

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS



“DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA EL ESTUDIO DE AISLAMIENTO
TÉRMICO Y ELÉCTRICO DEL VACÍO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

F Í S I C O

P R E S E N T A

LUIS ANGEL VÁZQUEZ PERALTA

ASESOR

FÍS. HÉCTOR DE JESÚS CRUZ-MANJARREZ FLORES-ALONSO

MÉXICO D.F., 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Hoja de datos

1. Datos del alumno

Vázquez

Peralta

Luis Angel

15 57 00 02

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

302199150

2.- Datos del asesor

Fís

Héctor de Jesús

Cruz-Manjarrez

Flores-Alonso

3.- Datos del sinodal 1

Dr

Octavio

Álvarez

Fragoso

4.- Datos del sinodal 2

M en C

Sergio

Hernández

Zapata

5.- Datos del sinodal 3

Fís

Luis

Flores

Morales

6.- Datos del sinodal 4

M en C

Alberto

Barragán

Vidal

7.- Datos del trabajo escrito

Desarrollo de un sistema para el estudio de aislamiento térmico y eléctrico del vacío

56 p

2012

Dedicatoria

Esta tesis la quiero dedicar a mis padres, hermanos y amigos por todo su apoyo
brindado durante mi formación profesional, a mi chaparrito por haberme
llenado de felicidad con su nacimiento, a mi novia hermosa
por su cariño y compañía y a mi amiga Lorena (q.e.p.d),
por todos los recuerdos y enseñanzas
que dejó en mi.

Los amo.

Agradecimientos

Agradezco a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), al Programa de apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) y a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por la beca otorgada para la realización de mi tesis dentro del proyecto “El taller de vacío como medio de vinculación con la industria” con clave PE104611.

Al Instituto de Física por el espacio otorgado para la realización de las pruebas y por las facilidades proporcionadas para la investigación.

Al Taller General del Instituto de Física, al Taller del Departamento de Física Experimental y al Taller de Vacío por la colaboración para la construcción del dispositivo experimental.

A la Facultad de Ciencias de la UNAM, por permitir desarrollarme como estudiante dentro de sus aulas y por ser mi segunda casa, por hacerme sentir orgulloso de ser un egresado más de la carrera de Física.

Quiero agradecer de forma especial a mi asesor de tesis, Héctor de Jesús Cruz-Manjarrez Flores-Alonso, por su ayuda y seguimiento en la realización de mi trabajo, por su paciencia y apoyo en todo momento, por haberme permitido aprender de él y por sus consejos como persona; al laboratorista Carlos Valencia Morales del Taller de Vacío, por el apoyo brindado en la construcción y montaje del dispositivo.

A mis sinodales Octavio Álvarez Fragoso, Alberto Barragán Vidal, Luis Flores Morales y Sergio Zapata Hernández por su tiempo dedicado a la revisión del trabajo y por sus valiosas observaciones.

Agradezco infinitamente a mis padres María de los Ángeles Peralta y Andrés Vázquez, quienes fueron el principal soporte para la realización de mis estudios, mi ejemplo a seguir, mi motivación y por ser quienes siempre me ofrecieron su ayuda incondicional, por haber trabajado tan duro para poder ofrecerme estudios y ayudarme a llegar hasta este momento.

A mis hermanos Julio C. Vázquez P. y Juan A. Vázquez P., por acompañarme en este camino y por todas las vivencias como hermanos.

A todos mis alumnos y ex alumnos, permitirme transmitirles y compartirles un poco de conocimiento; a mis compañeros de trabajo, por dejarme aprender de ellos para mejorar como docente; a todos mis profesores que me transmitieron su conocimiento y que con sus enseñanzas me hicieron crecer.

Gracias también a Tanía Mejía, Leticia Guadalquivir y Pamela Camarillo por todos los momentos compartidos y por sus consejos, a Victoria Silva por todo el apoyo y compañía brindados para alcanzar este objetivo, por las enseñanzas de vida y momentos comunes, a Jaime Domínguez por haber cosechado en mi la semilla para estudiar las bellezas de la física y finalmente a mi hermosa compañera Patricia Marcos, quien me motivó a culminar el trabajo y a continuar mejorando como persona y como profesionista, además de su tiempo brindado y su confianza depositada en mi y en mi trabajo, gracias por festejar conmigo cada uno de los resultados obtenidos durante la realización de mi tesis.

Muchas gracias a todos.

INDICE

Introducción	1
Capítulo I Fundamentos físicos de la Transferencia de Calor	3
1.1 Calor	3
1.2 Ley cero	3
1.3 Transferencia de calor	4
1.4 Conducción	4
1.5 Radiación	5
1.6 Convección	5
1.7 Diferencia entre transferencia de calor y termodinámica	6
1.8 Propiedades térmicas de los materiales	6
1.9 Conductividad térmica	8
1.10 Modelo del Gas Ideal	9
1.11 Teoría cinética de los gases	9
Capítulo II Efectos del vacío en la transferencia de calor por convección	11
2.1 Vacío	11
2.2 Propiedades de los gases	11
2.2a Distribución de velocidades	11
2.2b Camino libre medio	13
2.2c Conductividad térmica	13
2.3 Fenómenos de transporte	14
2.3a Difusión	14
2.3b Viscosidad	15
2.3c Flujo viscoso y flujo molecular	15
2.4 Conductividad térmica en régimen molecular	16
2.5 Presión de una mezcla de gases	17
2.6 Efectos del vacío en las propiedades de un sistema	18
Capítulo III Diseño y operación del dispositivo experimental	21
3.1 Aplicación del vacío en la industria	21
3.2 Propuestas de diseño para un modelo	22
3.3 Dispositivo seleccionado	22
3.4 Diseño del dispositivo experimental	23
3.4a Sistema de calefacción del tubo interno	23
3.4b La cámara de vacío	24
3.5 Construcción del dispositivo	26
3.6 Radiación del sistema de calefacción	31

Capítulo IV Resultados y conclusiones	32
4.1 Metodología de las mediciones	32
4.2 Resultados	33
4.3 Transferencia por convección	45
4.4 Discusión del experimento	46
4.5 Trabajos a futuro	50
4.6 Conclusiones	50
Apéndice A Datos representativos	51
Apéndice B Tablas de termopares	55
Bibliografía	56

Introducción

A lo largo de la carrera de Física se presenta a los estudiantes una serie de conceptos que deben ser comprendidos para su formación como físicos, entre ellos se encuentran los mecanismos de transferencia de calor, en el curso correspondiente se analizan sus características y diferencias de forma teórica y en el laboratorio se llevan a cabo algunas prácticas para comprender conceptos como temperatura y calor, sin embargo en muy pocas ocasiones los estudiantes tienen un acercamiento real con los fenómenos físicos estudiados en la materia. Una de las características de la transferencia de calor por convección conocida y supuesta como un hecho real por la mayoría de los estudiantes es que a menor cantidad de materia se reducen las corrientes de convección y por lo tanto se puede mantener un sistema aislado térmicamente de otro, es decir, si se tienen dos superficies a distinta temperatura con un vacío entre ellas entonces no se da un equilibrio térmico por convección. Un concepto análogo, se presenta en electromagnetismo cuando se habla de portadores de carga sometidos a una diferencia de potencial, en este caso, los electrones libres en el medio colisionan con el gas y se produce una corriente eléctrica. En el vacío, la ausencia de materia entre las superficies, impide que se genere una corriente eléctrica debido a la ausencia de cargas eléctricas; libres, sin embargo, para generar una descarga será necesario aumentar la diferencia de potencial para liberar electrones de la superficie.

El objetivo del presente trabajo fue demostrar experimentalmente que el vacío es un buen aislante térmico y eléctrico, basado en la hipótesis de que a menor cantidad de partículas, se eliminan las corrientes de convección y por lo tanto la transferencia de calor por este mecanismo es prácticamente cero.

Para demostrarlo, se diseñó y construyó una cámara con un sistema formado por una fuente de calor al centro de un arreglo concéntrico de tubos; la bomba es responsable de reducir el número de partículas dentro de la cámara y como consecuencia de la transferencia de calor por convección.

Con este trabajo se pretende inducir a los estudiantes de la carrera de física al área de la física aplicada, facilitando el conocimiento y comprensión de los conceptos físicos aplicados en los procesos industriales, en este caso del uso del vacío como aislante térmico y eléctrico, propiciando la vinculación de los egresados con la industria.

El contenido de la investigación realizada se presenta en cuatro capítulos, en el primero se presentan conceptos físicos relacionados con la transferencia de calor, se definen los conceptos básicos de la termodinámica y se describen de forma general los tres mecanismos de transferencia de calor.

En el segundo capítulo se muestra un análisis específico de la transferencia de calor por convección, se describen las características de los gases y sus propiedades; además, se demuestra de forma teórica el funcionamiento del vacío como aislante térmico.

El tercer capítulo presenta las propuestas de diseño del dispositivo y el modelo seleccionado para su construcción, la evolución de las ideas planteadas para la fabricación, los materiales utilizados, los medidores empleados en las mediciones, se

muestran las dimensiones del dispositivo, la planeación y construcción de cada uno de los componentes del sistema. La cámara se construyó en el Taller General del IF, y en el Taller del Departamento de Física Experimental a partir de un diseño original del trabajo conjunto con el asesor del presente trabajo.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos así como las conclusiones del experimento, se demuestra en base a los resultados que la teoría se cumple y que el vacío es un buen aislante térmico, se presentan aplicaciones del dispositivo existentes en el sector industrial y se plantean otros aun no comercializados debido al costo de hacer vacío. Se plantean experimentos alternativos que se pueden realizar con el mismo dispositivo así como las mejoras que se pueden hacer.

Nota: Las imágenes presentadas a lo largo del trabajo se numeran de acuerdo al capítulo en el que se encuentran y al número de imagen, por ejemplo, la imagen 2.6 se encuentra en el segundo capítulo y ocupa el lugar número 6 en el trabajo.

Capítulo I

Fundamentos Físicos de la Transferencia de Calor

1.1 Calor

El calor es la energía transferida entre dos cuerpos o dos zonas de un mismo cuerpo debido a una diferencia de temperatura, a esta energía se le conoce como energía térmica; la transferencia de energía térmica siempre se da del cuerpo de mayor temperatura al cuerpo de menor temperatura.

Si dos cuerpos pueden intercambiar calor se dice que están en contacto térmico; cuando se alcanza el equilibrio térmico se tiene un estado estacionario y dejan de intercambiar energía en forma de calor entre ellos, es decir, tienen la misma temperatura.

Cuando dos cuerpos no están en equilibrio térmico, al que tenga mayor temperatura se le llama el más caliente y al otro se le conoce comúnmente como cuerpo frío o menos caliente.

La unidad fundamental del calor en el Sistema Internacional de Unidades es 1 Joule (J).

1.2 Ley Cero

“La ley cero establece que si dos cuerpos, A y B están por separado en equilibrio térmico con un tercer objeto, entonces A y B están en equilibrio térmico el uno con el otro.” [1]

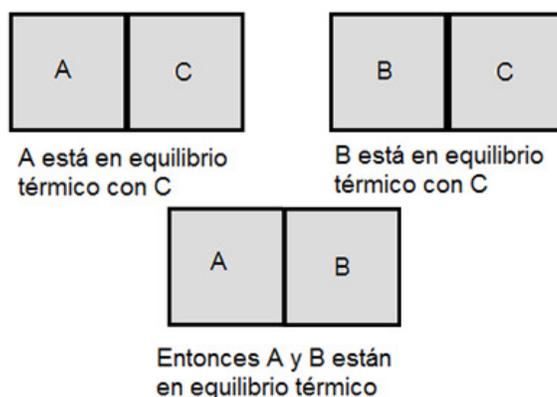


Figura 1.1
Ley Cero de la Termodinámica

Dado que la transferencia de calor sólo se presenta cuando los cuerpos se mantienen a distinta temperatura, es necesario un indicador que permita determinar si dos cuerpos están en equilibrio térmico, sin la necesidad de ponerlos en contacto térmico.

Considerando dos cuerpos A y B tales que entre ellos no exista un contacto térmico, un tercer cuerpo C será quien funcione como indicador. Si se coloca el cuerpo A en contacto térmico con C y se espera a que alcancen el equilibrio térmico, entonces dejará de haber una transferencia de energía entre A y C; si ahora se pone en contacto térmico a los cuerpos B y C y se observa que no hay un intercambio de energía entre ellos, es porque B y C se encuentran en equilibrio térmico, se puede concluir que si A está en equilibrio térmico con C y C está en equilibrio térmico con B entonces A y B también se encuentran en equilibrio térmico, esto es a lo que se le conoce como Ley Cero de la Termodinámica.

1.3 Transferencia de calor

Como ya se ha mencionado, cuando existe una diferencia de temperatura entre dos cuerpos o dos zonas distintas del mismo, se lleva a cabo una transferencia de energía por una o varias de tres formas: conducción, convección y radiación.

1.4 Conducción

El proceso de transferencia de calor por conducción consiste en poner en contacto directo las zonas que se encuentran a distinta temperatura. De acuerdo con la teoría cinética, la temperatura de un cuerpo es proporcional al promedio de la energía cinética de las partículas que lo constituyen. La energía que posee un cuerpo en virtud del movimiento de estas partículas y de las interacciones entre ellas se conoce como energía interna.

De esta forma, entre más rápido se mueven las partículas que conforman un cuerpo, la temperatura es mayor, así como su energía interna; si la velocidad es menor, la energía interna y la temperatura son más bajas. Se deduce, que al contacto físico entre dos cuerpos con diferente temperatura, se llevan a cabo una serie de colisiones entre partículas de ambas superficies, en donde aquellas que tienen una energía cinética mayor ceden parte al colisionar con una de menor energía y tienen como efecto global, la disminución de la temperatura del cuerpo más caliente y el aumento de la temperatura del cuerpo menos caliente.

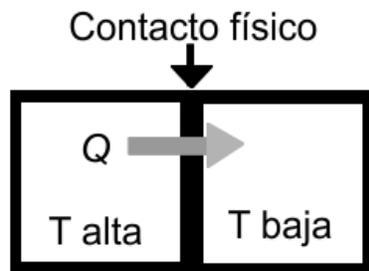


Figura 1.2
Transferencia de calor por conducción

1.5 Radiación

La radiación es un proceso en donde el calor fluye de un cuerpo caliente a otro de menor temperatura cuando los cuerpos están separados, aún cuando exista un vacío entre ellos. El fenómeno de la radiación se asocia a todo cuerpo por el hecho de tener una temperatura distinta del cero absoluto y la expresión que relaciona la energía que radia un cuerpo está dada por la ecuación de Stefan- Boltzmann.

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.1)$$

A esta energía radiada por un cuerpo se le llama calor radiante y es emitida en forma de ondas electromagnéticas, lo que permite que se pueda transferir aun cuando exista un vacío entre los cuerpos. A la capacidad que tiene un objeto para emitir o absorber calor en forma de radiación se le llama emisividad (ε) y es un factor cuyo valor está entre 0 y 1 dependiendo de las propiedades de la superficie, σ es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es de $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Cuando un objeto absorbe toda la radiación que incide sobre él, tiene una emisividad igual a 1 y se le da el nombre de cuerpo negro; así mismo, un cuerpo que no absorbe parte alguna de la radiación incidente tiene una emisividad nula, en este caso el cuerpo se considera como un reflector perfecto.

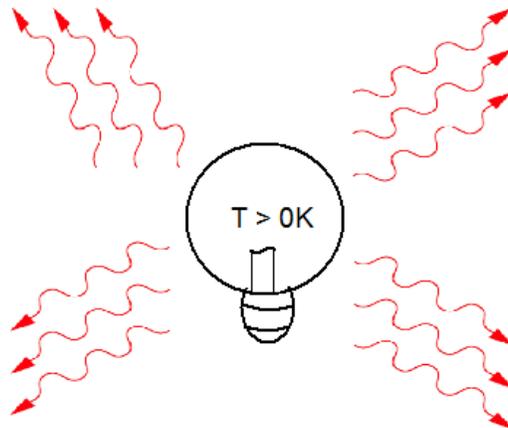


Figura 1.3
Transferencia de calor por radiación

1.6 Convección

“La convección es un mecanismo en donde se genera un flujo de una masa, debido a una diferencia de densidad asociada a un gradiente de temperatura en un fluido.” [2]

En este mecanismo el calor no se transfiere de forma estricta, ya que un fluido es el medio que permite el intercambio de energía entre las partículas de los cuerpos a través de él; esto es, si el fluido se encuentra en contacto térmico con un cuerpo con una temperatura mayor, entonces se transfiere energía de las partículas del objeto a las moléculas del fluido, aumentando su energía y por lo tanto su volumen y temperatura, volviendo esta zona del fluido menos densa que el resto, por lo que, por acción de la gravedad, una masa de fluido más densa la desplazará haciéndola ascender y ocupará el espacio para repetir el proceso.

Cuando la masa caliente que ascendió entra en contacto térmico con una zona a menor temperatura, las moléculas del fluido entregan parte de su energía cinética a las partículas de esta zona, por lo que el fluido se enfría y aumenta su densidad, generando el flujo de masa.

