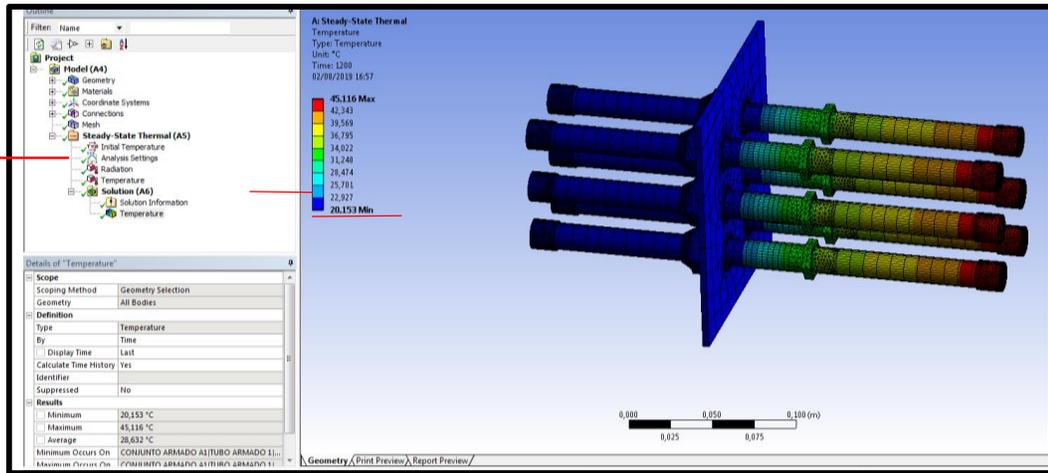


Figura 3-17: Primera medición con el Haz de 6 Tubos de Calor.

Por lo que se tiene como resultados:

$$T_{Caliente} = 45.116 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Media} = 28.474 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Frio} = 20.153 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

En tanto que la segunda medición da los siguientes resultados:

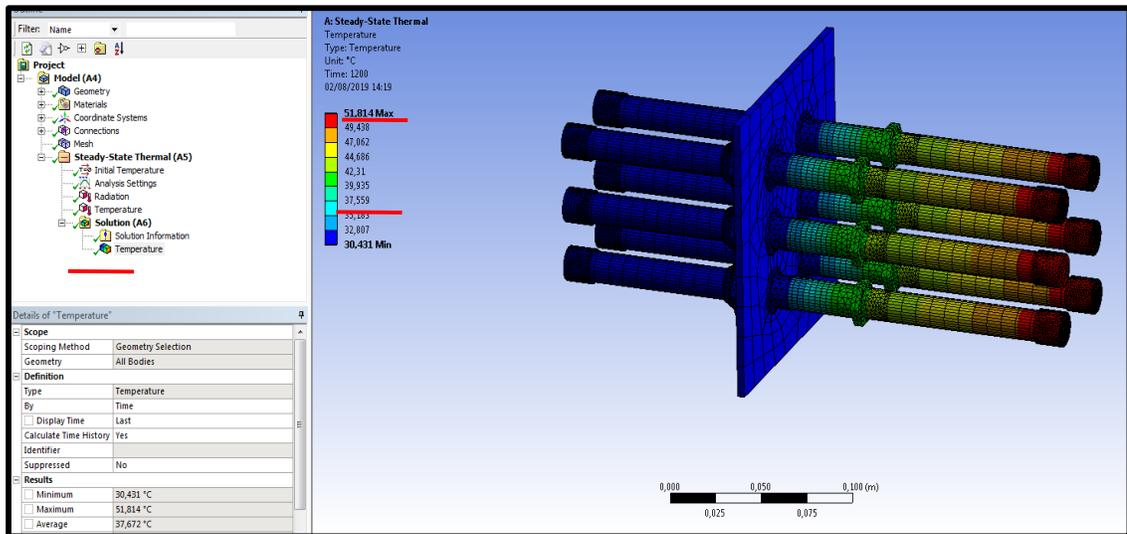


Figura 3-18: Segunda medición con el Haz de 6 Tubos de calor.

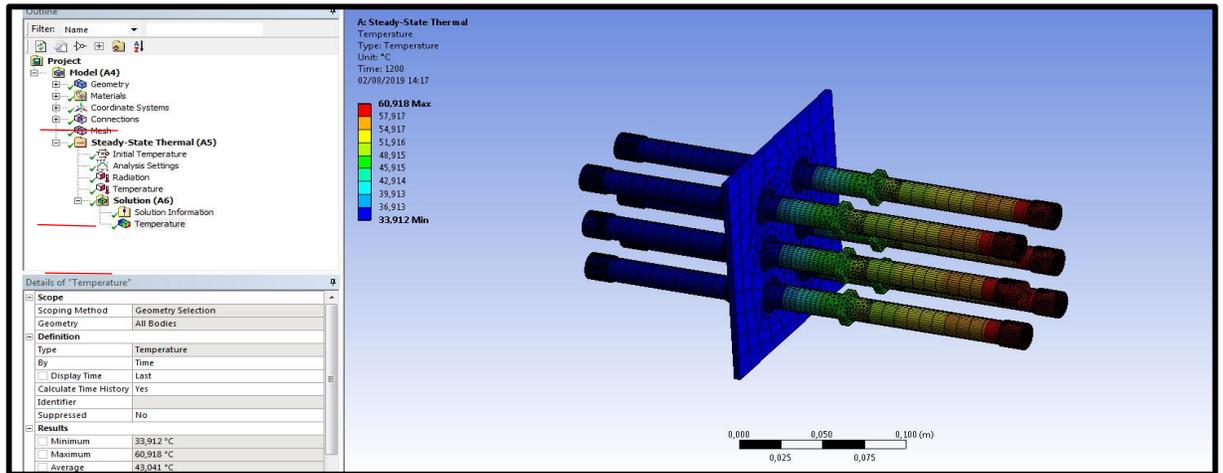
Por lo que se tiene como resultados:

$$T_{Caliente} = 51.814 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Media} = 37.56 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Frio} = 30.431 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Mientras que en la tercera medición da los siguientes resultados:



**Figura 3-19:** Tercera medición con el Haz de 6 Tubos de calor.

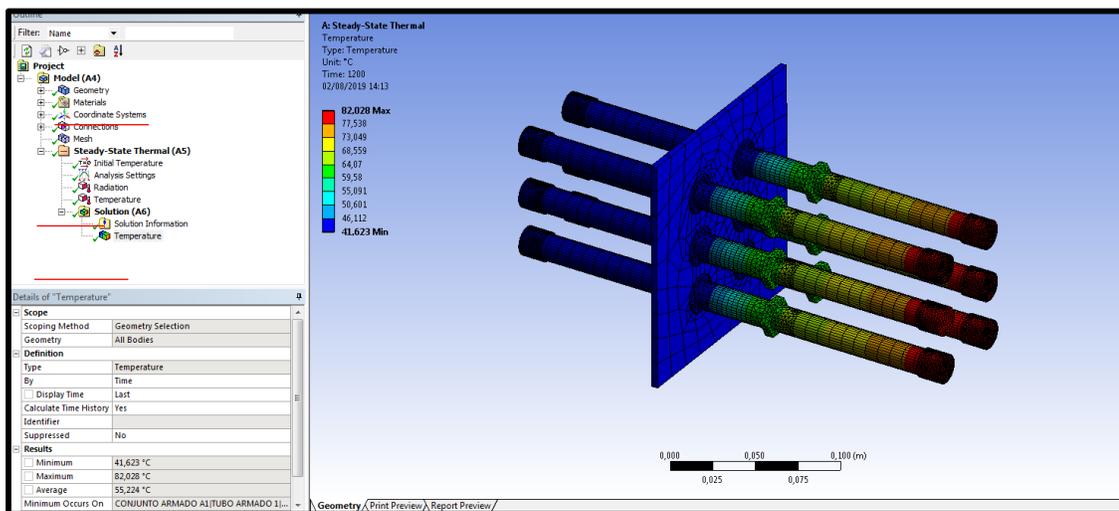
Por lo que se tiene como resultados:

$$T_{Caliente} = 60.918 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Media} = 42.914 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Frio} = 33.912 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Finalmente, la cuarta medición da los siguientes resultados:



**Figura 3-20:** Cuarta medición con el Haz de 6 Tubos de calor.

Por lo que se tiene como resultados:

$$T_{Caliente} = 82.028 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Media} = 55.091 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Frio} = 41.623 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Por lo que en resumen se tiene que:

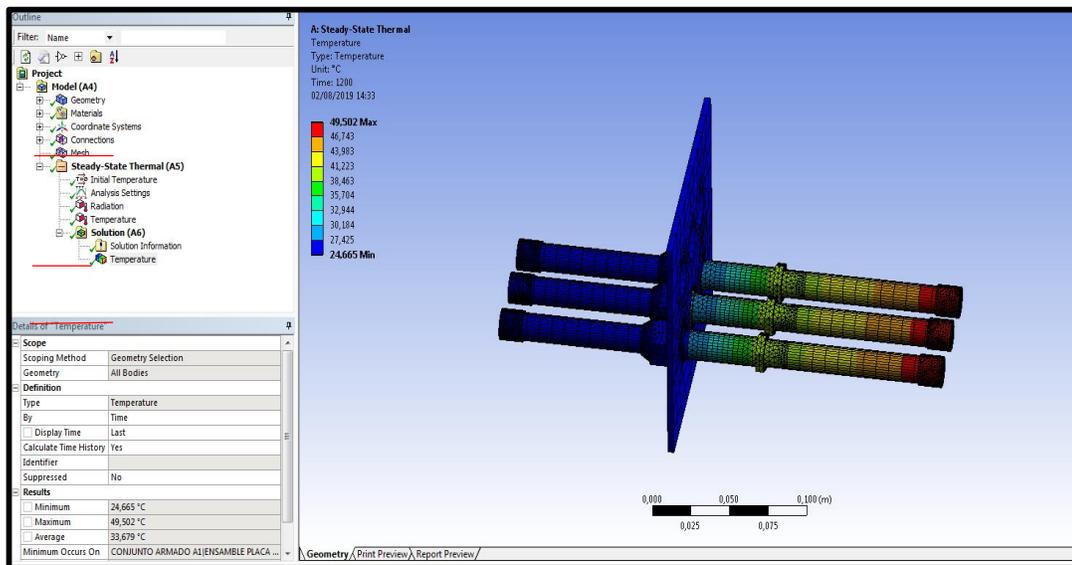
**Tabla 3-8:** Resultados de comparación de temperaturas dadas

COMPARACION DE TEMPERATURAS				
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Números de Mediciones	$T_{Lado Frio} \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{Lado Caliente} \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{Lado Adiabatico} \text{ }^{\circ}\text{C}$
	1	20,153	45,113	28,474
	2	30,431	51,814	37,56
	3	33,912	60,9	42,914
	4	41,623	82,028	59,091

Elaborado por: El Autor

### Configuración con 3 tubos de calor.

En la configuración de los 3 tubos de calor aplicado distintas temperaturas se tiene los siguientes resultados:



**Figura 3-21:** Primera medición con el Haz de 3 Tubos de calor.

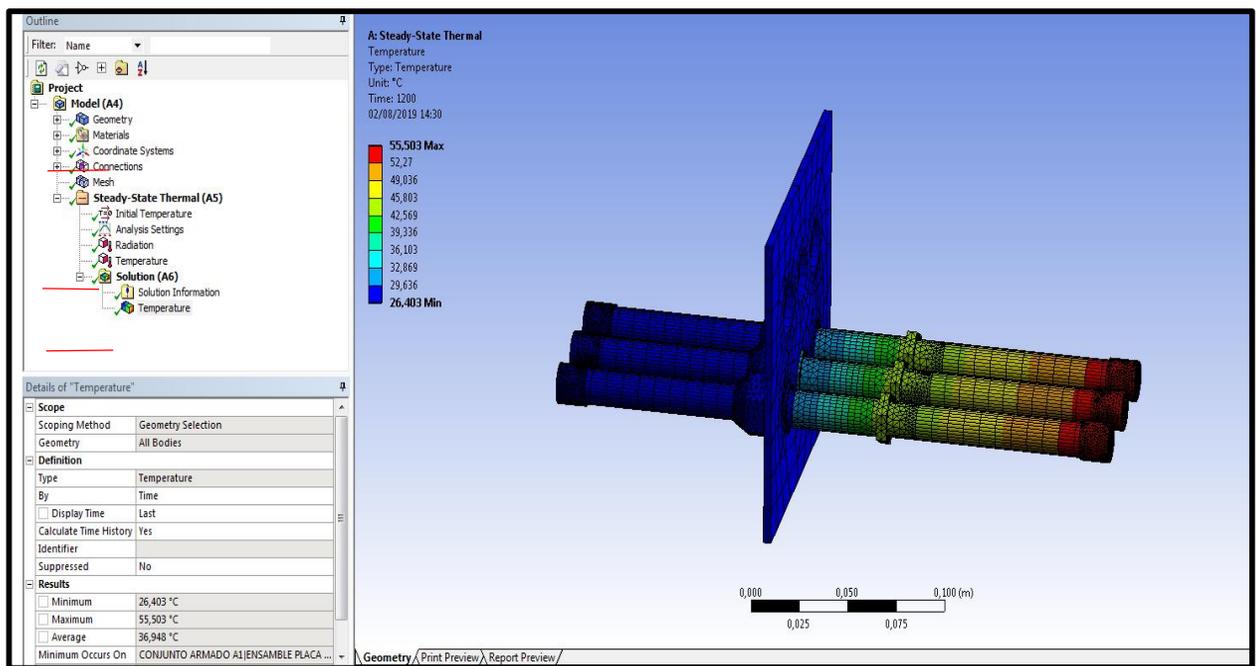
Por lo que se tiene como resultados:

$$T_{Caliente} = 49.502 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Media} = 32.944 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Frio} = 24.665 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

A continuación, se dan los resultados adquiridos en la segunda medición.



**Figura 3-22:** Segunda medición con el Haz de 3 Tubos de calor.

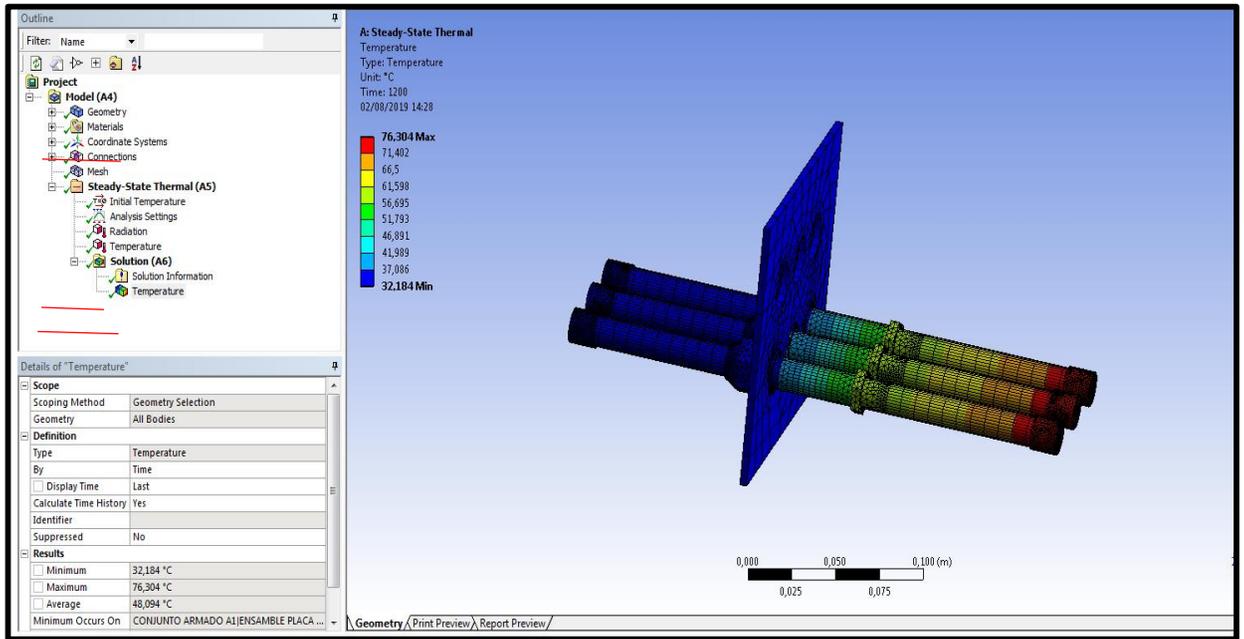
Por lo que se tiene como resultados:

$$T_{Caliente} = 55.503 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Media} = 36.103 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Frio} = 26.403 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Finalmente se tiene los resultados adquiridos en la tercera medición.



**Figura 3-23:** Tercera medición con el Haz de 3 Tubos de calor.

Por lo que se tiene como resultados:

$$T_{Caliente} = 76.304 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{Media} = 37.086 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{Frío} = 32.184 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por lo que en resumen se tiene que:

**Tabla 3-9:** Resultados de comparación de temperaturas dadas

COMPARACION DE TEMPERATURAS				
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Números de Mediciones	$T_{Lado Frío} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{Lado Caliente} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{Lado Adiabatico} \text{ } ^\circ\text{C}$
	1	24,7	49,5	32,9
	2	26,4	55,5	36,1
	3	32,184	76,304	37,086

Elaborado por: El Autor

## Configuración con 2 tubos de calor.

En la configuración de los 2 tubos de calor aplicado distintas temperaturas se tiene los siguientes resultados:

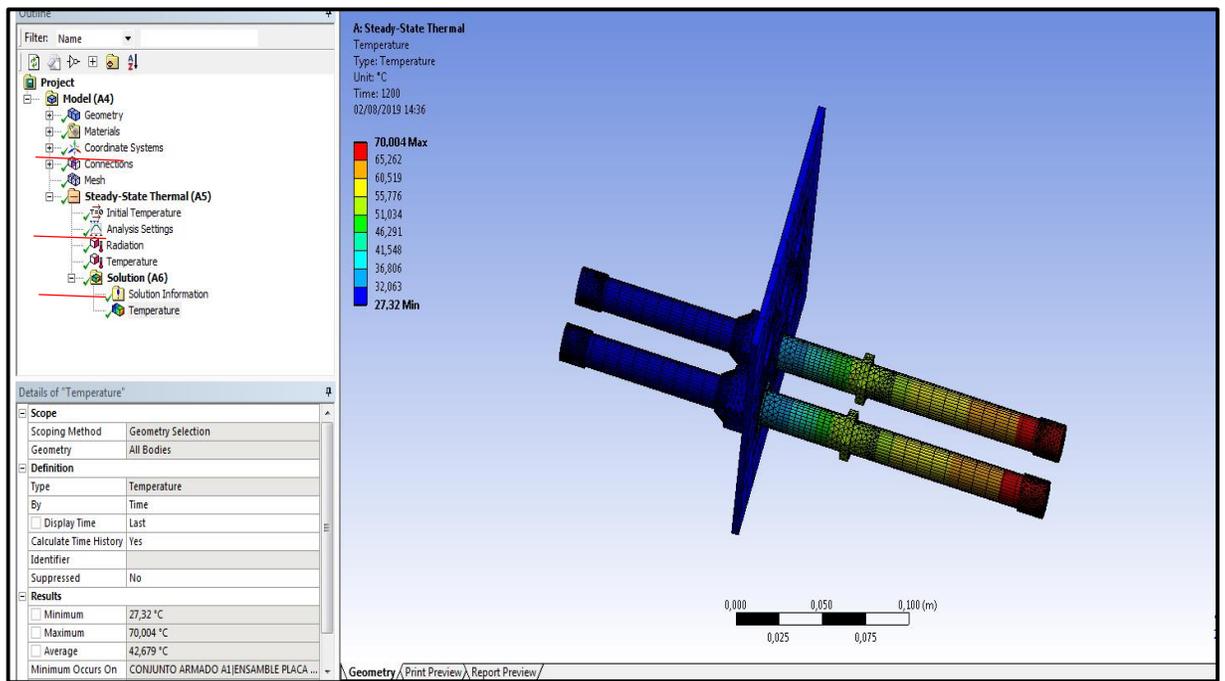


Figura 3-24: Primera medición con el Haz de 2 Tubos de calor.