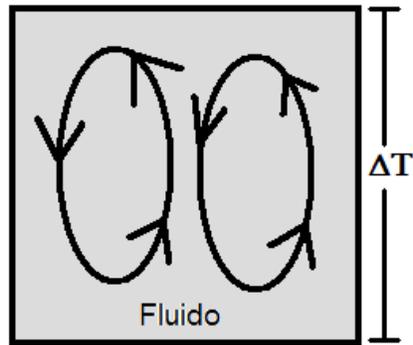


Figura 1.4
Corrientes de convección

Cuando las corrientes de convección se generan por una diferencia de densidad, se le denomina convección natural o convección libre. En cambio, cuando dicho flujo se impulsa con ayuda de algún dispositivo como un ventilador o una bomba, entonces se conoce como convección forzada, un ejemplo de éste tipo de convección es la transferencia de calor por medio del flujo sanguíneo generado por el bombeo del corazón.

La importancia del estudio de este tipo de transferencia de calor, radica en dos razones principales, la primera es que solamente se presenta cuando existe gravedad, por lo que un experimento diseñado en la Tierra en donde se requiera de una convección natural no se puede llevar al espacio, en su lugar, se sustituye por una convección forzada; la segunda, se debe a que en el sector industrial la transferencia de calor por convección se presenta de forma natural debido a que existe aire en la atmósfera, así que para evitar este mecanismo se emplea el “vacío” como aislante térmico, pues las corrientes convectivas disminuyen al aumentar el camino libre medio de las moléculas del fluido.

1.7 Diferencia entre transferencia de calor y termodinámica.

La Ley Cero no establece un modelo que permita predecir la velocidad del proceso de transferencia de energía, además es independiente del mecanismo de transferencia de calor, ya que es aplicable a cualquiera de los tres casos, por esta razón es necesario desarrollar algún modelo que permita evaluar el proceso de transferencia de energía térmica. En el caso de la convección, es necesario establecer un modelo que involucre las propiedades térmicas del fluido, así como su masa y naturaleza, ya que éste es responsable del intercambio de calor.

1.8 Propiedades térmicas de los materiales

La cantidad de calor (Q) en tránsito está asociada a un cambio de temperatura ΔT , así que si el intercambio de calor se debe a un cambio infinitesimal dT , entonces dQ representa la porción de calor transferido. Mientras no haya un cambio de fase de la sustancia a la que se le cambia la temperatura de T_1 a T_2 , el calor necesario para producir

este cambio es directamente proporcional al cambio de temperatura, a la masa y a la naturaleza de la sustancia para recibir calor.

La relación que establece la proporcionalidad entre Q y ΔT está dada por

$$Q = mc\Delta T \quad (1.2)$$

Q es la cantidad de calor en Joules, m es la masa en Kg, c es el calor específico del material de masa (m) en unidades de $J/Kg \cdot K$ donde (K) es la unidad de temperatura Kelvin.

La ecuación 1.2, representa la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de la masa m desde una temperatura inicial hasta una temperatura cualquiera, con lo cual $\Delta T = T_2 - T_1$. Cuando se eleva la temperatura ΔT es positivo y cuando se disminuye ΔT es negativo, por lo que Q conserva el signo de ΔT , de tal forma que si $Q > 0$ entonces entra calor al sistema y si $Q < 0$ sale calor del sistema. Por consiguiente, para un cambio infinitesimal de temperatura dT , la cantidad de calor correspondiente dQ es

$$dQ = mcdT \quad (1.3)$$

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (1.4)$$

el calor específico de una sustancia no depende de la masa con la que se trabaje, sino exclusivamente de su naturaleza, por lo que c es una cantidad intensiva. Se puede escribir la ecuación 1.3 en término del número de moles, ya que $m = nM$ donde M es la masa molar medida en g/mol y n el número de moles, sustituyendo m en dicha ecuación

$$dQ = nMcdT \quad (1.5)$$

al producto Mc se le denomina capacidad calorífica molar cuyo símbolo es C y por lo tanto

$$dQ = nCdT \quad (1.6)$$

es la cantidad de calor necesaria para producir un cambio de temperatura ΔT , de n moles.

Si existe un cambio de fase mientras se añade o se extrae calor de la sustancia, la temperatura no cambia, así que el calor transferido se consume únicamente en el cambio de estado, por lo que la cantidad de calor necesaria para cambiar de fase una cantidad de masa también depende de forma directa de las propiedades naturales de la sustancia, y de su masa

$$Q = \pm mL \quad (1.7)$$

con L el calor latente, que depende del tipo de cambio de fase que se lleve a cabo. El signo positivo indica que entra calor a la sustancia y el signo negativo indica que lo pierde.

La capacidad calorífica de un material se mide experimentalmente bajo distintas condiciones, dependiendo del estado en el que se encuentre, por ejemplo, en los metales

se realizan las mediciones a presión atmosférica y se denota como c_p y C_p ; en el caso de los gases, suele ser más fácil mantener al gas encerrado en un recipiente de volumen constante, en este caso se denotan a las capacidades como c_v y C_v .

1.9 Conductividad térmica

La conductividad térmica (κ) es la capacidad que tiene un material para conducir calor; sus unidades son $W/K\cdot m$ y es una propiedad intensiva. $W = 1 \text{ Watt} = 1 \text{ J/s}$.

La transferencia de calor se relaciona con el movimiento de las partículas que constituyen un cuerpo; cuando una partícula de una zona de alta temperatura se mueve hacia una región de baja temperatura, transporta energía cinética a la parte de baja temperatura del sistema y cede esta energía a través de choques con partículas de baja energía. Entre más movilidad tengan las partículas del medio, más rápido transportan energía y por lo tanto, la conductividad térmica de un gas debe ser dependiente de la temperatura. Para la mayoría de los gases a presiones moderadas, la conductividad térmica es función de la temperatura únicamente, cuando la presión del gas alcanza valores del orden de su presión crítica, o bien, cuando el comportamiento del gas es el de un gas no ideal, se deben de tomar en cuenta otros factores como la presión.

Un material que tiene una alta capacidad para conducir calor recibe el nombre de conductor térmico, mientras que un material con baja capacidad de conducción de calor se le llama aislante térmico.

En varios procesos, se buscan materiales que tengan una conductividad térmica alta, en casos en los que se desea maximizar la transferencia de calor como en los intercambiadores de calor y disipadores; en otros casos se busca el efecto contrario, es decir disminuir la transferencia de calor y se emplean materiales con baja conductividad térmica y vacío.

En la tabla 1.1 se muestran la conductividad térmica de algunos materiales y sustancias comunes.

	$\kappa [W/K\cdot m]$
Metales	
Aluminio	20×10^1
Cobre	39×10^1
Plata	41×10^1
Gases	
Aire	2.4×10^{-2}
Hidrógeno	1.4×10^{-1}
Oxígeno	2.3×10^{-2}
Otros	
Asbesto	8×10^{-2}
Concreto	8×10^{-1}
Hielo	17×10^{-1}

Tabla 1.1
Conductividad térmica
(Gases a $0^\circ C$, metales y otros a temperatura ambiente)

1.10 Modelo de Gas Ideal

En el modelo de "Gas Ideal" se emplean las variables termodinámicas: temperatura T , presión p , volumen V y el número de moles n , que contiene una masa m del gas. La ecuación que relaciona las variables termodinámicas se llama ecuación de estado y un gas en el que las partículas que lo constituyen no interactúan entre ellas, recibe el nombre de gas ideal. En la realidad, un gas a presión atmosférica y temperatura ambiente obedece de forma muy aproximada la ecuación de estado de un gas ideal, a la cual se le nombra Ley del Gas Ideal

$$pV = nRT \quad (1.8)$$

p es la presión a la que se mantiene el gas cuya unidad fundamental es el Pascal (Pa), $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$, V es el volumen que ocupa en metros cúbicos (m^3), T es su temperatura en Kelvin y R es la constante universal de los gases ($R = 8.31 \text{ J/k}\cdot\text{mol}$), esta misma ecuación se puede escribir en términos del número de partículas contenidas, ya que el número de moles está dado por $n=(N/N_A)$ donde N es el número total de partículas y N_A es el número de Avogadro; realizando la sustitución en la ecuación 1.8, se obtiene la expresión

$$pV = Nk_B T \quad (1.9)$$

en donde $k_B=R/N_A$, es la constante de Boltzmann y tiene un valor de $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

Cuando un gas se mantiene a presión constante, la ecuación resultante se llama Ley de Charles

$$\frac{V}{T} = cte \quad (1.10)$$

y cuando se mantiene constante la temperatura, se tiene la ley de Boyle:

$$pV = cte \quad (1.11)$$

en el caso en que el volumen V es constante, entonces la ecuación de estado asociada se conoce como Ley de Gay-Lussac cuya expresión es:

$$\frac{p}{T} = cte \quad (1.12)$$

cada una de las leyes es válida cuando el número de partículas se mantiene constante.

1.11 Teoría Cinética de los Gases

El modelo que se emplea para analizar el comportamiento de las moléculas que constituyen un gas de forma individual, se conoce como Teoría Cinética de los Gases y para poder aplicarse a un gas ideal contenido en un recipiente se requiere considerar los siguientes:

- 1.- El número de moléculas es grande así como la separación media entre ellas.
- 2.- Cada una de las moléculas obedece las leyes de Newton pero el movimiento del

conjunto de moléculas es azaroso.

3.- Todas las colisiones de las moléculas entre sí y con las paredes del recipiente son choques elásticos.

4.- No hay otro tipo de interacción entre las moléculas más que las colisiones elásticas.

5.- Todas las moléculas del gas son idénticas.

A partir de estas suposiciones y de las condiciones de choques elásticos es posible deducir una expresión para la presión y la temperatura del gas ideal en términos de la velocidad cuadrada media de sus moléculas

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) \quad (1.13)$$

La presión es proporcional al número de moléculas por unidad de volumen y a la energía cinética media de las moléculas.

Al comparar las ecuaciones 1.9 y 1.13 se deduce que

$$\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} k_B T \quad (1.14)$$

en donde

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} \quad (1.15)$$

Por lo que la temperatura es directamente proporcional a la energía cinética media de las moléculas, cada grado de libertad aporta $(1/2)k_B T$. La generalización de este resultado es conocida como teorema de la equipartición de la energía, el cual establece que la energía de un sistema en equilibrio se divide por igual entre todos los grados de libertad.

De acuerdo a la teoría cinética de los gases, la presión disminuye cuando disminuye el número de partículas contenidas en cierto volumen, esto implica que el número de colisiones se reduce y la transferencia de energía cinética por colisiones se vuelve menos probable; lo cual es un factor importante en el mecanismo de transferencia de calor por convección. Se puede decir entonces, que un gas a baja presión o al vacío, tiene una conductividad térmica pequeña y por lo tanto es un aislante térmico.

La conductividad térmica de cada gas, a una determinada presión, es distinta debido al tamaño de sus moléculas. Por otra parte, el vacío es un buen aislante térmico, por lo que, dos zonas separadas por un vacío necesitarán de un tiempo muy grande para alcanzar el equilibrio térmico.

Un problema existente en la actualidad, es cuantificar ese tiempo.

Capítulo II

Efectos del vacío en la transferencia de calor por convección

2.1 Vacío

La presión que ejerce un gas depende directamente del número de partículas que lo constituyen, el vacío absoluto se define como la presión de un espacio en donde no hay partículas, es decir, el vacío “absoluto” es una presión de cero pascales; sin embargo, las características físicas de los materiales impiden obtenerlo, ya que a bajas presiones, los sólidos tienden a evaporarse y por este motivo es imposible crear un contenedor en donde se pueda alcanzar una presión igual a cero.

Así que para hablar de vacío es conveniente referirlo a otra medida de presión, para tal fin, se define la presión atmosférica estándar como la presión ejercida por el aire de la atmósfera a una temperatura de 0°C y a nivel del mar; al valor de esta presión se le asigna el valor de 1 Atmósfera y su equivalencia en el Sistema Internacional (SI) de unidades es de 101 325 Pa.

Otras unidades congruentes a la atmósfera estándar son los milímetros de mercurio mmHg o Torr en honor al físico Torricelli

$$1 \text{ Atmósfera Estándar o } 1 \text{ Std} = 101\,325 \text{ Pa} = 760 \text{ mm de Hg} = 760 \text{ Torr} = 1013 \text{ mbar}$$

Cuando se mide la presión de la atmósfera en condiciones distintas a las mencionadas, simplemente se le llama presión atmosférica (P_{atm}).

La definición aceptada de vacío es una presión menor a la presión atmosférica.

2.2 Propiedades de los gases

2.2a Distribución de velocidades

La ecuación 1.14, relaciona la energía cinética media de una partícula con la temperatura, sin embargo, las moléculas que componen al gas tienen una velocidad distinta que se refleja en una distribución de velocidades que fue descrita por Maxwell y Boltzmann mediante la ecuación:

$$\frac{dn}{dv} = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2k_B T} \right) \quad (2.1)$$

donde se expresa el número de moléculas que tienen una velocidad entre v y $v+dv$, para una energía E definida.

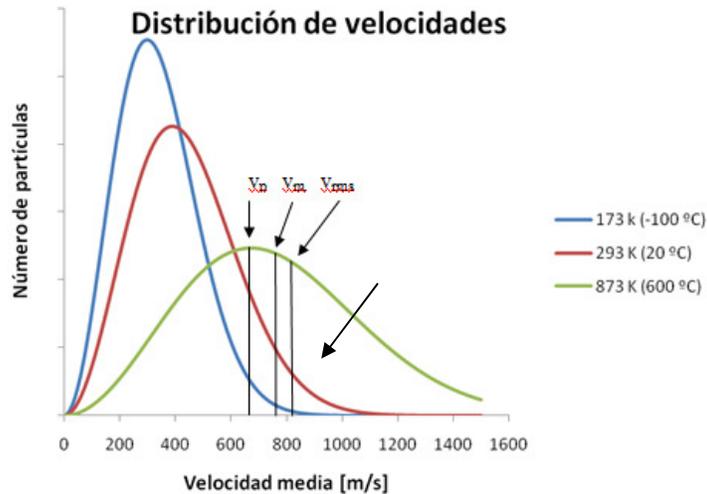


Figura 2.5
Gráfica de distribución de velocidades de Boltzmann

En la Figura 2.5, se muestran las curvas de distribución de velocidades para las temperaturas de 173 K, 293 K y 873 K para 10^6 moléculas de Oxígeno, notando que entre mayor sea la temperatura, el número de partículas con la misma velocidad disminuye, pero aumenta el intervalo de velocidad.

De la ecuación 1.14 se obtiene la velocidad cuadrática media v_{rms} en términos de la masa (m) de una molécula y de la temperatura,

$$v_{rms} = \left(\frac{3k_B T}{m} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

de la distribución de velocidades de Boltzmann se obtienen la velocidad media v_m ,

$$v_m = \left(\frac{8k_B T}{m\pi} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

a la velocidad en la que se tiene un máximo para la distribución de Boltzmann, se le da el nombre de velocidad más probable v_p ; aplicando cálculo diferencial para encontrar dicho máximo es posible encontrar la relación entre v_p , v_{rms} y v_m .

$$\begin{aligned} v_{rms} &= 1.225v_p \\ v_m &= 1.128v_p \end{aligned} \quad (2.4)$$

La distribución de velocidades influye en el número de moléculas ϕ que golpean a un elemento de superficie de forma perpendicular por unidad de tiempo, ya que es proporcional al número de moléculas y a la velocidad media

$$\phi = \frac{1}{4} n v_m = \left(\frac{2}{k_B m \pi T} \right)^{1/2} P \quad (2.5)$$

$\sim 12 \sim$

Entre mayor sea el número de moléculas que golpean la superficie, mayor será la transferencia de energía del gas hacia ésta.

2.2b Camino libre medio

A la distancia que recorre una molécula entre dos choques sucesivos, se le llama camino libre medio (λ), cuando la presión de un gas es alta, el número de partículas existentes en el volumen es muy grande; si se reduce la presión manteniendo el volumen constante, entonces disminuye la densidad y el número de partículas; por lo tanto, una molécula recorre una distancia mayor entre dos colisiones sucesivas. Las propiedades geométricas de las moléculas del gas también influyen en el camino libre medio, pues moléculas de mayor tamaño ocupan más espacio dejando una distancia menor entre ellas. A una presión constante y bajo la hipótesis de que las moléculas son esferas rígidas, al diámetro se le asigna la variable δ .

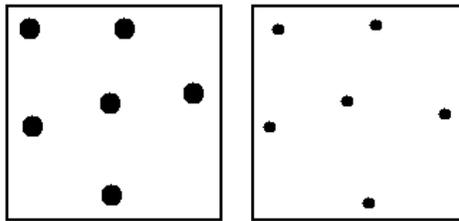


Figura 2.6
Camino libre medio

El camino libre medio se calcula a partir de la relación

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\pi n \delta^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{k_B T}{\pi p \delta^2} \quad (2.6)$$

donde se observa que se conserva una relación directamente proporcional con la temperatura e inversamente proporcional con la presión.