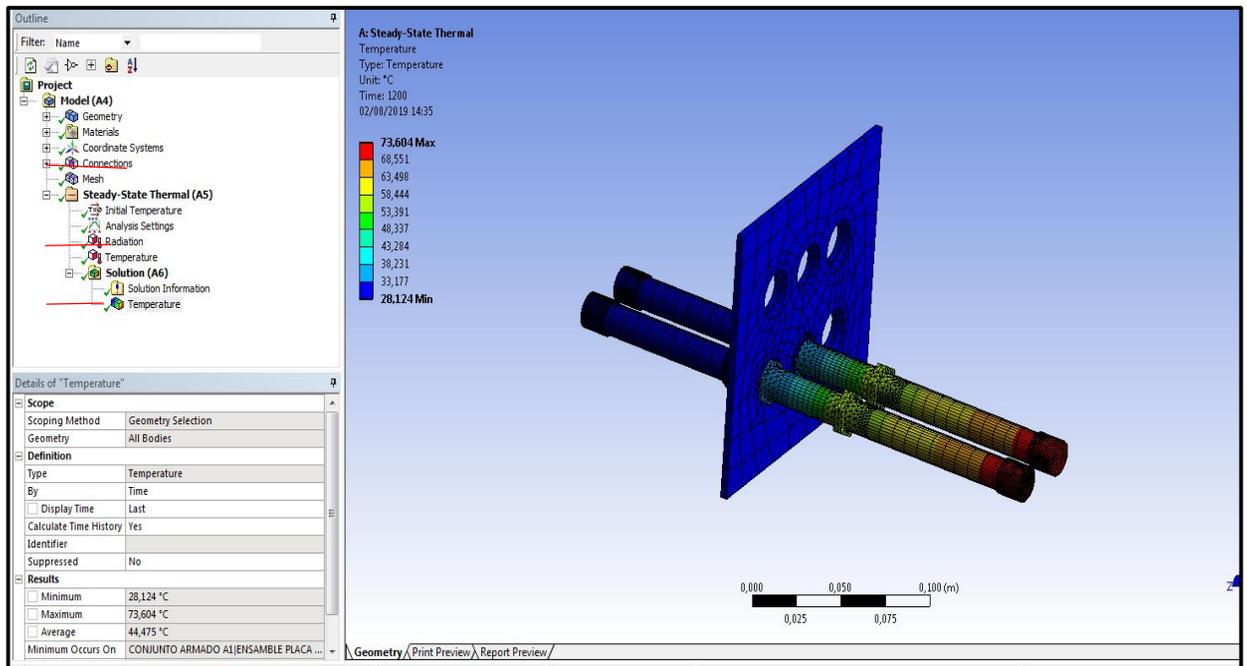
Por lo que se tiene como resultados:

$$T_{Caliente} = 70.004 \text{ °C}$$

$$T_{Media} = 51.034 \text{ °C}$$

$$T_{Frío} = 36.806 \text{ °C}$$

Finalmente se tiene los resultados adquiridos en la segunda medición.



**Figura 3-25:** Segunda medición con el Haz de 2 Tubos de calor.

Por lo que se tiene como resultados:

$$T_{Caliente} = 73.604 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Media} = 53.391 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Frio} = 38.231 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Por lo que en resumen se tiene que:

**Tabla 3-10:** Resultados de comparación de temperaturas dadas

COMPARACION DE TEMPERATURAS				
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Números de Mediciones	$T_{Lado Frio}$ °C	$T_{Lado Caliente}$ °C	$T_{Lado Adiabatico}$ °C
● ●	1	36,806	70,004	51,034
	2	38,231	73,604	53,391

**Elaborado por:** El Autor

Por lo que como resumen final se tiene que:

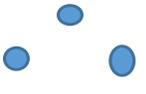
**Tabla 3-11:** Resumen de resultados de temperaturas

COMPARACION DE TEMPERATURAS				
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Números de Mediciones	$T_{Lado\ Frio} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{Lado\ Caliente} \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{Lado\ Adiabatico} \text{ } ^\circ\text{C}$
	1	20,153	45,113	28,474
	2	30,431	51,814	37,56
	3	33,912	60,9	42,914
	4	41,623	82,028	59,091
	1	24,7	49,5	32,9
	2	26,4	55,5	36,1
	3	32,184	76,304	37,086
	1	38,231	73,604	53,391
	2	36,806	70,004	51,034

Elaborado por: El Autor

Por lo que la comparación entre los ensayos termográficos y los analizados por el MEF (Método Por Elementos Finitos).

**Tabla 3-12:** Comparación de resultados de temperaturas Lado Caliente

COMPARACION DE TEMPERATURAS Lado Caliente			
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Números de Mediciones	TERMOGRAFIA	MEF
	4	82	82,028
	3	76,3	76,304
	2	70	70,004

Elaborado por: El Autor

Como se puede observar las temperaturas son semejantes variando por décimas generando un error máximo de 0.1 %, dando como aceptable.

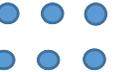
**Tabla 3-13:** Comparación de resultados de temperaturas Lado Frío

COMPARACION DE TEMPERATURAS LADO FRIO			
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Números de Mediciones	TERMOGRAFIA	MEF
	4	41,5	41,623
	3	32	32,184
	2	35	36,806

Elaborado por: El Autor

Como se puede observar las temperaturas son semejantes variando por décimas generando un error máximo de 0.5 %, dando como aceptable.

**Tabla 3-14:** Comparación de resultados de temperaturas Lado Adiabático

COMPARACION DE TEMPERATURAS LADO ADIABATICO			
CONFIGURACION DE TUBOS DE CALOR	Números de Mediciones	TERMOGRAFIA	MEF
	4	48,4	59,091
	3	33,4	37,086
	2	41,1	51,034

Elaborado por: El Autor

Como se puede observar las temperaturas son semejantes variando por décimas generando un error máximo 6.34 %, dando como aceptable.

### 3.1.3 Verificación de la Hipótesis

Una vez que se ha realizado la respectiva configuración de los tubos de calor y a su vez realizado el respectivo análisis térmico se obtienen los datos en tres zonas diferentes que

nos permite visualizar de forma clara la variación de temperatura que se da en cada zona. Con los datos disponibles, se empleó el estadístico de prueba de hipótesis T-Student de homogeneidad

#### **3.1.3.1 Hipótesis Nula (H0):**

Con la variación en la configuración en arreglos de tubos de calor no permitirá obtener diferentes distribuciones de temperatura.

#### **3.1.3.2 Hipótesis Alterna (H1):**

Con la variación en la configuración en arreglos de tubos de calor se permitirá obtener diferentes distribuciones de temperatura.

#### **3.1.3.3 Variable independiente**

Configuración de tubos de calor.

#### **3.1.3.4 Variable dependiente**

Distribución de temperatura

#### **3.1.4 Verificación estadística**

La verificación se procederá a determinar mediante la Prueba “t” student, útil para observaciones no pareadas en los diferentes grupos, lo que permitirá demostrar si la hipótesis planteada es válida o no para la investigación presente.

Para la comprobación de la hipótesis se realizará un ensayo bilateral hacia las 2 colas, con un nivel de significación  $\alpha= 5\%$

$$\text{Probabilidad } (P) = \frac{\alpha}{100} \quad (1)$$

$$\text{Probabilidad } (P) = \frac{5}{100}$$

$$\text{Probabilidad } (P) = 0,05$$

Como se analiza para 2 colas la probabilidad se divide para 2 teniendo entonces:

$$\text{Probabilidad } (P) = \frac{0,05}{2}$$

$$\text{Probabilidad } (P) = 0,025$$

Los grados de libertad de acuerdo

$$gl = (N_A - 1) + (N_B - 1) \quad \text{Ec. 3- 1}$$

$$gl = (9 - 1) + (5 - 1) = 12$$

Con los datos expuestos se debe dirigir a la tabla de “t” de Student, donde se obtiene:

Entonces con estos datos nos dirigimos a la tabla de “t” (ver Anexo A) y obtenemos:

$$"t"_{\text{tabla}_{12gl;0.025}} = 2.1788$$

Como se analiza para las 2 colas tenemos

$$"t"_{\text{tab}} = \pm 2.1788$$

### 3.1.5 Regla de decisión

Se acepta la hipótesis alterna H1, si el valor de “t” calculado se encuentra fuera del intervalo de  $-2,1788$  a  $2,1788$  caso contrario se acepta H0

**3.1.5.1 Verificación de la hipótesis con respecto a la temperatura promedio originada en los tubos de calor.**

**Tabla 3-15:** Verificación de las temperaturas promedios

<b>PROCESO 1 Quemador</b>			<b>PROCESO 2 Calderin</b>		
<b>Muestra</b>	<b><math>\Delta T(^{\circ}C)</math></b>	<b><math>(\Delta T)^2</math></b>	<b>Muestra</b>	<b><math>\Delta T(^{\circ}C)</math></b>	<b><math>(T_p)^2</math></b>
1	23.50	552,25	1	13.50	182,25
2	22.70	515,29	2	17.40	302,76
3	27.60	761,76	3	20.80	432,64
4	40.50	1640,25	4	23.10	533,61
5	23.5	552,25	5	27.00	729
6	28.9	835,21	<b>Sumatoria</b>	<b>101,80</b>	<b>2180,26</b>
7	44.3	1962,49	<b>Promedio</b>	<b>20.36</b>	<b>436.05</b>
8	32.90	1082,41			
9	35.00	1225			
<b>Sumatoria</b>	<b>278,90</b>	<b>9126,91</b>			
<b>Promedio</b>	<b>30.988</b>	<b>1014.11</b>			

### 3.1.5.2 Cálculo de varianza de la muestra

$$scxa = \sum Ra^2 - \frac{\sum(Ra)^2}{n} \quad scxb = \sum Rb^2 - \frac{\sum(Rb)^2}{n} \quad \text{Ec. 3-2}$$

$$scxa = 9126.91 - \frac{(278.9)^2}{9} = 484.10 \quad scxb = 2180.26 - \frac{(101.80)^2}{5} = 107.6$$

### 3.1.5.3 Varianza combinada

$$Sc^2 = \frac{scxa+scxb}{(na-1)+(nb-1)} \quad \text{Ec. 3-3}$$

$$Sc^2 = \frac{484.10 + 107.6}{(9 - 1) + (5 - 1)} = 49.31$$

### 3.1.5.4 Desviación estándar de las diferencias

$$\overline{sd} = \sqrt{Sc^2 \left( \frac{na+nb}{na*nb} \right)} \quad \text{Ec. 3-4}$$

$$\overline{sd} = \sqrt{49.31 \left( \frac{9+5}{9*5} \right)} = 3.916$$

### 3.1.5.5 Valor de t

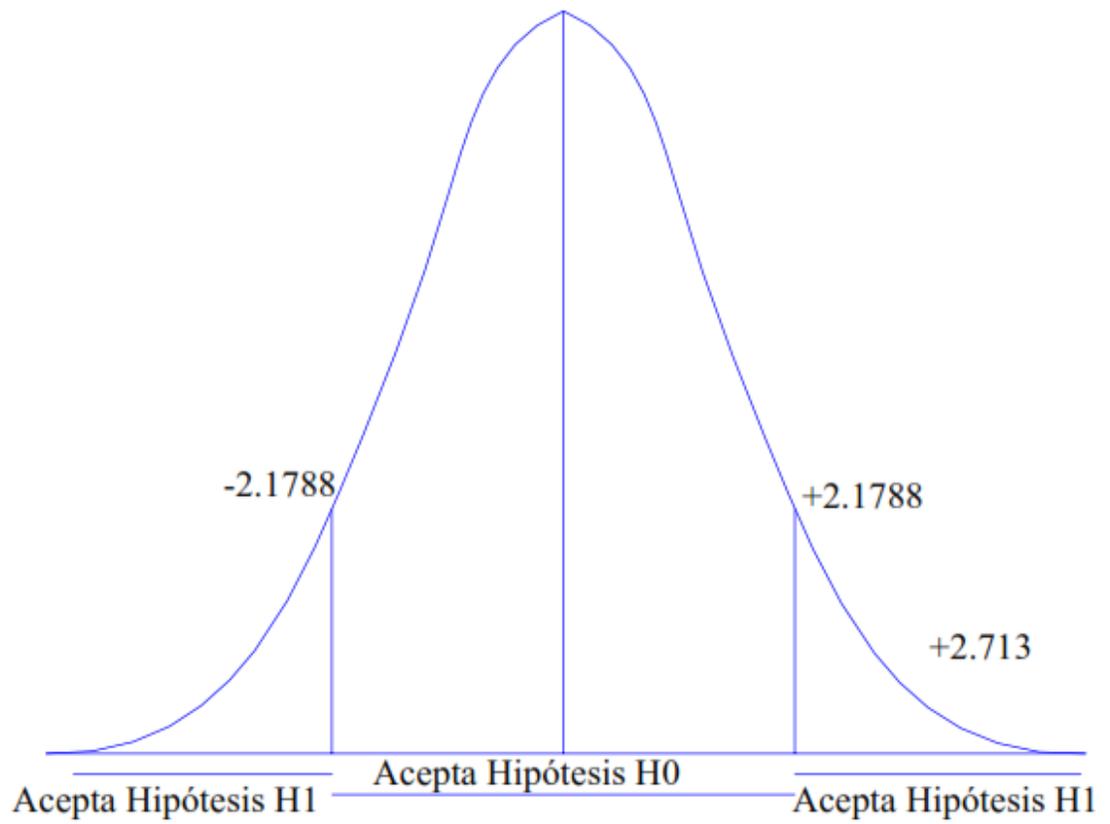
$$t = \frac{\overline{xa} - \overline{xb}}{\overline{sd}} \quad \text{Ec. 3-5}$$

$$t = \frac{30.988 - 20.36}{3.916} = 2.713$$

Entonces se tiene que:

$$t_{cal} = 2.713 \text{ esta fuera del rango } t_{tab} = \pm 2.1788$$

Como el valor calculado esta fuera del rango determinado como es de  $\pm 2,179$ , se rechaza la hipótesis nula H0, y se acepta la hipótesis alterna H1, es decir con la configuración de los tubos de calor si se permitirá determinar una distribución de temperatura.