2.2c Conductividad térmica

Cuando un gas a temperatura T se encuentra entre dos regiones con temperatura T_1 y T_2 tales que $T_1 < T < T_2$, por la Ley Cero se sabe que el sistema debe de alcanzar el equilibrio térmico, pero a pesar de ello se desconoce el tiempo que tarda en alcanzarse, ya que depende de la presión a la que se encuentre el gas así como de la naturaleza del mismo. Suponiendo que se tiene un sistema de volumen constante, con la presión y temperatura constantes, el transporte de energía térmica a través de las colisiones entre las partículas del gas con ellas y con las paredes del contenedor depende de forma directa de la capacidad que tiene el gas para recibir calor de sus alrededores, es decir, es función de su capacidad calorífica c_v , por lo que el tiempo en alcanzar el equilibrio térmico depende del tipo de gas que se encuentre entre las regiones mencionadas.

La cantidad de calor transferida por el gas de una placa a otra por unidad de tiempo, depende del área de contacto del gas con las superficies a T_1 y T_2 y del gradiente de temperatura entre las superficies. Si se trabaja con un sistema de dos placas verticales cuya temperatura es uniforme a lo largo de la superficie y con un gas a una presión menor que la atmosférica, entonces las zonas aledañas a la placa de mayor temperatura tendrán la misma densidad por lo que no hay un efecto notable de una convección libre y la transferencia de calor se lleva a cabo por colisiones entre capas que tienen distinta temperatura así que se puede utilizar el modelo de conducción

$$\frac{Q}{dt} = A\kappa \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

A es el área de la placa a temperatura T_2 , y κ es la conductividad térmica del gas, con unidades de $W/K\cdot m$, el término Q/dt , tiene unidades de potencia y por lo tanto esta última ecuación describe la cantidad de calor que transfiere el gas, de la placa con temperatura T_2 a la placa con temperatura T_1 , en un tiempo dt .

2.3 Fenómenos de transporte

2.3a Difusión

La difusión es un fenómeno que se presenta cuando existen diferentes concentraciones de un gas en un espacio determinado, las moléculas que se encuentran en regiones de alta concentración se mueven de forma azarosa hasta llegar a zonas donde la concentración es menor, de tal forma que después de cierto tiempo la densidad del gas es la misma en todo el espacio.

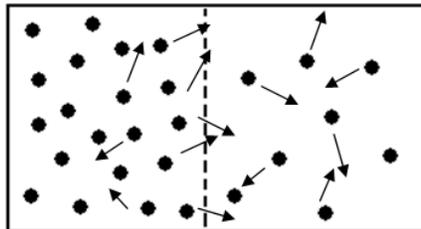


Figura 2.7
Difusión de un gas

En la Figura 2.7, se representa un contenedor en el cual se observa una región que tiene una alta concentración de cierto gas del lado izquierdo separada por una división imaginaria representada por la línea punteada, de una región de baja concentración al lado derecho; las moléculas en ambas regiones se mueven de forma azarosa, sin embargo las que se encuentran en la región de alta concentración tienden a homogeneizar la distribución de moléculas en el contenedor, así que la mayoría de las moléculas atraviesan la línea imaginaria de izquierda a derecha mientras que una cantidad mucho menor lo hace de forma contraria, por lo que siempre se presenta un desplazamiento neto del gas mientras las concentraciones sean distintas.

Se define la rapidez de difusión como la cantidad de masa que se desplace por

unidad de tiempo y la ecuación que caracteriza a éste fenómeno es la Ley de Fick

$$\frac{dm}{dt} = DA \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{L} \right) \quad (2.8)$$

D es una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de difusión medido en m²/s, A es el área trasversal por la que atraviesan las moléculas, L es la longitud del contenedor y ρ_2 y ρ_1 , son las concentraciones del gas medidas en unidades de densidad kg/m³, sin embargo es importante señalar que no corresponden exactamente al valor de la densidad pues el volumen ocupado puede deberse a una mezcla del gas con otro tipo de moléculas, así que la concentración es la cantidad de masa del gas entre en volumen de la mezcla.

La rapidez de concentración es proporcional al área de sección transversal y al gradiente de concentración $(\rho_2 - \rho_1)/L$

2.3b Viscosidad

Se habla de un gas en el régimen viscoso cuando se afecta el movimiento del gas debido a la interacción entre dos capas adyacentes que se mueven con distintas velocidades, esto genera una transferencia de cantidad de movimiento por colisiones. El coeficiente de viscosidad η se define como la fuerza tangencial que se ejerce por unidad de área al existir un gradiente de velocidad, su unidad en el SIU es el pascal-segundo (Pa·s) y su valor está dado por la expresión

$$\eta = 0.5 \lambda n m v_m = \left(\frac{2mk_B T}{\pi} \right)^{1/2} \lambda n \quad (2.9)$$

la viscosidad depende proporcionalmente de $T^{1/2}$ y por lo tanto es proporcional a la velocidad de las moléculas del fluido.

2.3c Flujo viscoso y flujo molecular

Las ecuaciones 2.6 y 2.9 muestran que a una temperatura constante, el camino libre medio es inversamente proporcional a la presión y directamente proporcional a la viscosidad. Considerando el sistema de las dos placas separadas por una distancia L a distinta temperatura, en el que se encuentra un gas contenido entre ellas, se distinguen dos tipos de flujo: el flujo en régimen viscoso y el flujo molecular, la diferencia entre dichos flujos se puede cuantificar por medio de una cantidad llamada número de Knudsen el cual se expresa como

$$K_n = \frac{\lambda}{L} \quad (2.10)$$

En la figura 2.3 se muestran dos placas separadas por L_1 y L_2 respectivamente y ambas placas se encuentran en un sistema con las mismas condiciones de presión y temperatura, en el primer caso el camino libre medio es menor que la separación de las placas, por lo que la transferencia de calor se da por colisiones entre las moléculas del

gas, se tiene por lo tanto un fluido viscoso; en el segundo caso el valor del camino libre medio es el mismo pero la separación de las placas es menor, por lo tanto la transferencia de calor se realiza prácticamente por colisiones de las moléculas del gas con las placas ya que la probabilidad de choque entre moléculas es menor que la probabilidad de choque de las moléculas con las placas y se trata ahora de un régimen molecular.

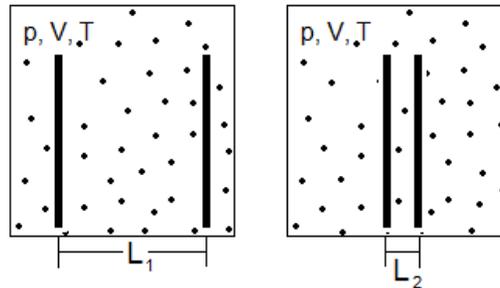


Figura 2.8

Régimen viscoso y molecular, con misma distribución molecular

El número de Knudsen establece el tipo de flujo existente en un contenedor con determinadas condiciones de presión y temperatura de tal forma que si $K_n > 1$ el flujo se conoce como flujo molecular y no presenta viscosidad. Al tratarse de un flujo en el que se transfiere energía por choques entre las moléculas del gas y las placas, el tiempo en alcanzarse en equilibrio térmico debe de aumentar de forma considerable.

2.4 Conductividad térmica en régimen molecular

Cuando la presión del gas es tan baja que la separación entre moléculas excede las dimensiones del contenedor, la transferencia de energía no se realiza por choques entre moléculas y el flujo de gas se deja de considerar viscoso. El proceso de transferencia de calor bajo estas condiciones es llamado conducción molecular libre. Con el fin de poder expresar la conductividad térmica a bajas presiones, Knudsen introdujo el concepto de coeficiente de acomodación, el cual se define como el cociente entre la energía neta transferida entre las moléculas de gas que inciden sobre la superficie y la energía teóricamente transferida cuando las moléculas alcanzan el equilibrio térmico con la superficie.

Las moléculas del gas tienen una temperatura inicial T_i y al chocar con la superficie caliente, la cual tiene una temperatura $T_s > T_i$, son reemitidas con una energía correspondiente a una temperatura $T_r < T_s$ y se requieren de muchas colisiones para que se alcance el equilibrio térmico. El coeficiente de acomodo es definido como

$$\alpha = \frac{(T_r - T_i)}{(T_s - T_i)} \quad (2.11)$$

los casos extremos se dan cuando las moléculas alcanzan el equilibrio con la superficie antes de escapar de ella, en este caso $T_r = T_s$, por lo que $\alpha = 1$; por otra parte, cuando las moléculas de gas se reflejan elásticamente sin intercambiar energía con la pared $T_r = T_i$ y $\alpha = 0$, entonces el coeficiente de acomodación es un valor entre 0 y 1 que establece la cantidad de energía transferida de la superficie caliente a las moléculas del gas.

Con ayuda de la ecuación 2.5 se puede establecer la energía total transferida por la pared a las moléculas del gas como

$$E = E_m \phi \quad (2.12)$$

en donde E_m es la energía por molécula, así que la transferencia de energía se puede expresar como

$$dE = \frac{1}{8} m v^3 dn \quad (2.13)$$

utilizando la distribución de velocidades de Boltzmann, para la componente perpendicular a la superficie y realizando una integración sobre la energía se obtiene que la energía transferida por molécula es

$$E_m = 2k_B T \quad (2.14)$$

Para gases monoatómicos, la cantidad de energía transferida de la superficie caliente a la fría es

$$E_0 = \phi E_m = \frac{1}{4} n v_i (T_r - T_i) \quad (2.15)$$

en términos del coeficiente de acomodo, la presión y diferencia de temperaturas resulta

$$E_0 = \frac{\alpha}{2} \frac{P v_i}{T_i} (T_s - T_i) \quad (2.16)$$

con v_i la velocidad media a una temperatura T_i y la energía transferida a bajas presiones es directamente proporcional a la presión y a la diferencia de temperatura entre el gas y la superficie caliente.

2.5 Presión de una mezcla de gases

Cuando una mezcla de j gases se encuentra en un contenedor con volumen V a una presión p , la presión parcial de cada gas es definida como la presión que ejercería cada uno de ellos si se encontrara solo en el recipiente a la misma temperatura. El número de partículas contenidas es

$$N = \sum_{i=1}^j N_i \quad (2.11)$$

donde N_i es el número de partículas del i -ésimo gas contenido en la mezcla y cuya presión parcial está determinada por la ecuación 1.9

$$p_i = \frac{N_i k_B T}{V} \quad (2.12)$$

Y mediante sustituciones es posible demostrar que la presión total es igual a la suma de las presiones parciales de la mezcla de gases siempre y cuando no interactúen químicamente (Ley de Dalton de las presiones parciales) y se mantenga la temperatura

constante (Ley de Boyle).

$$p = \sum_{i=1}^j p_i \quad (2.13)$$

La combinación de gases del aire se muestra en la Tabla 2.1 junto con el porcentaje de presión que aportan a la atmósfera a nivel del mar y temperatura de 0 K.

Gas	Volumen (%)	Presión parcial [Pa]
Nitrógeno	78.08	79114.56
Oxígeno	20.95	21227.58
Argón	0.93	942.32
Dióxido de Carbono	0.03	30.40

Tabla 2.2
Composición del aire de la atmósfera

El nitrógeno es el más abundante en la atmósfera, sin embargo, al trabajar con sistemas de vacío, la humedad del ambiente debe considerarse ya que es el tercer componente más abundante del aire atmosférico.

2.6 Efectos del vacío en las propiedades de un sistema

Para analizar los efectos del vacío en un sistema, se puede considerar un recipiente con capacidad de un litro $V=1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, que contiene un gas en su interior a presión atmosférica $p=101\,325 \text{ Pa}$ y a una temperatura de 273 K , bajo estas condiciones la ley del gas ideal, ecuación 1.9, establece que en el recipiente hay 2.69×10^{22} partículas; este número de partículas, para una temperatura fija, depende directamente de la presión en el recipiente. A continuación se muestra la relación entre el número de partículas y la presión para una temperatura constante para este sistema.

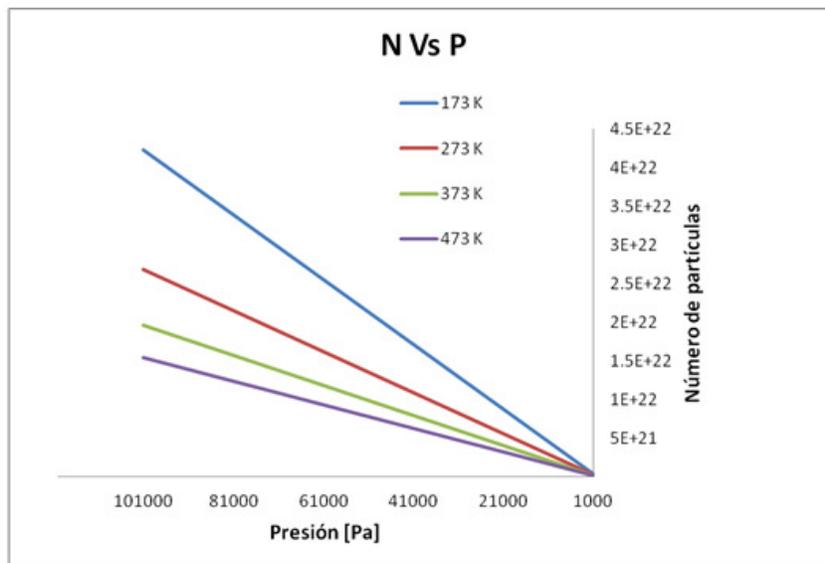


Figura 2.9
Gráfica del número de partículas como función de la presión a temperatura constante, $V=1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

En la Figura 2.9 se muestra la disminución del número de partículas cuando disminuye la presión, el intervalo abarca desde la presión atmosférica hasta los 1000 Pa, el número de partículas disminuye de forma lineal. La recta con menor pendiente corresponde a una temperatura de 473 K mientras que la recta con mayor pendiente corresponde a una temperatura de 173 K, esto es porque a una temperatura menor, la energía cinética de las moléculas del gas se reduce, chocando contra las paredes con una fuerza menor, así que para que la presión se mantenga constante el número de partículas que choquen contra las paredes debe de aumentar para que el efecto global sea una presión constante debida a moléculas con menor energía.

El camino libre medio es un parámetro importante en los sistemas de vacío, ya que el tipo de flujo depende de su magnitud; la relación entre el camino libre medio es inversamente proporcional a la presión, así que a presiones muy bajas, se pueden alcanzar valores macroscópicos para el camino libre medio dependiendo de la naturaleza del gas. Se ha graficado el camino libre medio como función de la presión a volumen constante y a una temperatura de 273 K para cinco de los gases nobles, conociendo el diámetro molecular de cada uno de ellos.

Gas	Diámetro molecular [nm]
Helio	21.8
Neón	25.9
Argón	36.4
Kriptón	41.6
Xenón	48.5

Tabla 2.3 Diámetro molecular de los gases nobles

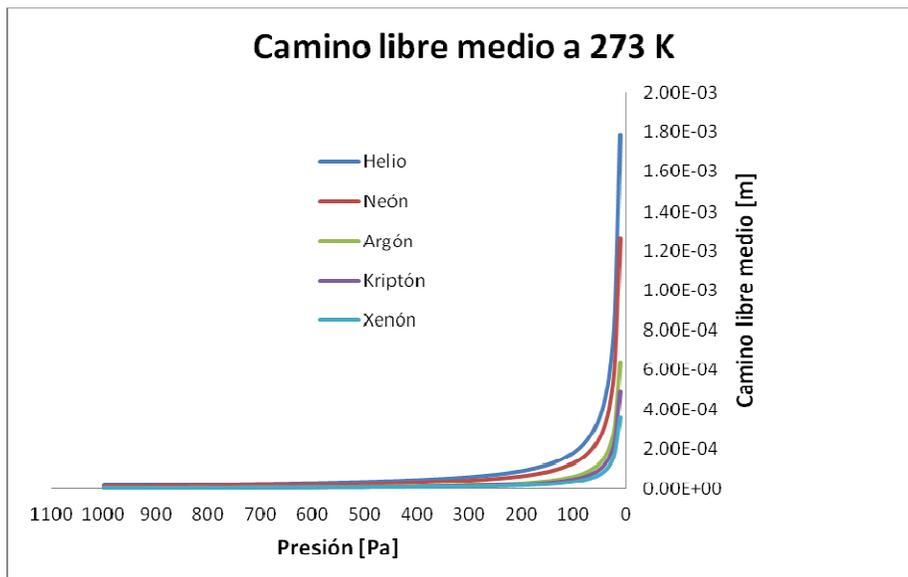


Figura 2.10
Gráfica del camino libre medio como función de la presión, a temperatura constante para los gases nobles.

En este caso, al hacer variar la presión desde los 1000 Pa hasta los 10 Pa se visualiza que el camino libre medio alcanza el orden de los milímetros, en la realidad una bomba mecánica alcanza un vacío de hasta 10^{-1} Pa, por lo que el camino libre medio puede alcanzar el orden de cm. En la Tabla 2.2 se aprecia que el diámetro molecular aumenta de tal forma que el Helio es el átomo de menor diámetro y el Xenón tiene el mayor de los diámetros de los gases nobles mostrados y en la gráfica 2.3 se observa que el camino libre medio aumenta cuando el diámetro molecular disminuye, pues así lo establece la ecuación 2.6.