Como se observa que el valor calculado es 2.713, el cual está fuera del valor definido por las tablas que son de  $\pm 2.1788$ , se da por aceptada la Hipótesis H1 alterna. Como se indicó anteriormente.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- Al realizar las mezclas de polvo de Cu con perlas de urea y etilenglicol se debe determinar el peso del porcentaje que se ha utilizado para tener en cuenta cuáles serán los adecuados y que en lo posterior permitirán obtener buenos resultados.
- Se obtuvieron mejores resultados usando un 40% de polvo de Cu, con un 60% de perlas de Urea y un volumen de 4ml de etilenglicol obteniendo una mezcla con buena adherencia entre el polvo de Cu y las perlas de urea, y a su vez aplicando una presión de 40bar, para compactar la mezcla, que se la realizo en tres intervalos de compactación.
- Al realizar comparación entre los arreglos en la configuración de tubos de calor al haber realizado las pruebas se puede observar de los resultados obtenidos que el valor mayor de  $\Delta T$  con respecto al tiempo se encuentra en el arreglo de los tres tubos de calor.
- En la tabla 3.6 puede apreciar de forma clara que el valor obtenido de la temperatura del  $\Delta T$  en el arreglo de la configuración de tres tubos es mayor en comparación con las temperaturas de los arreglos de 6 y 2 respectivamente, resaltando que tanto los valores de las temperaturas del lado caliente como del lado frio en el arreglo de tres tubos es menor en comparación a las temperaturas de los otros dos arreglos, concluyendo que el arreglo de tres tubos proporciona resultados más claros y lecturas más definidas en el caso de un análisis termográfico.
- Los porcentajes de error que se puede apreciar tanto en la tabla 3-12 como en la tabla 3-13 y en la tabla 3-14 son aceptables puesto que al comparar los resultados de la experimentación termográfica con los resultados obtenidos por el MEF, permite

concluir y validar las pruebas hechas en el laboratorio ya que ha desplegado resultados semejantes a los obtenidos por el método termográfico.

## 4.2 Recomendaciones

Como recomendaciones se sugiere las siguientes:

- Se sugiere dejar un tiempo de estabilización de unos 5 minutos para que comience a funcionar correctamente el tubo de calor.
- Se recomienda pesar cada porcentaje de la medida de los materiales que van a utilizar para tener en cuenta cuanto se va a ocupar y de esta manera evitar desperdiciar el mismo.
- La temperatura recomendable a la que se puede lograr obtener un buen proceso de sinterizado es de 750°C, y dejar dentro del horno por un tiempo estimado de 1 hora.
- Se recomienda compactar a una presión máxima de 40bar o 580psi para evitar que la probeta se deforme, y de igual manera que se vaya a atorar en el bocín.
- Dependiendo de la temperatura de operación es conveniente seleccionar el tipo de suelda apropiada, ya que si tenemos temperatura que sobrepasan los 120 °C, esta unión puede abrirse (fundirse) y consecuentemente dejar escapar el fluido de trabajo.
- El material que se utilizará como contenedor (tubo de Cu) debe ser capaz de soportar los ataques externos al que estará sometido, como son: presión, corrosión.
- Se recomienda modelar el proceso interno usando para ello software de elementos finitos que permita simular, analizar e interpretar en forma clara y lógica el comportamiento de estos datos para comparar con los que experimentalmente se obtengan.

## Bibliografía

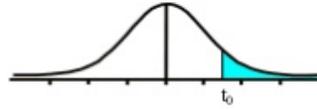
- [1] C. F. Guerra del Rio, Modelamiento y simulación de un tubo de calor de alta temperatura, Medellín-Colombia: Autor - Editor, 2013.
- [2] J. Cerón, Análisis del mecanismo de transferencia de calor en colectores térmicos y de la influencia de las condiciones de contorno, Cartagena: Autor - Editor, 2012.
- [3] L. Escobar, Análisis del material de la mecha en los tubos de calor y su influencia sobre la temperatura en la zona de condensado, Ambato: Autor - Editor, 2014.
- [4] Y. Cengel y A. Ghajar, Transferencia de calor y masa, México D.F.: McGrawHill, 2011.
- [5] C. Guerra, Modelamiento y simulación de un tubo de calor de alta temperatura, Medellín: Autor - Editor, 2013.
- [6] N. Moraga, V. Bubnovich y M. Letelier, Desarrollo Histórico de los Tubos de Calor y sus Aplicaciones, Santiago de Chile: Autor - Editor, 2012.
- [7] A. L. Miranda, Tubos de calor (Una tecnología para el siglo XXI), Barcelona-España: Ediciones-Ceac, 2005.
- [8] Á. Miranda, Tubos de calor, Barcelona: MARCOMBO, S.A., 2010.
- [9] G. Peterson, An Introduction to heat pipes, modeling, testing and applications, Nueva York: John Wiley and Sons, 1994.
- [10] S. Chi, Heat pipe, theory and practice, Nueva York: MacGraw Hill, 1976.
- [11] C. F. K. Roberts, Predicting the performance of heat pipes with partially wicks, Nueva York: 72-WA/HT-38, 1972.
- [12] D. Kesser, Experimental determination of properties of saturated sintered wicks. Proceeding of the First international Heat Pipe conference, Stuttgart, 1973.
- [13] V. Streeter, Mecánica de los fluidos, Madrid-España: ediciones del Castillo, 1967.
- [14] M. Arcís, Funcionamiento de un termosifón cilíndrico con distintos fluidos de trabajo, Pamplona: Autor - Editor, 2010.
- [15] L. Paris, TUBOS DE CALOR Y TERMOSIFONES BIFÁSICOS: ALTERNATIVAS PARA LA CONSERVACIÓN DE ENERGÍA., Cusco: Autor - Editor, 2007.

- [16] V. Juárez, Análisis del Rendimiento de Termosifones Bifásicos no capilares., CDMX: Autor - Editor, 2018.
- [17] H. Sierralta, «Intercambiadores de Calor,» mundohvacr, Noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.mundohvacr.com.mx/2014/11/intercambiadores-de-calor-fabricados-con-cobre/>. [Último acceso: 16 Noviembre 2018].
- [18] A. Álvarez, Investigación experimental para determinar la cantidad de fluido interno en termosifones bifásicos, México D.F.: Autor - Editor, 2009.
- [19] A. HUANACUNI, ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN COMPUESTO DE MATRIZ METÁLICA RICO EN 80% DE COBRE, ALEADO CON ZINC Y ESTEARATO DE ZINC PARA EVALUAR LA DUREZA Y EL DESGASTE VÍA LA PULVIMETALURGIA, Arequipa: Autor - Editor, 2015.
- [20] Á. Machado, E. Shimoto, R. Silverio, G. García, C. Chagoyén y J. Moya, «SINTERIZACIÓN, UN PROCESO DE CONFORMACIÓN DE METALES COMO ALTERNATIVA ECONÓMICA CON UN BAJO IMPACTO AMBIENTAL,» *Centro Azúcar*, vol. 44, nº III, pp. 83 - 92, 2017.

# **ANEXOS**

## Anexo A1

Tabla t-Student



Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385
33	0.6820	1.3077	1.6924	2.0345	2.4448	2.7333
34	0.6818	1.3070	1.6909	2.0322	2.4411	2.7284
35	0.6816	1.3062	1.6896	2.0301	2.4377	2.7238
36	0.6814	1.3055	1.6883	2.0281	2.4345	2.7195
37	0.6812	1.3049	1.6871	2.0262	2.4314	2.7154
38	0.6810	1.3042	1.6860	2.0244	2.4286	2.7116
39	0.6808	1.3036	1.6849	2.0227	2.4258	2.7079
40	0.6807	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045
41	0.6805	1.3025	1.6829	2.0195	2.4208	2.7012
42	0.6804	1.3020	1.6820	2.0181	2.4185	2.6981
43	0.6802	1.3016	1.6811	2.0167	2.4163	2.6951
44	0.6801	1.3011	1.6802	2.0154	2.4141	2.6923
45	0.6800	1.3007	1.6794	2.0141	2.4121	2.6896
46	0.6799	1.3002	1.6787	2.0129	2.4102	2.6870
47	0.6797	1.2998	1.6779	2.0117	2.4083	2.6846
48	0.6796	1.2994	1.6772	2.0106	2.4066	2.6822
49	0.6795	1.2991	1.6766	2.0096	2.4049	2.6800

## Anexo A2-1

### Tablas de Yunus A. Cengel

Tabla A-1

908 TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES SI)						
TABLA A-1						
Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico						
Sustancia	Fórmula	Masa molar, <i>M</i> kg/kmol	Constante de gas, <i>R</i> kJ/kg · K*	Propiedades del punto crítico		
				Temperatura, K	Presión, MPa	Volumen, m <sup>3</sup> /kmol
Agua	H <sub>2</sub> O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Aire	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Alcohol etílico	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Alcohol metílico	CH <sub>3</sub> OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argón	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromo	Br <sub>2</sub>	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
<i>n</i> -Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Cloro	Cl <sub>2</sub>	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Cloroformo	CHCl <sub>3</sub>	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Cloruro metílico	CH <sub>3</sub> Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Criptón	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl <sub>2</sub> F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Dióxido de sulfuro	SO <sub>2</sub>	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helio	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
<i>n</i> -Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hidrógeno (normal)	H <sub>2</sub>	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Metano	CH <sub>4</sub>	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Monóxido de carbono	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Neón	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxígeno	O <sub>2</sub>	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Tetracloruro de carbono	CCl <sub>4</sub>	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Tetrafluoroetano (R-134a)	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	102.03	0.08149	374.2	4.059	0.1993
Triclorofluorometano (R-11)	CCl <sub>3</sub> F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Xenón	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

\*La unidad en kJ/kg · K es equivalente a kPa · m<sup>3</sup>/kg · K. La constante de gas se calcula de  $R = R_u/M$ , donde  $R_u = 8.31447$  kJ/kmol · K y  $M$  es la masa molar.

Fuente: K. A. Kobe y R. E. Lynn, Jr., *Chemical Review* 52 (1953), pp. 117–236; y ASHRAE, *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA: Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire, Inc., 1993), pp. 16.4 y 36.1.

Anexo A2-2

TABLA A-2

TABLA A-2

Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes

a) A 300 K

Gas	Fórmula	Constante de gas, $R$ kJ/kg · K	$c_p$ kJ/kg · K	$c_v$ kJ/kg · K	$k$
Aire	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argón	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0.1889	0.846	0.657	1.289
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helio	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	4.1240	14.307	10.183	1.405
Metano	CH <sub>4</sub>	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Monóxido de carbono	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Neón	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Vapor	H <sub>2</sub> O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Nota: La unidad kJ/kg · K es equivalente a kJ/kg · °C.

Fuente: *Chemical and Process Thermodynamics* 3a. ed., por Kyle, B.G., © 2000. Adaptado con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, Nueva Jersey.

## Apéndice B

### Propiedades de algunos fluidos de trabajo correspondientes a temperaturas de operación medias [2], [3], [16], [19]

Tabla n° 1B Propiedades del agua

T K	p kPa	$\rho_l$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_v$ kg/m <sup>3</sup>	$\mu_l \times 10^5$ kg/(ms)	$\mu_v \times 10^5$ kg/(ms)	$k_l$ W/(mK)	$h_{fg}$ kJ/kg	$\sigma$ N/m	$M \times 10^9$ W/m <sup>2</sup>
280	0,99	1000,0	0,008	14,500	0,0829	0,5680	2486,0	0,074800	128,24
285	1,39	1000,0	0,011	12,500	0,0849	0,5800	2473,0	0,074250	146,90
290	1,92	999,0	0,014	11,000	0,0869	0,5910	2461,0	0,073700	164,72
295	2,62	998,0	0,020	9,680	0,0889	0,6020	2449,0	0,072700	183,56
300	3,54	996,0	0,025	8,670	0,0909	0,6110	2437,0	0,071700	200,73
305	4,72	994,5	0,035	7,810	0,0929	0,6195	2425,5	0,070850	218,82
310	6,23	993,0	0,044	6,950	0,0949	0,6280	2414,0	0,070000	241,43
315	8,14	991,0	0,058	6,395	0,0969	0,6345	2401,5	0,069150	257,34
320	10,54	989,0	0,072	5,840	0,0989	0,6410	2389,0	0,068300	276,33
325	13,53	987,0	0,093	5,380	0,1010	0,6465	2377,0	0,067450	294,13
330	17,21	985,0	0,113	4,920	0,1030	0,6520	2365,0	0,066600	315,34
335	21,71	982,5	0,144	4,615	0,1050	0,6565	2353,0	0,065750	329,37
340	27,18	980,0	0,174	4,310	0,1070	0,6610	2341,0	0,064900	345,46
345	33,78	976,5	0,217	4,050	0,1090	0,6650	2328,5	0,064050	359,59
350	41,68	973,0	0,260	3,790	0,1110	0,6690	2316,0	0,063200	375,78
355	51,08	969,5	0,303	3,530	0,1130	0,6730	2303,5	0,062350	394,46
360	62,19	966,0	0,346	3,270	0,1150	0,6770	2291,0	0,061500	416,23
365	75,26	962,5	0,389	3,010	0,1170	0,6810	2278,5	0,060650	441,89

## Apéndice B

### Propiedades de algunos fluidos de trabajo correspondientes a temperaturas de operación medias [2], [3], [16], [19]

Tabla n° 1B Propiedades del agua

T K	p kPa	$\rho_l$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_v$ kg/m <sup>3</sup>	$\mu_l \times 10^5$ kg/(ms)	$\mu_v \times 10^5$ kg/(ms)	$k_l$ W/(mK)	$h_{fg}$ kJ/kg	$\sigma$ N/m	M x 10 <sup>9</sup> W/m <sup>2</sup>
280	0.99	1000.0	0.008	14.500	0.0829	0.5680	2486.0	0.074800	128.24
285	1.39	1000.0	0.011	12.500	0.0849	0.5800	2473.0	0.074250	146.90
290	1.92	999.0	0.014	11.000	0.0869	0.5910	2461.0	0.073700	164.72
295	2.62	998.0	0.020	9.680	0.0889	0.6020	2449.0	0.072700	183.56
300	3.54	996.0	0.025	8.670	0.0909	0.6110	2437.0	0.071700	200.73
305	4.72	994.5	0.035	7.810	0.0929	0.6195	2425.5	0.070850	218.82
310	6.23	993.0	0.044	6.950	0.0949	0.6280	2414.0	0.070000	241.43
315	8.14	991.0	0.058	6.395	0.0969	0.6345	2401.5	0.069150	257.34
320	10.54	989.0	0.072	5.840	0.0989	0.6410	2389.0	0.068300	276.33
325	13.53	987.0	0.093	5.380	0.1010	0.6465	2377.0	0.067450	294.13
330	17.21	985.0	0.113	4.920	0.1030	0.6520	2365.0	0.066600	315.34
335	21.71	982.5	0.144	4.615	0.1050	0.6565	2353.0	0.065750	329.37
340	27.18	980.0	0.174	4.310	0.1070	0.6610	2341.0	0.064900	345.46
345	33.78	976.5	0.217	4.050	0.1090	0.6650	2328.5	0.064050	359.59
350	41.68	973.0	0.260	3.790	0.1110	0.6690	2316.0	0.063200	375.78
355	51.08	969.5	0.303	3.530	0.1130	0.6730	2303.5	0.062350	394.46
360	62.19	966.0	0.346	3.270	0.1150	0.6770	2291.0	0.061500	416.23
365	75.26	962.5	0.389	3.010	0.1170	0.6810	2278.5	0.060650	441.89