Capítulo III

Diseño y operación del dispositivo experimental

3.1 Aplicaciones del vacío en la industria

La criogenia es la ciencia que estudia los procesos que ocurren a temperaturas inferiores a los -100°C , entre los gases criogénicos obtenidos en la industria se encuentran el oxígeno, cuyo punto de ebullición es de -183°C , el nitrógeno con -196°C , el argón con -186°C , el hidrógeno con -253°C y el helio con -273°C . El bajo punto de ebullición de cada uno de estos elementos representa un problema para su almacenamiento y transporte, ya que el diseño de contenedores que permitan su distribución o conservación requiere de un amplio conocimiento sobre la transferencia de calor, así como de las propiedades del producto almacenado.

Uno de los riesgos que implica el almacenamiento de los gases criogénicos es el calentamiento debido a la transferencia de calor del ambiente con el gas, ya que en el interior del contenedor, el producto se encuentra de forma líquida y a baja temperatura, si la temperatura aumenta hasta alcanzar el punto de ebullición, el líquido se transforma en gas aumentando la presión dentro del recipiente, propiciando una posible explosión y por lo tanto un riesgo para el personal de la industria.

Para evitar que el líquido alcance su punto de ebullición se han diseñado contenedores que aíslan térmicamente un contenedor interno del medio ambiente mediante un contenedor externo permitiendo almacenar el producto por periodos largos así como su transporte. Entre los sistemas de aislamiento se encuentran:

- Vacío con escudo de nitrógeno líquido
- Vacío con espumas
- Vacío con perlita
- Vacío mas multicapas
- Súper aislamiento

Los tipos de contenedores diseñados y construidos en la actualidad son:

a) De pared simple, en donde se encuentran

- Aislados externamente
- Aislados internamente

b) Doble pared (ambas rígidas)

- Aislamiento de perlita
- Aislamiento de perlita con vacío en el espacio intermedio
- Aislamiento de capas múltiples con vacío en los espacios intermedios

c) Doble pared (una pared flexible)

- Aislamiento mediante esferas de vidrio hueco con vacío en los espacios intermedios

Para analizar el aislamiento térmico del vacío se diseñó y construyó un dispositivo de doble capa con vacío intermedio que sirve para analizar también el aislamiento de capas múltiples con vacío intermedio.

3.2 Propuestas de diseño para un modelo

Para estudiar la transferencia de calor en el vacío, se diseñó una cámara en donde se pueden colocar dos placas paralelas con una diferencia de temperatura de al menos 200 °C, este primer modelo sirvió para buscar los métodos para calentar y mantener las placas con esa diferencia de temperatura, de tal forma que únicamente se presentara la transferencia de calor por convección; además de dar una idea general de los componentes del sistema, como los instrumentos de medición, el sistema de vacío, las fuentes para calentar una de las placas; en la propuesta inicial se contemplaba enfriar alguna de ellas.

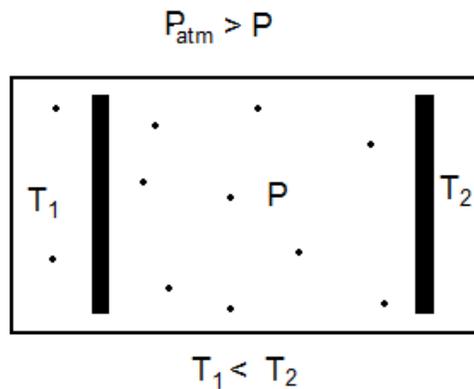


Figura 3.11
Primer diseño del dispositivo

Un diagrama del dispositivo inicial se muestra en la Figura 3.11, las barras representan las placas paralelas que se mantienen a distinta temperatura, y están colocadas dentro de una cámara de vacío. En este sistema también se propuso modificar la distancia que separa las placas, ya que es un parámetro a considerar al realizar las mediciones; sin embargo, el hecho de calentar alguna de las placas y enfriar la otra, requería de diseñar un sistema de calefacción y uno de refrigeración por lo que se buscó una geometría distinta que conservara las mismas características.

3.3 Dispositivo seleccionado

Para tener una simetría en cualquier dirección y evitar diferencias en las mediciones debidas a corrientes convectivas no deseadas, se diseñó un sistema con geometría cilíndrica, que se coloca de forma vertical ya que es la dirección en la cual actúa la gravedad sobre las moléculas de gas afectando a todas por igual.

El dispositivo experimental consta de una cámara de vacío en la cual se colocan dos cilindros concéntricos, el cilindro interno se encuentra a una temperatura mayor que el externo y el sistema cuenta además con una válvula por la que se puede inyectar un gas

para evaluar el tiempo en el que se da la transferencia de calor.

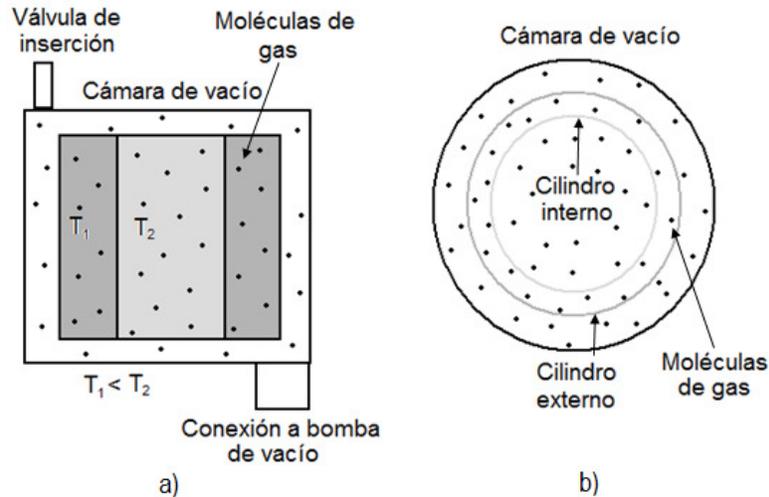


Figura 3.12
 a) Vista corte lateral
 b) Vista aérea

3.4 Diseño del dispositivo experimental

3.4a Sistema de calefacción del tubo interno

Como fuente de alta temperatura se utilizó un foco dicróico de reflector, con una potencia de 150W el cual se alimenta con 127 V, este foco se colocó de manera concéntrica dentro de un tubo de cobre de 1.9 cm de diámetro cuya longitud se determinó a partir de las dimensiones del bulbo, resultando de 8.6 cm de largo y con una masa de 38.1g. Los contactos para el bulbo se fabricaron con cerámica ya que este material resiste altas temperaturas.

Dado que los 127 V de alimentación del bulbo calentaban el tubo de cobre más de lo necesario, se tuvo que utilizar un variac para mantener la temperatura a 220 °C. Se eligió calentar hasta este punto ya que se requiere de una diferencia de temperatura entre los tubos de 200 °C que es la diferencia que hay entre los gases contenidos en los tanques criogénicos y la temperatura ambiente, por ejemplo, el nitrógeno líquido tiene una temperatura inferior a los -195.5 °C.

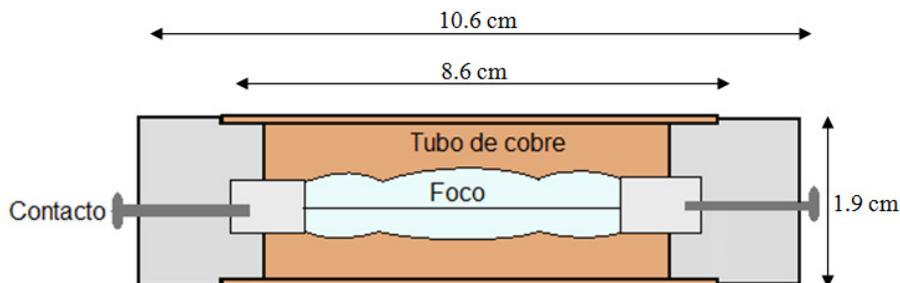


Figura 3.13
 Corte longitudinal del sistema de calefacción

3.4b La cámara de vacío

La cámara de vacío se construyó con un tubo de lucita transparente de 8.83 cm de diámetro interno, 10.57 cm de diámetro externo y 12.86 cm de largo, con el fin de observar el interior de la cámara; a los extremos se le colocaron dos tapas de acero inoxidable cuyo diámetro es de 12.7 cm y grosor de 0.64 cm, ya que este material es un buen aislante térmico y permite disminuir la transferencia de calor por conducción entre los cilindros concéntricos; sobre cada una de las tapas se diseñó una caja para introducir los O'rings que sirven como sellos entre la lucita y las tapas evitando fugas; el cilindro interno es un tubo de cobre de 1.9 cm de diámetro mientras que, para el cilindro externo, se utilizaron varios tubos de cobre que se colocaron de forma concéntrica, uno a la vez; todos ellos de dimensiones mucho menores a las del tubo de lucita para reducir la transferencia de calor entre el tubo externo y la cámara de vacío. Para realizar las mediciones de temperatura se colocaron atravesadores en las tapas, aquí se conectaron termopares para registrar las temperaturas de los tubos de cobre, así como para alimentar el foco que calienta al tubo interno. Se añadió además una válvula para admitir gases y una más para realizar la conexión a la bomba de vacío.

La lucita es un polímero o resina sintética que tiene el aspecto de vidrio, también es llamada vidrio orgánico, es transparente, ligero, resistente a los impactos, buen aislante térmico y no se daña fácilmente con la intemperie. Se obtiene a través de la polimerización del metacrilato de metilo cuya fórmula es $[CH_2-C(COOCH_3)(CH_3)CH_2]_n-$

La cámara de vacío se coloca de forma vertical, ya que de esta manera se logra una simetría radial que facilita el análisis de la transferencia de calor entre las superficies de los tubos de cobre, debido a que la dirección en la que actúa la fuerza de gravedad sobre las moléculas de gas es siempre hacia abajo. El análisis se presentó detalladamente en el capítulo II.

Las dimensiones del dispositivo construido se muestran en la siguiente figura.

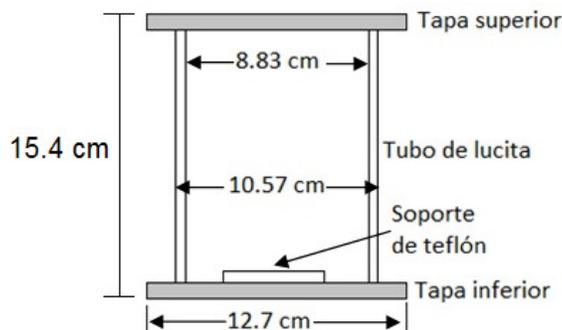


Figura 3.14
Dimensiones del sistema

Para mantener los tubos concéntricos con el sistema de calefacción, se construyó una base circular de teflón con canales para montar los tubos de cobre y con un orificio central por donde se atraviesa el sistema de calefacción, se seleccionó este material ya que es un buen aislante térmico y esto permite que los tubos colocados sobre la base no se enfríen al recibir el calor del tubo central, a continuación se muestran las dimensiones de los tubos utilizados así como de la base de teflón.

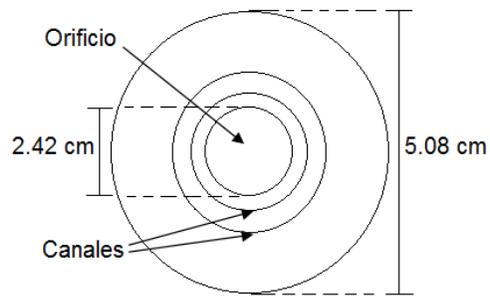


Figura 3.15
Base de teflón

La base de teflón ayudó a su vez a mantener los tubos de forma vertical para que se mantuvieran concéntricos y así evitar un rozamiento entre ellos que permitiera una transferencia de calor por contacto, además de conservar la simetría del sistema

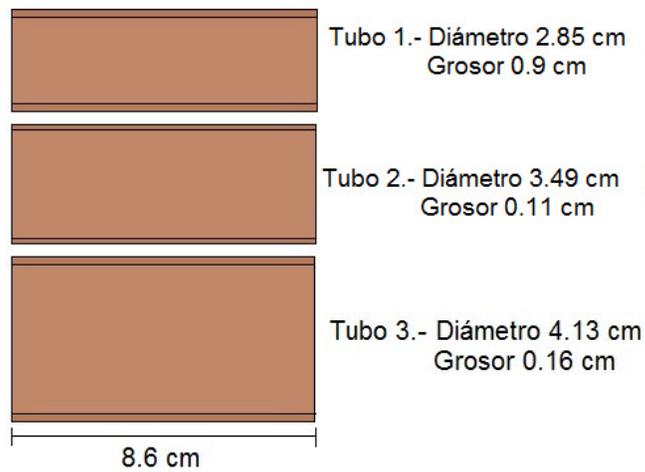


Figura 3.16
Dimensiones de los tubos de cobre

Los diámetros de los tubos mostrados en la figura 3.16 hacen referencia al diámetro externo y tienen una masa de $m_1= 41.6g$, $m_2= 84.2g$ y $m_3= 105.9g$ respectivamente.

3.5 Construcción del dispositivo

Las partes que conforman el dispositivo se muestran por separado en cada una de las siguientes figuras.



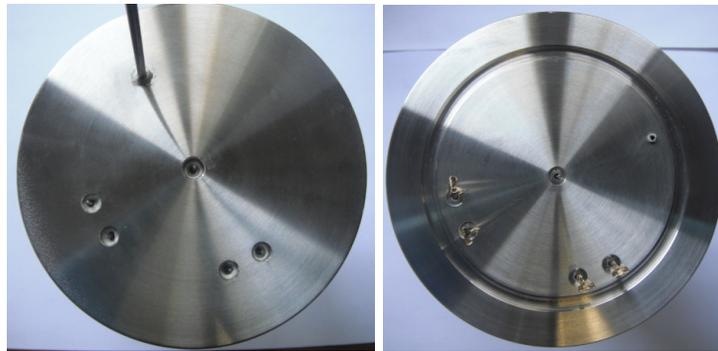
a)

b)

Figura 3.17

Tubo de lucita. a) Vista lateral b) Vista superior

El tubo de lucita se debe de limpiar previamente a cada experimento ya que expuesto a la intemperie y el contacto con las manos lo contaminan de grasa y humedad que retrasan el proceso de vacío; para realizar una limpieza adecuada del tubo se utiliza únicamente agua y jabón puesto que el alcohol isopropílico o acetona tienden a desgastar el material propiciando que se estalle al momento de bajar la presión.



a)

b)

Figura 3.18

Tapa superior

a) Vista superior b) Vista inferior

La tapa superior se construyó con acero inoxidable y se le colocaron 4 atravesadores con pegamento para vacío, para realizar las conexiones de dos termopares que registrarán la temperatura del tubo calefactor y uno más en el centro para realizar la conexión eléctrica con el sistema calefactor. Se construyó de este material ya que es un buen aislante térmico, además se le colocó una entrada para poder insertar un gas y así poder analizar la conductividad térmica del mismo. Es necesario realizar una limpieza adecuada de la parte inferior de la tapa ya que estará expuesta al vacío y se requiere que no contenga contaminantes que impidan obtener la presión necesaria para las

mediciones, para ello se utiliza alcohol isopropílico ya que remueve cualquier tipo de grasa que pudiera contener.



a) Vista inferior b) Vista superior
Figura 3.19
Tapa inferior
a) Vista inferior b) Vista superior

Al igual que la tapa superior, la tapa inferior se construyó con acero inoxidable, a cada una de las tapas se les diseñó una caja para colocar los o’rings que sirven de sello entre las tapas y el tubo de lucita. A esta tapa se le colocaron seis atravesadores para conectar tres termopares que a su vez son colocados en diferentes partes del tubo externo para mostrar la simetría del sistema, así mismo se colocó un atravesador en la parte central para el contacto eléctrico con el sistema de calefacción. En esta tapa se colocó una brida para realizar la conexión a la bomba mecánica encargada de hacer un vacío de 1×10^{-3} Torr.



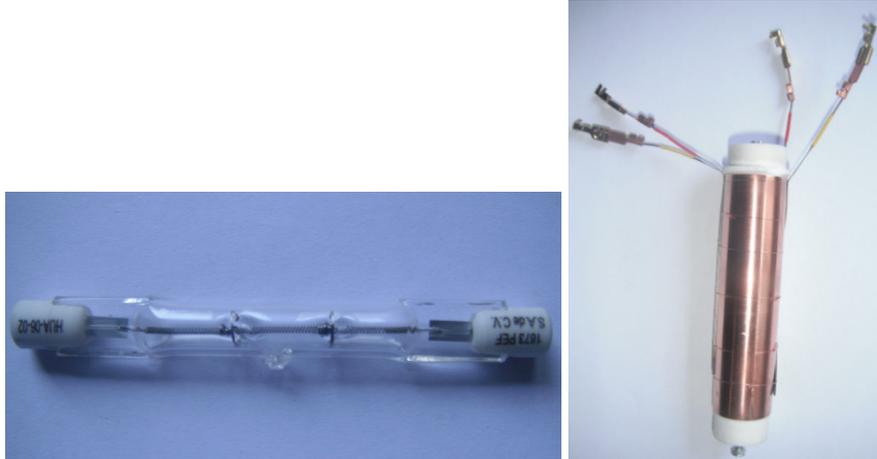
Figura 3.20
Oring’s

Las dimensiones de los o’rings mostrados en la figura 3.20 son las siguientes:

Diámetro interno (ϕ_{int}) = 9.2 cm
Diámetro externo (ϕ_{ext}) = 9.87 cm
Grosor (W) = 0.335 cm

La función de los o’rings es fundamental al hacer vacío ya que son quienes impiden que el sistema tenga fugas de mayor tamaño, por ello se les debe de dar una buena limpieza con alcohol isopropílico y verificar que no tengan partículas diminutas pegadas o

incrustadas, ya que de ser así no se alcanzará el vacío necesario.



a)
 b)
 Figura 3.21
 Sistema de calefacción
 a) Foco dicróico
 b) Sistema de calefacción ensamblado

El sistema de calefacción muestra varios componentes, en la figura 3.21b se observa que el tubo de cobre tiene en sus extremos contactos de cerámica para mantener el bulbo de la figura 3.21a de forma concéntrica, además de facilitar la conexión eléctrica con las tapas del sistema. Para colocar los termopares se realizaron dos cortes sobre el tubo y se añadieron cinturones de cobre calibre 28 ya que es delgado y mantiene en contacto al termopar con el tubo sin afectar las mediciones de la temperatura. La corriente máxima suministrada por el variac que alimenta el bulbo es de 1A y el voltaje máximo es de 127V, sin embargo la diferencia de temperatura necesaria para los experimentos solamente requiere de una corriente máxima de 0.5 A.



Figura 3.22
 Base de teflón

Para facilitar que los tubos de prueba quedaran de forma concéntrica con el tubo calefactor se diseñó una base de teflón con canales para colocar los tubos, en el centro se le hizo un orificio por donde atraviesa el sistema de calefacción existiendo una

separación de la base con el contacto de cerámica del tubo calefactor de 0.26 cm, a pesar de ser una separación pequeña no afecta las mediciones ya que el teflón es mejor aislante térmico que el cobre y por lo tanto la transferencia de calor se da primero al cobre y después al teflón.



Figura 3.23
Tubos de cobre

Los tubos externos se seleccionaron del mismo material del tubo calefactor para disminuir las variables presentes en el planteamiento del problema. Los tubos se lijaron y limpiaron con alcohol isopropílico antes de realizar las mediciones para quitar los contaminantes y el óxido que se forma sobre su superficie cuando se encuentran expuestos a la intemperie. Se realizaron cortes sobre cada uno de los tubos para poder fijar los termopares a su superficie.

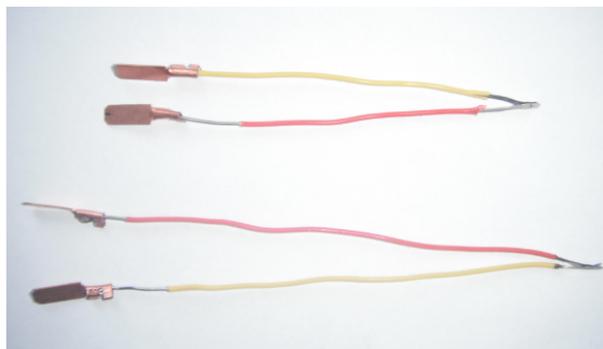


Figura 3.24
Termopares tipo K

Los termopares utilizados para medir la temperatura del tubo calefactor y de los tubos externos son del tipo K, el color del aislante indica la polaridad del termopar, siendo el color amarillo el positivo y el rojo el negativo, en los extremos de cada uno de los termopares utilizados se colocaron zapatas que facilitan las conexiones a los atravesadores. Para evitar que los termopares del sistema de calefacción tuvieran contacto con el menor de los tubos externos se utilizó una aplanadora, dejando los termopares con un grosor de 0.03 cm, que es menor que la separación entre los dos tubos. Una vez aplanados los termopares se utilizó una punteadora para soldarlos y se verificó que el cambio de la geometría de los termopares no afectara las mediciones de la

temperatura, encontrando que el voltaje generado en los termopares por una fuente térmica no depende de la geometría de los termopares.



Figura 3.25
Cámara de vacío y componentes

Una vez limpios cada uno de los componentes del sistema se ensamblaron realizando los contactos eléctricos descritos y verificando la verticalidad del sistema que a su vez permite que se tenga la simetría indicada por la figura 3.12b. Ya ensamblado el sistema se conectó a la bomba de vacío y se esperó a que las impurezas cuya presión de vapor son mayores a 1×10^{-3} Torr se evaporaran y así se limpiara el sistema de forma interna.

Para realizar las mediciones de presión se utilizó un Multi Gauge, con un rango de 1.00×10^{-3} a 7.60×10^2 Torr estas presiones corresponden a un vacío medio y a la presión atmosférica respectivamente.



Figura 3.26
a) Medidor a presión

La temperatura se determinó a partir del voltaje generado por los termopares, medido con un multímetro con una sensibilidad de $0.1 + 0.05$ mV, esto limita a medir temperaturas con una diferencia promedio de 3°C .

3.6 Radiación del sistema de calefacción

El sistema de calefacción proporcionó una temperatura promedio de 220°C, la radiación emitida obedece a la ecuación

$$I_R = I_e \left(\frac{r_e}{r_R} \right)^2 \quad (3.1)$$

donde I_e es la intensidad de radiación de la fuente de radio r_e , I_R es la intensidad recibida por un objeto situado a una distancia r_R de la fuente, utilizando la Ley de Stefan Boltzmann, se puede calcular la radiación a 220°C = 493K

$$I_e = \left(5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \right) (493)^4 = 2838.10 \frac{W}{m^2} \quad (3.2)$$

El diámetro del tubo calefactor es de 0.019 m por lo que I_R está dada por

$$I_R = \left(2838.10 \frac{W}{m^2} \right) \left(\frac{0.009}{r_R} \right)^2$$

a continuación se tabula la intensidad de la radiación recibida por los tres tubos externos.

Tubo	Radio [m]	Intensidad recibida I_R [W/m ²]
1	0.014	1261.38
2	0.017	841.17
3	0.020	600.67

Tabla 3.4 Intensidad de radiación

Se puede apreciar que la intensidad de la radiación recibida disminuye con el cuadrado de la distancia a la que se encuentra la superficie que recibe la radiación, por lo que entre más lejos esté menor será la radiación recibida.

En el siguiente Capítulo se muestran los resultados que se obtuvieron de un total de 18 experimentos, los valores encontrados seleccionados se muestran en el Apéndice A de este trabajo.

Capítulo IV

Resultados y conclusiones

4.1 Metodología de las mediciones

Una vez que se conectaron los termopares a cada uno de los tubos correspondientes se procedió a cerrar el sistema para hacerle vacío con la bomba mecánica, primero se conectó por medio día con el objetivo de limpiarla, ya que las sustancias cuya presión de vapor es mayor a 1.00×10^{-3} Torr se evaporan aumentando la presión nuevamente. Cuando la presión mínima se mantuvo constante se desconectó la bomba para que la cámara tuviera nuevamente la presión atmosférica. Posteriormente se conectó la bomba de vacío para bajar la presión de nuevo hasta el vacío alcanzado con anterioridad, este proceso tuvo una duración de 10 minutos, la siguiente gráfica muestra la curva de bombeo del sistema.

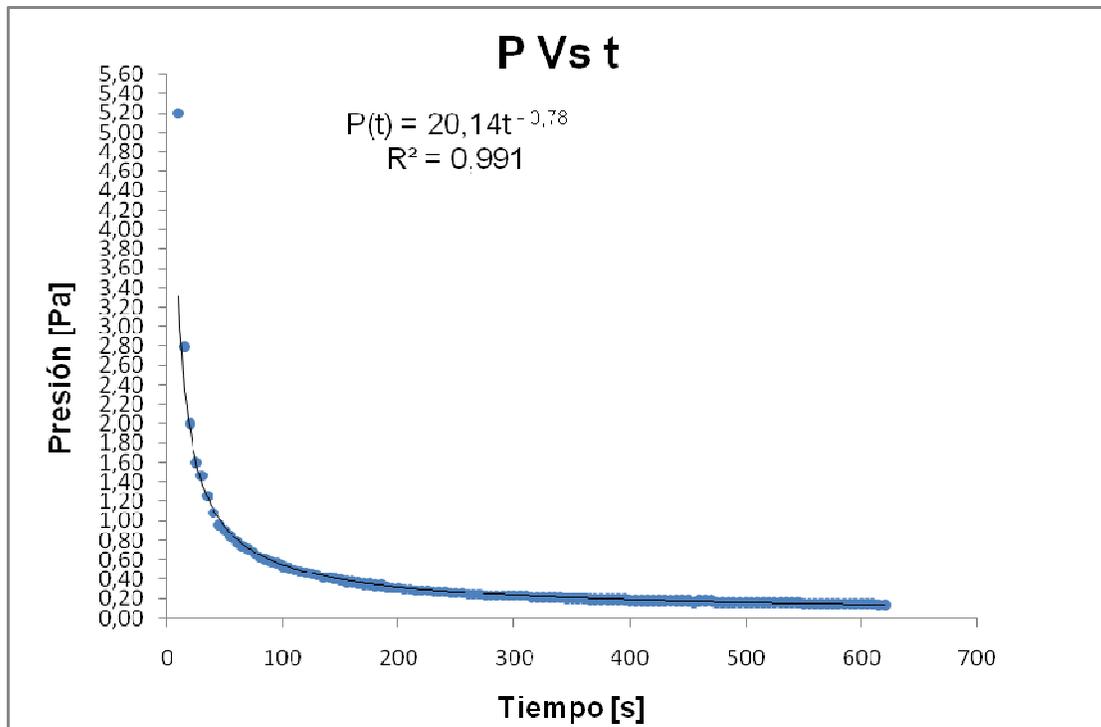


Figura 4.27
Curva de bombeo

La curva de ajuste es una función exponencial negativa con un factor de correlación de 0,99, esta curva indica una caída de la presión de forma abrupta dentro de los primeros segundos y que conforme aumenta el tiempo, la extracción de partículas de la cámara se dificulta hasta llegar a un valor de presión constante que resulta ser de 1.00×10^{-3} Torr. Cabe señalar que cuando se apagaba la bomba y se dejaba conectada a

la cámara de vacío, la presión se incrementaba, esto fue un indicador de que el sistema tenía fugas, y para evitar que la presión cambiara se realizaron las mediciones con la bomba encendida.

Después de la obtención de la curva de la Figura 4.27, se procedió a realizar las pruebas de la transferencia de calor con el sistema de calefacción y los tubos externos, el primer tubo empleado fue el de menor diámetro (Tubo 1) y su colocación requirió de una buena alineación del sistema, ya que la verticalidad del mismo facilitaba la conexión del sistema calefactor manteniendo a su vez concéntricos los tubos interno y externo para evitar contacto entre ellos. Para lograr esto, se utilizó la base de teflón con los canales mostrados en la figura 3.22, ésta a su vez se ajustó a la tapa inferior con una cinta adhesiva cuya presión de vapor es menor a la alcanzada por la bomba.

Para cada una de las pruebas siguientes se aseguró de tener la presión mínima alcanzada por la bomba de vacío para comenzar a calentar el tubo interno con ayuda del variac. La corriente inicial suministrada al sistema de calefacción fue de 0.5A para todos los casos, y una vez que se alcanzaban los 220°C se redujo a 0.34A. Se realizaron tres pruebas al vacío para realizar una estadística y una a presión atmosférica para comparar la transferencia de calor con y sin vacío.

Los instrumentos utilizados para la toma de medidas fueron:

Presión: Multi Gauge con resolución de 1×10^{-5} Torr

Voltaje: Tres multímetros digitales con resolución de 1×10^{-4} V, dos de ellos monitoreaban la temperatura interna y el otro se utilizó para la temperatura del tubo externo.

Corriente: Multímetro digital con resolución de 0.01 A

4.2 Resultados

En la primera prueba aplicada al tubo 1 se estimó el valor necesario para calentar el tubo interno a 220°C, observando que con 0.50A el tubo se calentaba en un tiempo promedio de 25 minutos, se observó que al irse calentando el tubo, la presión dentro de la cámara aumentaba hasta 10^{-2} Torr, esto debido a que con el aumento de la temperatura algunas sustancias residuales son evaporadas de la superficie del cobre, como lo son el agua y alcohol isopropílico o incluso grasa. A altas temperaturas se apreció una variación entre los voltajes medidos en los termopares, dichas diferencias se deben a factores como la posición del tubo en la que fueron colocados así como el área de contacto y la longitud del termopar, se promediaron los valores para tener un solo valor representativo, el fabricante garantiza un error de 2.2°C, sin embargo las diferencias entre termopares conectados al mismo tubo mostraron diferencias mayores, para acotar el error se tomaron como referencia los valores de los termopares que coincidían, después se calculó el error relativo del tercer termopar siendo en el mayor de los casos del 0.99% que es poco mayor a los 0.75% proporcionado por el fabricante.

Para la segunda prueba, se calentó el tubo interno hasta que los termopares correspondientes indicaran un voltaje promedio de 8.1 V, que corresponde a una temperatura promedio de 220°C y se registraron los voltajes de los termopares conectados al tubo externo con una diferencia de 5 minutos, tomando como punto de referencia el momento en el que el tubo interno alcanzó los 220°C. Se realizó al final una

prueba a presión atmosférica para comparar la transferencia de calor con y sin vacío.

Para la realización de la gráfica se convirtieron los valores de voltaje a temperatura con ayuda de las tablas de los termopares, mostradas en el Apéndice B, se promediaron los valores obtenidos por los dos termopares del tubo interno y de los tres termopares del tubo externo, se grafican tres curvas correspondientes a la temperatura del tubo caliente, la temperatura del tubo frío y la temperatura del tubo frío a presión atmosférica.

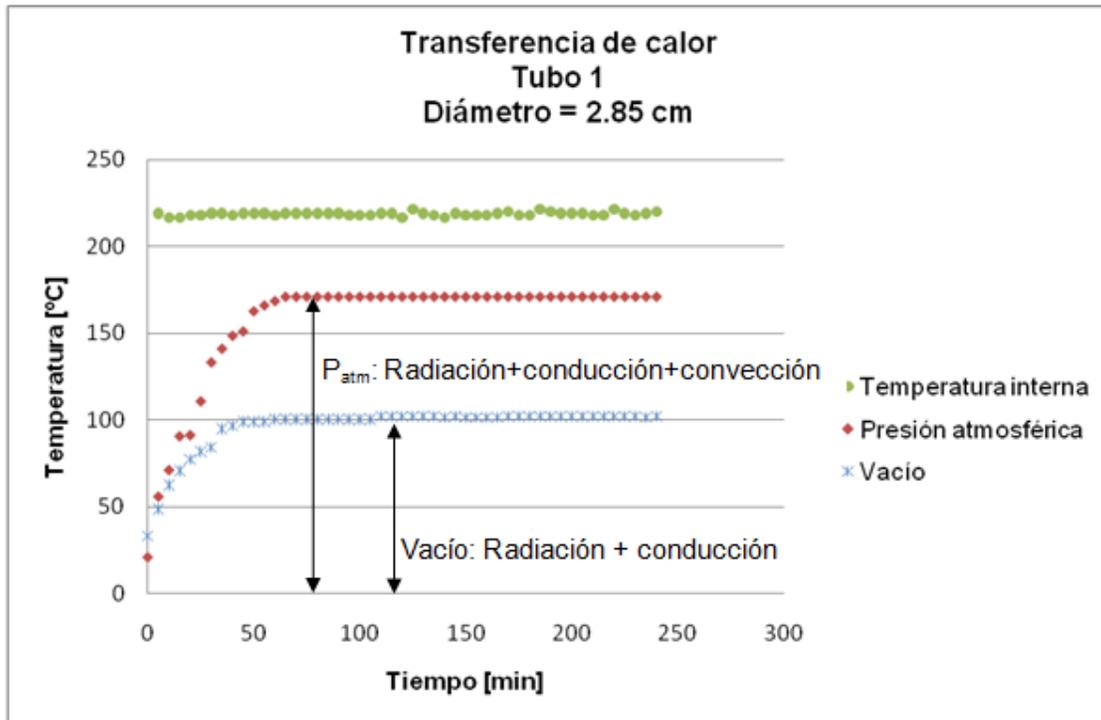


Figura 4.28
Transferencia de calor en el tubo 1
Prueba 1

En la Figura 4.28 se aprecian tres curvas de temperatura contra tiempo, la curva más alta corresponde a la temperatura del tubo interno el cual se calienta por el foco dicroico, muestra una tendencia lineal las mediciones iniciaron en el momento en que se alcanzaron los 218°C y a partir de ese momento se controló la corriente proporcionada por el variac, los valores no se mantuvieron del todo constantes ya que había fugas en la cámara de vacío provocando que partículas externas entraran y enfriaran el sistema, además se tuvo una exposición constante a la radiación del foco. Así que para mantener invariante la temperatura se reducía la corriente cuando la temperatura superaba los 218°C y cuando disminuía se aumentaba, todo esto en un rango de + 0.05A.