## Anexo C1

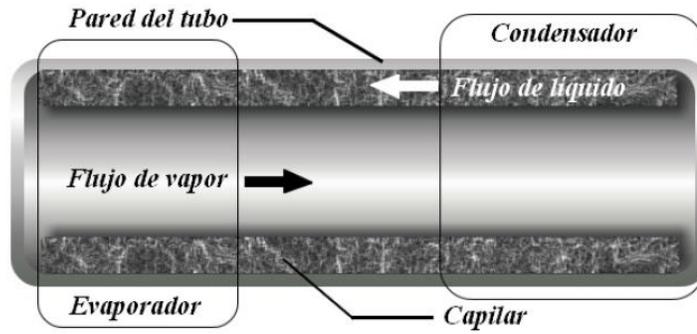


Figura 3. Esquema del tubo de calor.

## Fluidos de trabajo

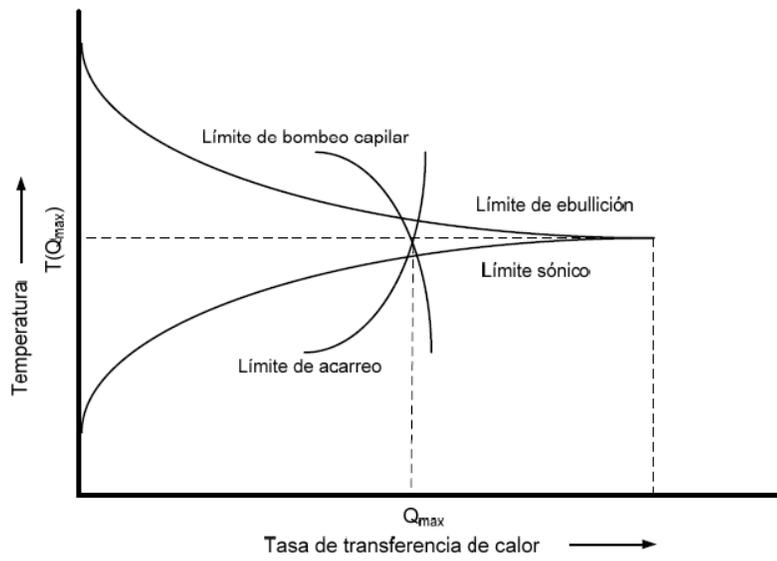


Figura 4. Límites a la transferencia de calor.

## Anexo C2

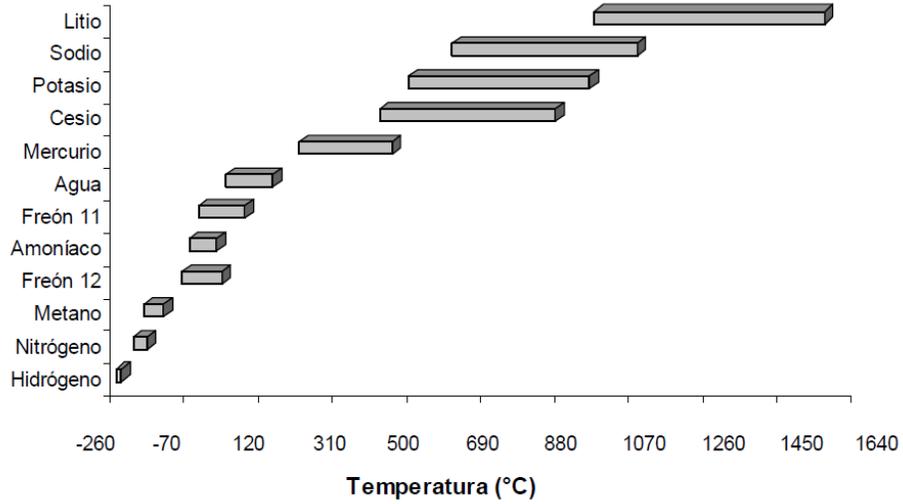


Figura 5. Fluidos de trabajo e intervalos de temperatura.

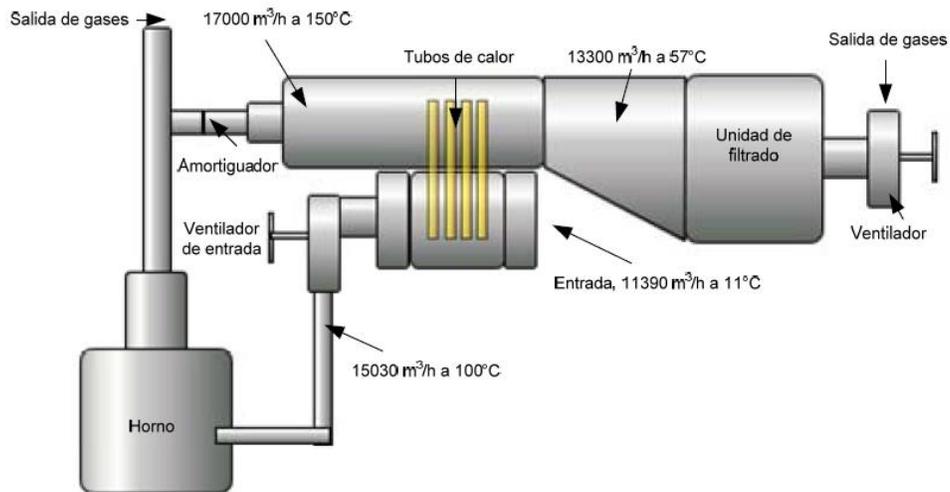


Figura 6. Esquema común de operación de los tubos de calor.

## Anexo D1-1

### Equipos utilizados:

#### Horno de paredes refractarias



#### cámara termográfica FLIR



#### Prensa Manual



#### Balanza electrónica



## Anexo D1-2

### Materiales:

#### Polvo de Cobre y etilenglicol



#### Perlas de urea



**cortador de tubos**



**Flexómetro**

#### tubo de cobre de 1/2 in tipo L



#### improntas para enumerar los tubos



## Anexo D2

### Fotos del primer ensayo realizado



## Anexo D3

### Fotos segundo ensayo realizado



## Anexo D4

### Fotos tercer ensayo realizado



## Anexo D5

### Fotos cuarto ensayo realizado



Anexo D6

Fotos quinto ensayo realizado



Anexo D7

Fotos ensayo final



## Anexo E1

### Medición termográfica realizadas en el quemador redondo



## Anexo E2

### Medición termográfica realizadas en la chimenea del Calderin