La curva más baja de la Figura 4.28 corresponde a la temperatura del tubo externo a una presión de 1.00×10^{-3} Torr, los primeros 55 minutos el tubo se calienta hasta alcanzar una temperatura de 100°C, después de este tiempo la temperatura se estabiliza hasta alcanzar 102°C, después de 4 horas de mantener el sistema en funcionamiento, se desconectó la bomba y se finalizó la prueba ya que durante 3 horas el cambio de temperaturas solo fue de 2°C. A partir de esta prueba se determinó como tiempo de

medición para las siguientes, un total de 240 minutos, ya que solamente la primera hora se mantenía un cambio notorio de temperatura y siendo éste el tubo de menor diámetro se esperaba que para los diámetros mayores los tiempos fueran muy próximos y reducidos.

La curva intermedia corresponde a la temperatura del tubo externo a presión atmosférica adicionalmente da una evaluación de la transferencia de calor por corrientes de convección. En este caso la temperatura aumenta durante los primeros 65 minutos hasta alcanzar los 171 °C, y después mantuvo su temperatura constante hasta el final de la prueba. La observaciones correspondientes a esta prueba se presentan más adelante, ya que primero se realizaron las mediciones al vacío y al finalizarlas se hizo una sola prueba a presión atmosférica para compararla con cada una de las gráficas obtenidas con anterioridad.

Para verificar la reproducibilidad del experimento se llevaron a cabo dos pruebas más para el mismo tubo, sin embargo, ahora se registraron las temperaturas de los dos tubos desde el momento en que se encendió el sistema calefactor para poder observar la forma en que se calentaba debido a la radiación del foco.

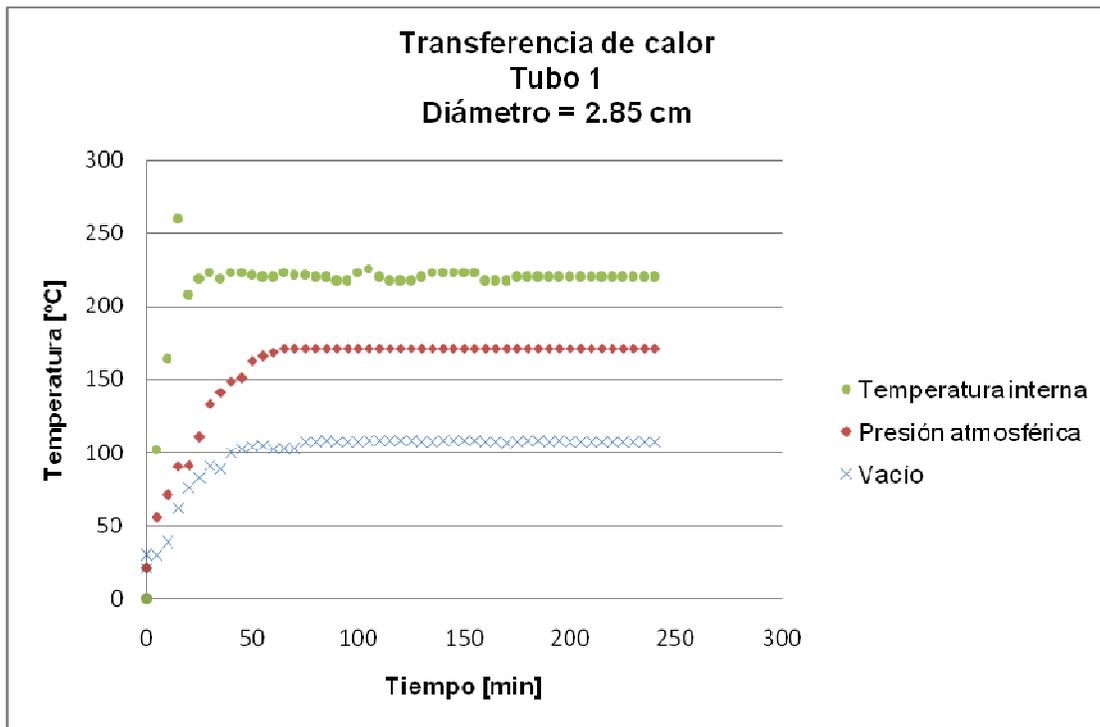


Figura 4.29
Transferencia de calor en el tubo 1
Prueba 2

La obtención de datos desde el encendido del equipo permite observar que el tubo interno alcanza los 200 °C en los primeros 15 minutos; se aprecia un salto hasta los 260 °C debido a un descuido en el control de la corriente, para corregirlo simplemente se redujo la corriente a cero para que las moléculas externas que entran por las fugas enfriaran el tubo hasta la temperatura deseada y una vez obtenida se volvió a suministrar corriente para mantenerla constante. Durante el experimento se notó que mientras la temperatura del tubo externo cambiaba era necesario estar controlando la corriente suministrada al

sistema calefactor, sin embargo cuando la temperatura externa se mantenía constante ya no era necesario controlar la corriente. Esta segunda prueba con el tubo 1 muestra que la temperatura externa alcanza los 106°C para una temperatura interna de 220°C, es decir, se corrigió la temperatura interna pues anteriormente no se habían alcanzado los 220°C y como consecuencia la temperatura externa aumentó hasta los 106°C.

La diferencia entre la segunda y la primera prueba se notó al inicio durante el experimento, pues cuando se calentaba el tubo interno, la presión ya no subía hasta 10^{-2} Torr debido a que después de la primera prueba el sistema se dejaba tapado a presión atmosférica y por ello ya no tenía tantas sustancias en la superficie como al inicio, en la prueba 3 se notó de nuevo este efecto, por lo que las gráficas de las Figuras 4.29 y 4.30 tienen una mayor similitud.

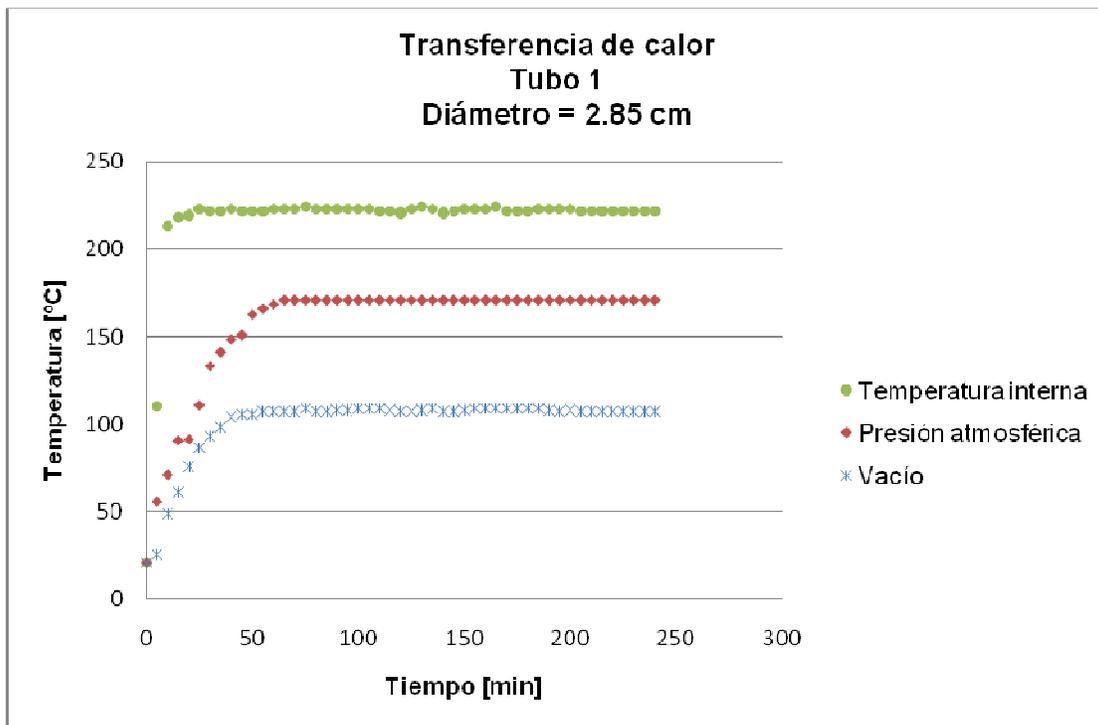


Figura 4.30
Transferencia de calor en el tubo 1
Prueba 3

En la tercera prueba nuevamente se tiene un aumento de temperatura durante la primera hora a una presión de 1.00×10^{-3} Torr llegando a una temperatura de 106°C, mientras que a presión atmosférica el tiempo para que el tubo externo mantenga su temperatura constante es 20 minutos mayor, esta diferencia de tiempos entre el vacío y la presión atmosférica se debe a que el tubo externo se calienta a una temperatura mayor cuando el sistema está a presión atmosférica debido a que se presentan corrientes de convección que transportan el calor del interior, este aumento de temperatura requiere de un tiempo mayor a pesar de que se calienta más rápido.

La curva a presión atmosférica incluye los tres tipos de transferencia de calor, por radiación debida al tubo interno; por contacto, ya que el tubo externo se colocó sobre la base de teflón y por lo tanto se transfirió calor hacia ella en el proceso y por último por corrientes de convección del aire, por el otro lado, la curva correspondiente al vacío

solamente contiene radiación y conducción asociadas a las mismas causas, pero al existir vacío las corrientes convectivas se reducen tratándose ahora de un flujo molecular el cual transfiere calor de forma muy lenta de acuerdo a la teoría mostrada en el capítulo II y corroborada en las gráficas del primer tubo.

La existencia de oxígeno en el aire y su escasez en el vacío se demostró durante las pruebas ya que la apariencia de los tubos de cobre no mostraba diferencias después de las mediciones al vacío, pero cuando se hizo la prueba a presión atmosférica el tubo interno y el tubo externo mostraron un cambio en su coloración debido a una oxidación.



Figura 4.31
Apariencia a presión atmosférica

Comparando la Figura 4.31 con las Figuras 3.21b y 3.23 se observa un tono rojizo en el tubo externo y un tono oscuro (óxido de cobre) en el tubo interno, otros efectos ocurridos en la prueba a presión atmosférica fueron el calentamiento de la tapa superior de la cámara de vacío y una diferencia de temperaturas en el largo del tubo de lucita debida al contacto con la tapa superior y a las corrientes convectivas dentro de la cámara, estas temperaturas no se midieron, solamente se censó el efecto con la mano.

Para verificar la existencia o inexistencia de corrientes de convección en el vacío, se procedió a realizar tres pruebas más pero ahora con el segundo tubo el cual tiene un diámetro mayor, lo que implica que su superficie se encuentra en una zona de menor intensidad de radiación como lo indica la ecuación 3.2.

Para colocar la siguiente prueba fue necesario usar guantes para no contaminar con grasa el sistema, antes de iniciar con las mediciones del segundo tubo fue necesario lijar el tubo calefactor para quitarle el óxido y limpiarlo posteriormente con alcohol isopropílico.

Las mediciones correspondientes a las pruebas del segundo tubo se obtuvieron desde el encendido del sistema calefactor y se registraron cada 5 minutos durante el lapso de cuatro horas, se realizaron tres pruebas al vacío y una a presión atmosférica para comparar el aumento de temperatura en cada caso.

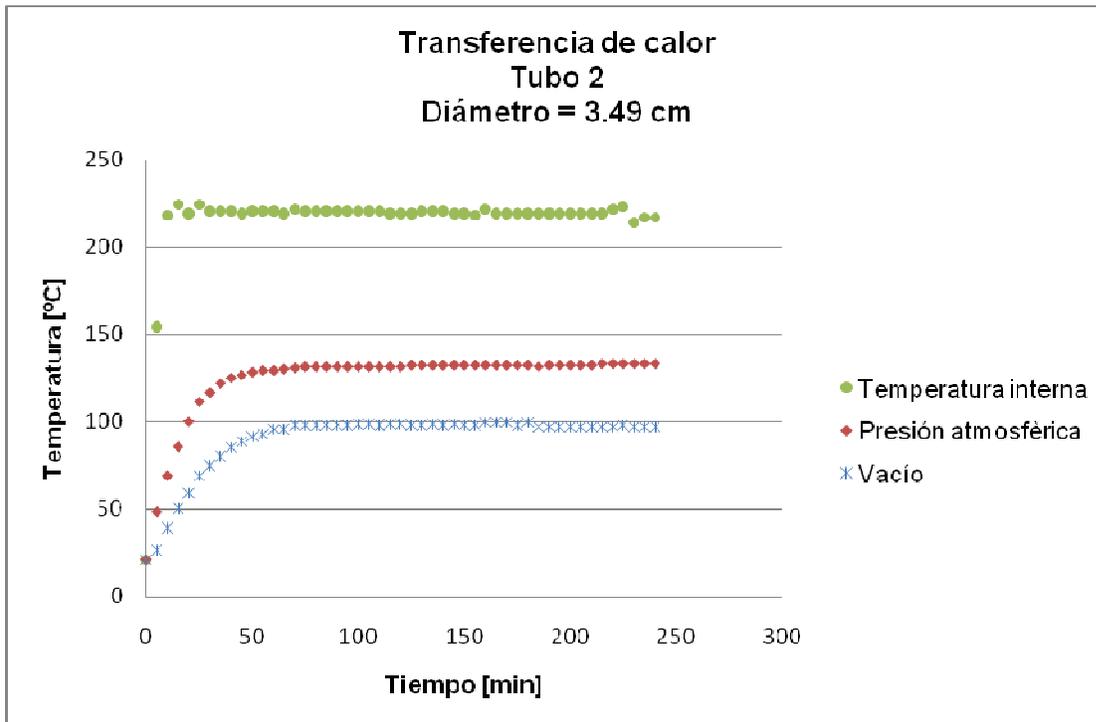


Figura 4.32
Temperatura del tubo 2
Prueba 1

La curva más alta muestra ahora una temperatura que oscila entre 219°C y 220°C, la curva más baja corresponde a la temperatura al vacío, en esta ocasión aumenta hasta 98°C, que solamente es 2°C menor que en el tubo 1, hay que señalar que esta temperatura corresponde a la transferencia por radiación del sistema calefactor y por conducción con la base de teflón, en cambio la curva de en medio contiene información sobre la transferencia por radiación, conducción y convección ya que corresponde a las mediciones a presión atmosférica, por lo tanto la diferencia entre la curva a presión atmosférica y al vacío indica la transferencia de calor por convección. Al final de las pruebas de los tres tubos se presenta una gráfica que muestra el promedio de las curvas de transferencia de calor por convección para cada uno de los tubos.

En este caso la curva a presión atmosférica alcanza un valor de 133°C que es menor respecto a la temperatura alcanzada en el tubo de diámetro menor, la cual es de 171°C, la disminución de la altura de la curva a presión atmosférica del tubo 1 al tubo 2 se debe a una disminución de la radiación, como se explicó en el capítulo III, asociada al aumento del diámetro del tubo.

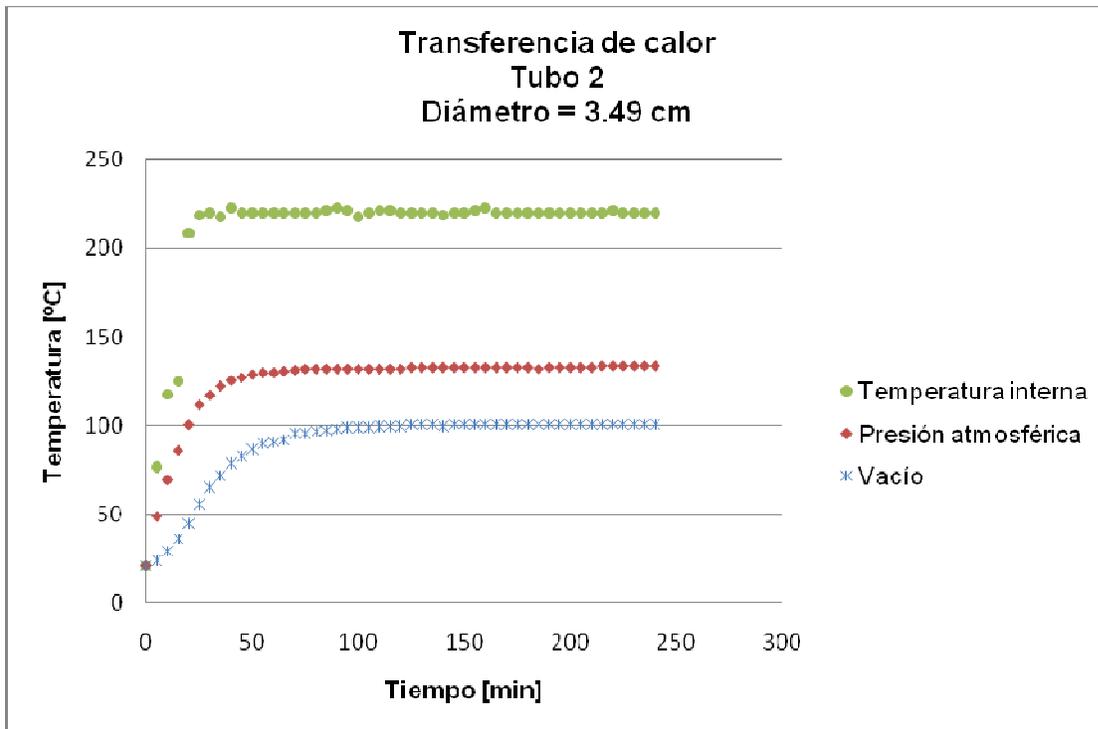


Figura 4.33
Temperatura del tubo 2
Prueba 2

Para la Prueba 2 del segundo tubo, la temperatura interna oscila entre los 220°C y 221°C, la curva correspondiente al vacío alcanza un valor máximo de 100°C que corresponde a la temperatura máxima alcanzada en las pruebas del primer tubo, se observa que el tiempo necesario para mantener la temperatura constante es menor para la prueba a presión atmosférica que al vacío debido a que la transferencia es mas lenta en el segundo caso.

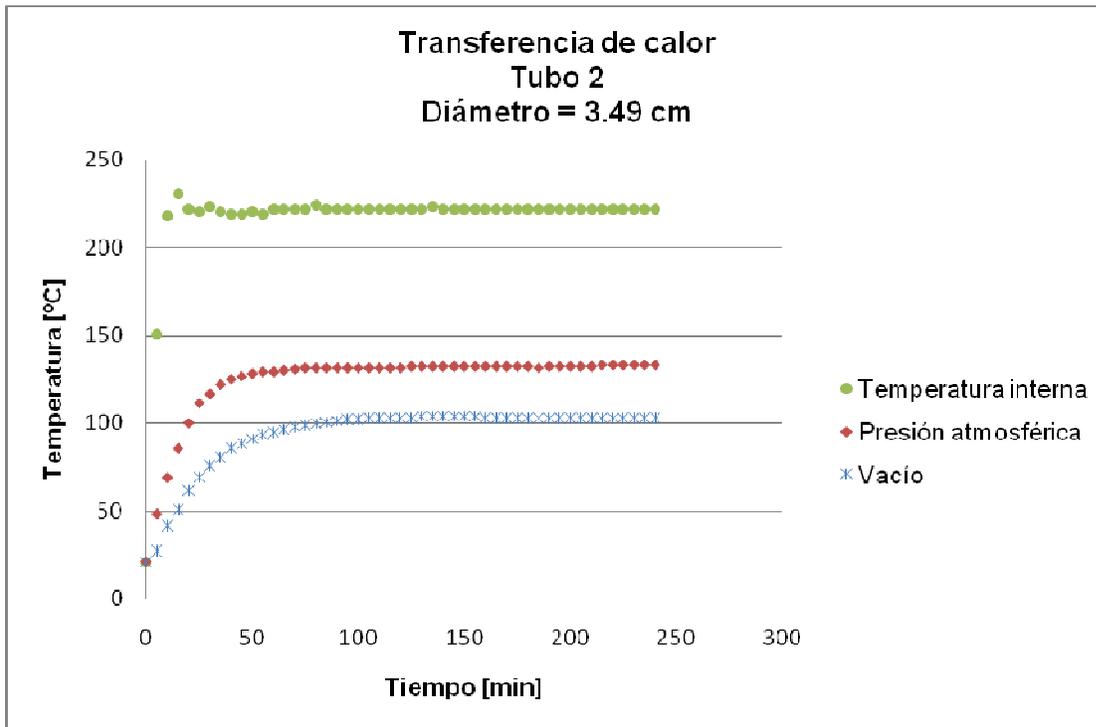


Figura 4.34
Temperatura del tubo 2
Prueba 3

En la tercera prueba del segundo tubo la temperatura interna llega hasta los 221 °C mientras que la temperatura externa al vacío alcanza los 102 °C que es 2 °C por encima de la temperatura alcanzada por el primer tubo, esta diferencia se debe a que en la tercera prueba se elevó un grado más la temperatura y en la primera prueba oscilaba entre los 219 °C y los 220 °C, analizando los resultados de las tres pruebas se puede ver que la diferencia de 1 °C se ve reflejada en la temperatura del tubo externo, pero en ambos casos esta diferencia provoca una de 2 °C en el externo, por lo que en la gráfica de transferencia por convección, presentada al final de las mediciones, se pueden promediar los valores, ya que la Prueba 1 está por debajo y la Prueba 3 por arriba de la que se obtuvo a los 220 °C.

Una vez terminadas las tres pruebas al vacío correspondientes al segundo tubo se procedió a realizar la de presión atmosférica ya que, como se observó en el primer tubo, los efectos del aire sobre el cobre pueden modificar las mediciones si se realiza antes de las de vacío. Una vez realizada se hizo el análisis presentado de las gráficas 4.32, 4.33 y 4.34.

La prueba a presión atmosférica vuelve a presentar un calentamiento de la tapa superior pero no de la inferior, esto demuestra la existencia de corrientes de convección dentro de la cámara ya que el aire caliente se mantiene siempre en la parte superior, también muestra los efectos del aire sobre el cobre ya que el tono del tubo interno y del externo cambia de las pruebas al vacío a la prueba a presión atmosférica, a continuación se presentan las fotografías tomadas al final de estas pruebas.



Figura 4.35
Apariencia a presión atmosférica

Comparando el color de los tubos de la Figura 4.35 con los de la 4.31, se ve que el color del interno es el mismo tono oscuro correspondiente al óxido de cobre, sin embargo el tubo externo en este caso se torna dorado y no café oscuro como el primero, este es un indicador de que posiblemente el tipo de cobre con el que están fabricados no es el mismo, cabe señalar que las condiciones ambientales del primero y segundo tubos fueron diferentes ya que en el primer tubo el clima era caluroso y no había tanta humedad como el día que se realizaron las mediciones del segundo tubo a presión atmosférica.

Una vez terminadas las pruebas se limpió nuevamente el sistema y se lijaron los tubos, se repitió el proceso de ensamblado y finalmente se colocó el tercer tubo el cual tiene un diámetro mayor a los dos anteriores.

Se presentan tres gráficas correspondientes a las mediciones análogas a los tubos anteriores: vacío, presión atmosférica y temperatura interna.

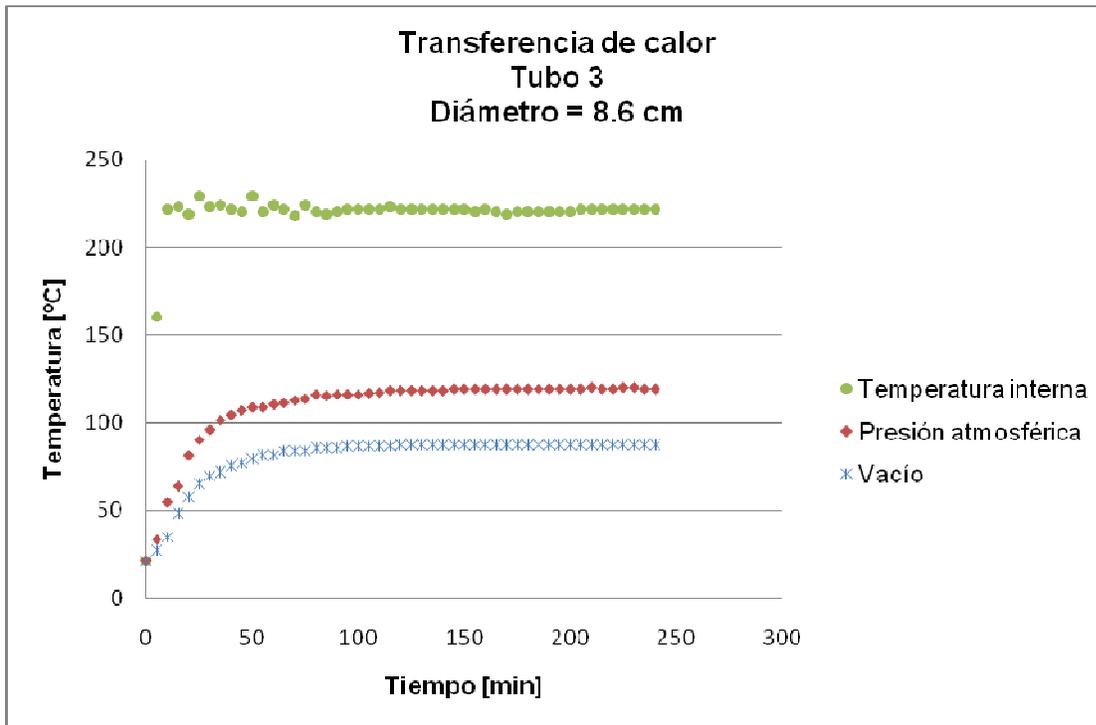


Figura 4.36
Temperatura del tubo 3
Prueba 1

La temperatura del tubo interno tiene un valor máximo de 221 °C alcanzado dentro de los primeros 10 minutos, la temperatura máxima alcanzada por el tubo externo al vacío fue de 87 °C mientras que a presión atmosférica llegó hasta 119 °C, para estas pruebas el tiempo para que la temperatura al vacío y a presión atmosférica fue prácticamente el mismo pues después de los 60 minutos las variaciones se realizaron de forma muy lenta, esto podría interpretarse como el hecho de que para este diámetro y al vacío la transferencia de calor se realiza casi en su totalidad por radiación.

A continuación se muestra la apariencia del tubo interno y externo después de la prueba a presión atmosférica.



Figura 4.37
Apariencia a presión atmosférica

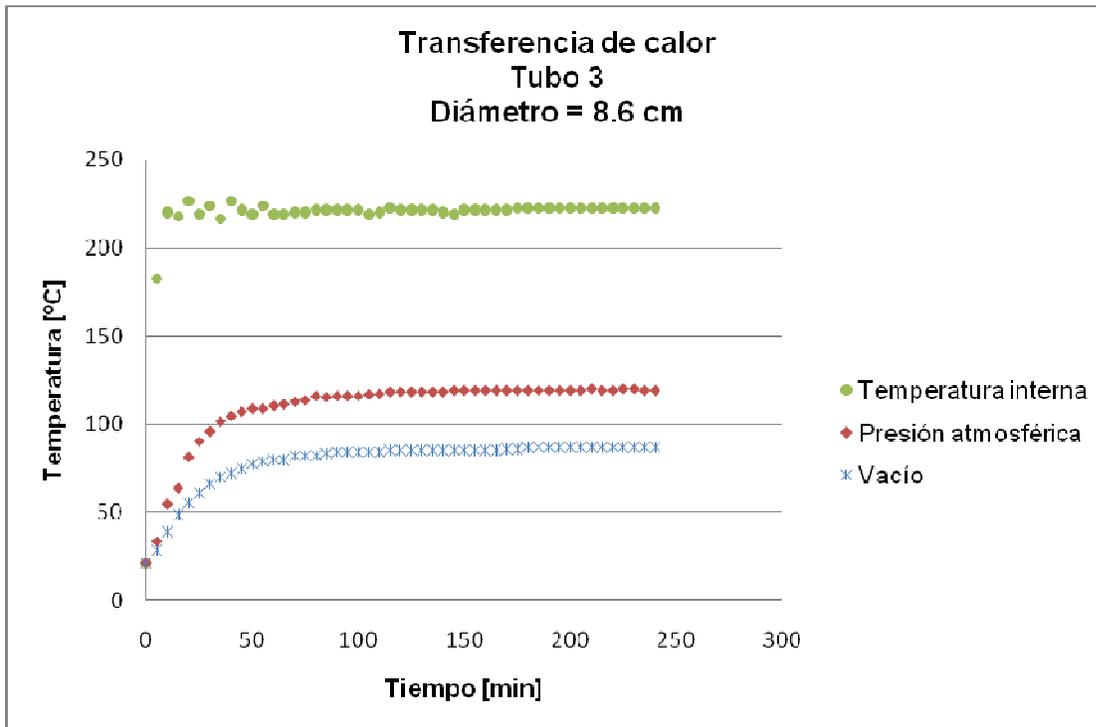


Figura 4.38
Temperatura del tubo 3
Prueba 2

Las gráficas de las Figuras 4.36 y 4.38 muestran variaciones de la temperatura del tubo interno durante los primeros 60 minutos mientras que las gráficas obtenidas para los dos tubos anteriores presentan un comportamiento regular en este intervalo de tiempo, esto muestra que para menores diámetros la transferencia de calor del tubo interno al externo es más rápida y por lo tanto el aumento de temperatura del tubo interno se puede controlar, en cambio, cuando la transferencia se da en un tiempo mayor todo el calor recibido por la radiación de foco se concentra en el tubo interno generando un aumento más rápido de la temperatura, cuando la radiación del foco disminuye al bajar la corriente con el variac, la temperatura del tubo disminuye y nuevamente hay que elevar la corriente para mantener la temperatura constante, este proceso se realiza solamente durante la primera hora, ya que después de este tiempo el control del sistema se facilita pues ya se ha alcanzado un equilibrio para la diferencia de temperatura seleccionada. La curva al vacío alcanza una temperatura máxima de 86°C por lo que el experimento resulta ser reproducible.

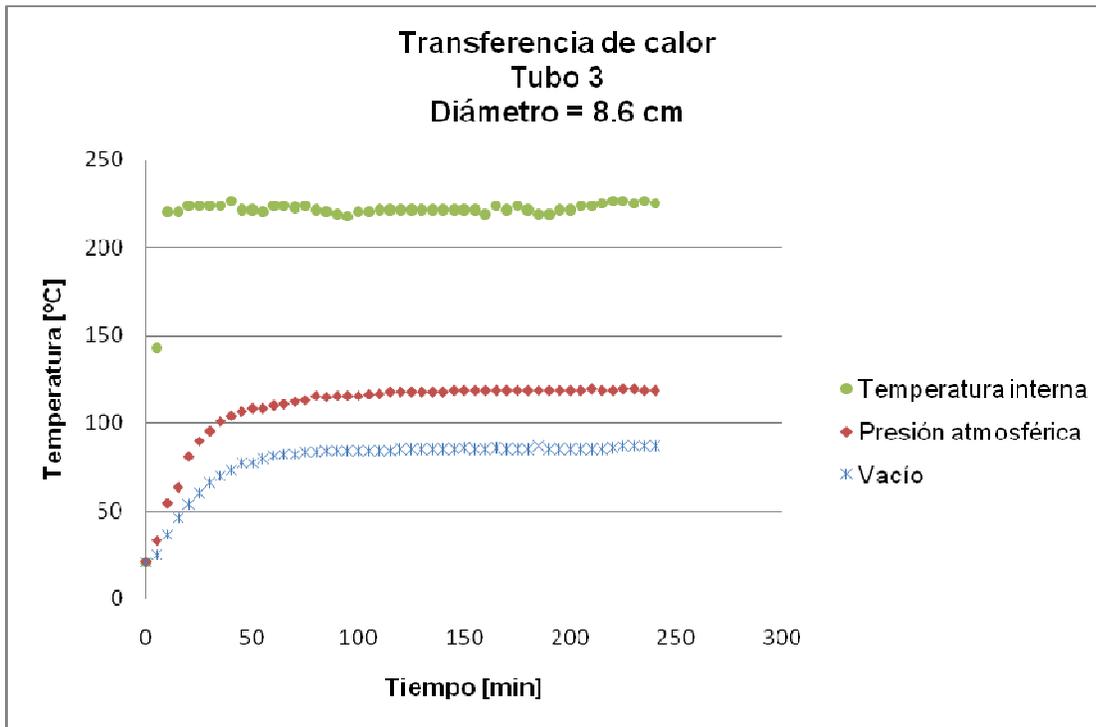


Figura 4.39
Temperatura del tubo 3
Prueba 3

En la tercera prueba del tercer tubo se reproducen los valores de la temperatura máxima en la prueba al vacío, desaparecen las variaciones del inicio, sin embargo, permanecen durante todo el tiempo de medición. La diferencia entre la curva a presión atmosférica y al vacío se reduce mostrando de esta forma que hay menor transferencia de calor por convección para este diámetro de los tubos.

La prueba a presión atmosférica mostró nuevamente la presencia de corrientes de convección, prueba de ello quedó reflejada en el tubo de lucita ya que el al aire caliente concentrado en la parte superior estrelló esta parte del tubo quedando como se muestra en la figura 4.40



Figura 4.40
Tubo de lucita al final de las pruebas

Se puede observar que solamente presenta un estrellamiento en la parte superior provocado por el aire caliente.

4.3 Transferencia por convección

Se presentan las curvas obtenidas para la transferencia por convección en cada uno de los tubos, cada una de las curvas obtenidas se obtuvo a partir de promediar las mediciones de las pruebas al vacío y restarlas a las mediciones a presión atmosférica. Solamente en el caso del primer tubo se promediaron la prueba 2 y 3 ya que la primera se comenzó cuando el tubo interno ya había alcanzado la temperatura máxima. Se promediaron las mediciones a pesar de mostrar diferencias entre las pruebas del mismo tubo, pero esto permite evaluar la eficiencia del vacío como aislante térmico a diferentes diámetros.

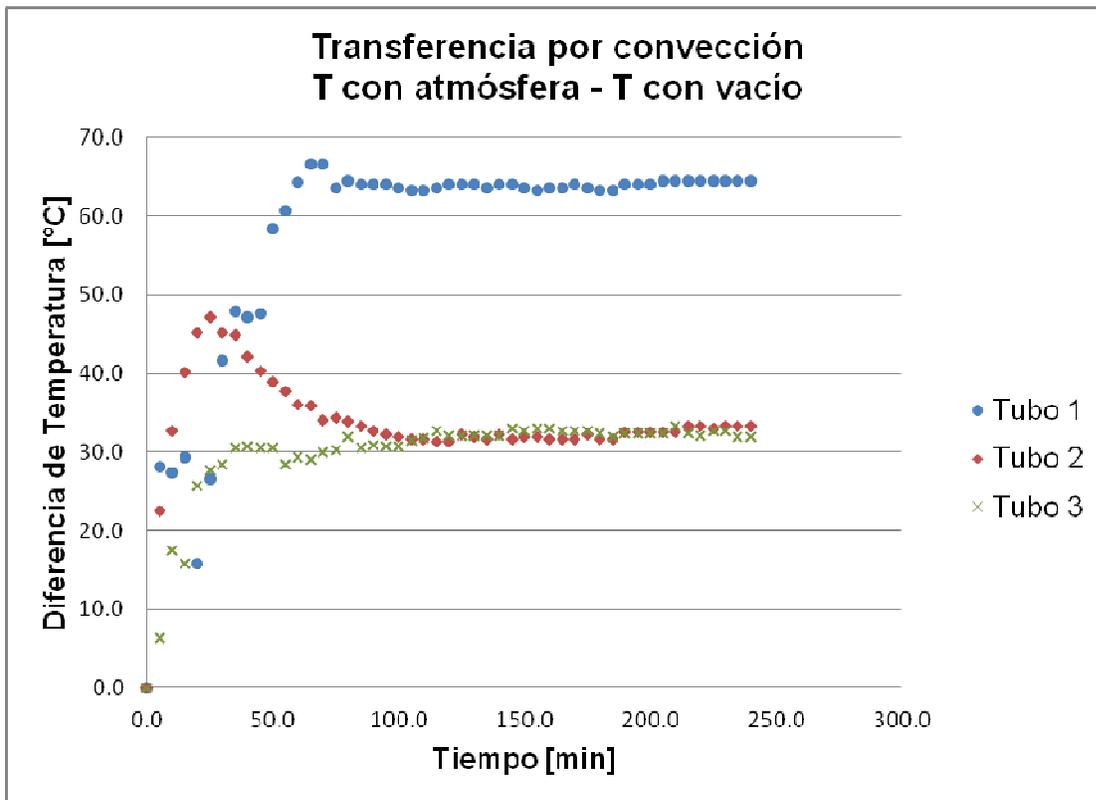


Figura 4.41
Transferencia de calor por convección

La curva más alta corresponde al tubo de menor diámetro, el aumento de temperatura asociado a la transferencia por convección es de 64°C, la curva de en medio corresponde al segundo tubo, el incremento asociado es de 33°C mientras que la curva más baja presenta un aumento de 32°C, esto significa que con un vacío de 1.00×10^{-3} Torr, a mayor diámetro disminuye la transferencia de calor por convección. El diámetro de los tubos conseguidos limitó al experimento en encontrar el diámetro mínimo para el cual el incremento de temperatura por convección es nulo, la diferencia de diámetros entre el tubo 1 y 2 es de 0.64 cm siendo la misma que entre los tubos 2 y 3, a pesar de ello la transferencia por convección no se comporta de la misma forma pues la diferencia entre

las curvas de la gráfica 4.41 muestra que hay un decaimiento notable del tubo 1 al 2 respecto a los dos últimos. Se ha graficado la temperatura promedio máxima alcanzada al vacío por cada uno de los tubos externos en función del diámetro, la gráfica correspondiente se muestra enseguida.

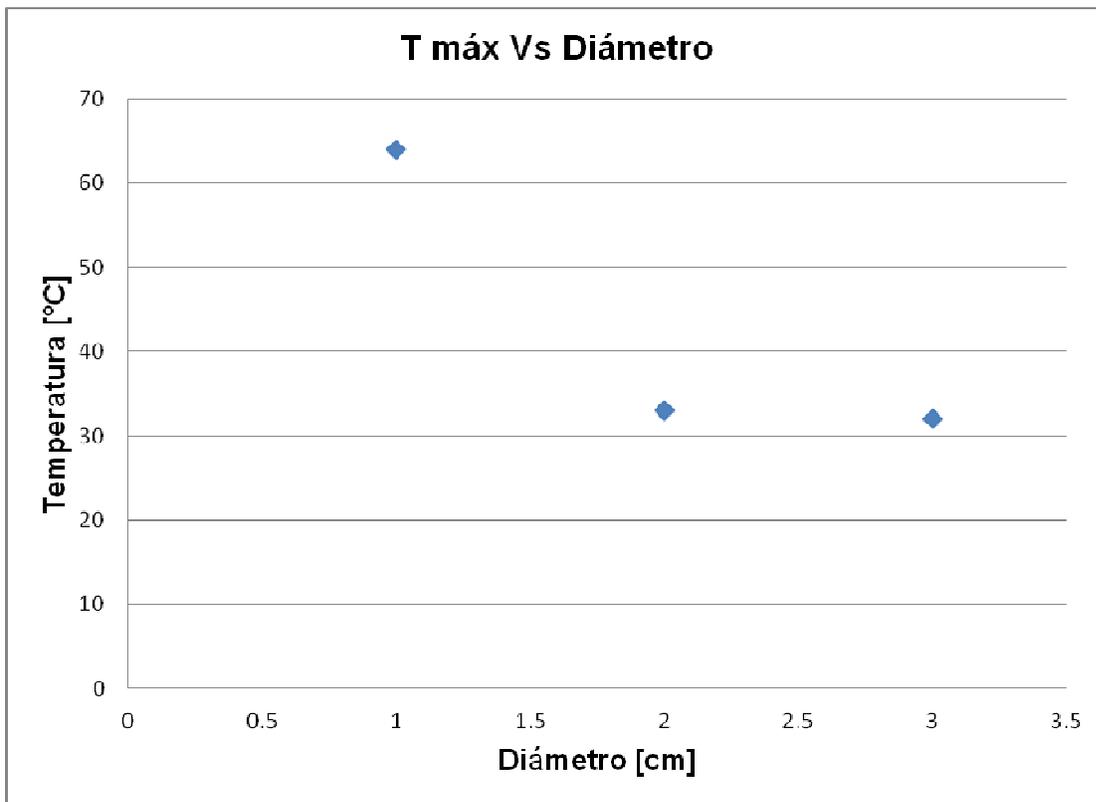


Figura 4.42
Temperatura máxima asociada
a corrientes de convección

La gráfica de la Figura 4.42 muestra que a mayores diámetros la temperatura máxima alcanzada por el tubo externo disminuye.

Las pruebas y los materiales utilizados durante los experimentos resultaron ser prácticos, aún así hay mejoras que se pueden hacer en el sistema, los resultados obtenidos presentaron el comportamiento esperado, por lo que se cumple la hipótesis.

4.4 Discusión del experimento

Después de hacer un análisis en base a la ecuación del Gas Ideal y de la Teoría Cinética de los Gases, se demostró que el vacío es un buen aislante térmico debido a la ausencia de corrientes de convección que transporten calor, así mismo, se distinguieron dos regímenes de flujos, el molecular y el viscoso, encontrando que el flujo molecular se presenta cuando la magnitud del camino libre medio es comparable con las dimensiones del sistema, en este caso, con la separación de las superficies de los tubo utilizados y el régimen viscoso se presenta cuando el camino libre medio es mucho menor que las dimensiones del sistema. La ley del Gas Ideal muestra que se puede generar un flujo

molecular si hace vacío en un sistema ya que disminuye el número de partículas y por lo tanto aumenta el camino libre medio.

El diseño del dispositivo utilizado para demostrar experimentalmente los resultados del análisis teórico, presentó dificultades al inicio para tratar de encontrar simetrías que facilitaran la obtención de datos así como su análisis; el diseño de placas paralelas tenía la dificultad de mantener la superficie caliente con temperatura uniforme, para solucionar el problema se planteó un sistema de cilindros concéntricos, este diseño resultó ser apropiado para llevar a cabo su construcción debido a que la fuerza de gravedad actúa siempre de forma vertical, otra de las ventajas que ofreció fue la facilitación del diseño del sistema de calefacción para mantener una superficie con temperatura uniforme.

La construcción del dispositivo fue una de las partes más largas del trabajo, ya que se desarrollaron los planos para la fabricación de las tapas de la cámara de vacío, se realizaron medidas en el foco diótrico para determinar el tamaño de los tubos utilizados; se cortaron y lijaron los tubos de cobre, se soldaron los termopares y se ajustaron a cada uno de los tubos y para verificar que las mediciones eran correcta se hicieron pruebas de comparación entre la temperatura determinada por los termopares y la temperatura registrada por un termómetro de mercurio, estas pruebas ayudaron a comprender y facilitar el manejo de las tablas de conversión, ya que los valores obtenidos de voltaje tuvieron que ser traducidos a grados centígrados.

La función de la cámara de vacío resultó ser exitosa al llegar a un vacío de 1.00×10^{-3} Torr con ayuda de la bomba mecánica, la limpieza correcta del sistema fue fundamental para la conservación del tubo de lucita y para la obtención de la curva de bombeo, la alineación correcta del sistema facilitó realizar los contactos con el sistema de calefacción de forma rápida, sin embargo, esta parte del sistema fue la que más problemas presentó debido a que los contactos fueron atravesadores cuyas puntas entraban en un orificio realizado en los tornillos que conectaban al foco diótrico, cuando la verticalidad del sistema no era la adecuada las conexiones llevaban alrededor de 20 minutos en poder realizarse, además cuando el tubo caliente llegaba alrededor de los 150°C los contactos se interrumpían debido a la dilatación de los materiales y provocaron en varias ocasiones que las pruebas se tuvieran que suspender debido a la disminución de temperatura de los tubos a falta de corriente. La base de teflón resultó ser muy práctica para mantener a los tubos concéntricos además de que durante las pruebas no presentó un aumento notorio de temperatura y con ello la transferencia por conducción fue muy pobre.

Los termopares utilizados mostraron mediciones con diferencias menores de 0.5mV asociadas a que las puntas de los termopares tuvieron un área de contacto distinta, además de una longitud distinta que pudo influir en los voltajes registrados, a pesar de ellos las mediciones fueron reproducibles por lo que se pudieron promediar los valores obtenidos, cuando los valores discreparon en más de los 0.5 mV, se procedió a realizar un ajuste de los termopares pues su rigidez fue un factor que complicó el buen contacto con las superficies, el diámetro también fue una complicación para la colocación sobre los tubos, pero se solucionó al aplanarlos y verificar que no había cambios en las mediciones.

Los tubos se eligieron de cobre, del cual se tenían diámetros diferentes, las pruebas demostraron que no eran del mismo tipo ya que los tonos después de las pruebas a presión atmosférica fueron totalmente diferentes, se observó que los componentes del aire tienden a reaccionar con el cobre, también se pudo apreciar en el

proceso de limpieza que el cobre almacena mucha humedad por lo que al bajar la presión de la cámara con los tubos dentro se notó un aumento en la presión asociado a la evaporación de agua y alcohol isopropílico que fue la sustancia con la que se limpiaron antes de introducirse, se puede afirmar que el elemento principal del aire que reacciona con el cobre es el oxígeno ya que el tubo calefactor tomó un color negro propio del óxido de cobre.

El acero inoxidable fue una elección acertada para las tapas, ya que su conductividad térmica es muy baja comparada con la de otros metales y esto ayudó a mantener aislados térmicamente a los tubos de cobre con el aire exterior, lo único con lo que se tuvo cuidado en cuanto a las tapas fue que ninguno de los atravesadores hiciera contacto con ellas, ya que en una ocasión sucedió y las medidas de los termopares resultaban ser muy distintas a pruebas anteriores, además de que se presentó un corto que puso en peligro el variac utilizado, después de haber experimentado esta situación se tuvo precaución en las pruebas posteriores.

Uno de los objetivos principales del diseño del dispositivo fue poder observar el proceso de forma directa, por lo que utilizar un tubo de lucita como cámara de vacío fue una excelente decisión, esto permitió observar los cambios de color de los tubos de cobre a presión atmosférica y a partir de ello verificar los efectos de algunos componentes del aire sobre el cobre, también permitió comparar de manera visual las diferencias entre las mediciones en vacío y en presión atmosférica, por otra parte se pudo saber en que momento fallaban las conexiones con el foco, así como una buena verticalidad del sistema que garantizara el aislamiento físico del tubo interno con el externo

En general, el funcionamiento de la cámara y de sus componentes resultó adecuado para obtener los datos necesarios para verificar la hipótesis.

En cuanto a la parte experimental, la primera de las pruebas mostró que la curva de bombeo tiene un comportamiento exponencial decreciente con ecuación $P(t)=20.14t^{-0.78}$ con un coeficiente de correlación de $R^2=0.991$, que representa una dispersión muy baja de los datos, la curva muestra que se alcanza un vacío de 1.00×10^{-3} Torr en 11 minutos, este tiempo es pequeño comparado con otros sistemas de vacío debido a que el volumen desplazado por la bomba es comparable con el volumen de la cámara de vacío, por ello la curva de bombeo presenta una caída muy rápida dentro de los primeros segundos y posteriormente muestra un comportamiento exponencial.

Los resultados obtenidos de las pruebas del primer tubo, $d=2.85$ cm, muestran que el incremento de temperatura del tubo externo es 64°C menor al vacío que a presión atmosférica ($\Delta T=69^\circ\text{C}$), en ambos casos el tiempo de realización de las pruebas (4h) limita poder conocer en que momento se alcanza el equilibrio térmico, a pesar de ello, se observa que a presión atmosférica el equilibrio se alcanzará en un tiempo mucho menor que al vacío. La tendencia de las curvas a una línea recta horizontal permite estimar que el tiempo en el que se alcanza el equilibrio térmico por radiación y/o contacto es demasiado largo y requeriría de un monitoreo de varias horas o incluso días para observarlo. El primer tubo fue el que más trabajo costó en colocarlo ya que la diferencia de diámetros entre el interno y éste fue de solamente 0.95 cm que al quedar colocados de forma concéntrica dejaba una separación de 0.47 cm entre las superficies.

Las pruebas del segundo tubo, $d=3.49$ cm, demuestran que la transferencia de calor por radiación se reduce ya que a presión atmosférica el tubo llega hasta los 133°C en vez de los 171°C alcanzados por el primer tubo, mientras que el incremento de

temperatura al vacío se mantiene en los 100 °C, al igual que para el tubo más pequeño, en este caso $\Delta T=33\text{ °C}$; no hay un cambio en la transferencia por convección ya que de ser así la curva obtenida al vacío tendría una temperatura menor a los 100 °C, la colocación del segundo tubo dentro de la cámara de vacío se facilitó al tener un diámetro mayor.

Para el tercer tubo, $d= 4.13\text{ cm}$, se tiene una disminución de la transferencia por radiación y por convección, la disminución de la radiación se manifiesta en la disminución de la temperatura a presión atmosférica, alcanzando una temperatura de 118 °C mientras que la reducción de la transferencia por convección se observa en las pruebas al vacío, en este caso la temperatura alcanzada es de 87 °C, para este tubo $\Delta T=32\text{ °C}$.

Comparando los datos obtenidos de los tres tubos se observa un decaimiento de la ΔT mantenida entre el tubo externo a presión atmosférica y al vacío, pero la diferencia entre los tubos interno y externo presenta un crecimiento. Las curvas a presión atmosférica contienen información de las tres formas de transferencia de calor, mientras que las curvas al vacío contienen la información de transferencia por radiación y conducción, al graficar la diferencia de estas curvas se obtiene el resultado de la transferencia por convección concluyendo que a diámetros mayores la convección transfiere menos calor reflejándose en la disminución de la temperatura del tubo externo.

Ahora que se ha demostrado que el vacío es un buen aislante térmico se puede pensar en las aplicaciones industriales, entre ellas se encuentra el diseño de tanques criogénicos que conservan gases licuados como el nitrógeno, también se puede aplicar a la industria de la refrigeración dada la necesidad de mantener el interior de un refrigerador aislado térmicamente de la temperatura ambiente, en la fabricación de vidrios para viviendas en zonas calurosas ya que impedirían que el interior de la casa aumentara de temperatura, algunas de estas aplicaciones ya han sido comercializadas como es el caso de los tanques criogénicos, el uso doméstico del vacío como fuente aislante no se ha llevado a cabo por motivos económicos pues el proceso de vacío suele ser costoso, para hacer viable el empleo del vacío como aislante térmico a nivel doméstico se podrían hacer pruebas con un sistema análogo pero con la diferencia de que ahora la fuente de temperatura constante tuviera un valor mucho menor, por ejemplo de 0 °C cuyos resultados serían aplicables a contenedores de hielo.

El análisis de los resultados obtenidos muestra que para temperaturas altas la radiación es el proceso principal de transferencia de calor, así que para temperaturas bajas la radiación y la convección tendrían un papel prácticamente nulo en la transferencia de calor y si se minimiza el área de contacto entre la parte interna y la externa se puede tener un recipiente que conserve la diferencia de temperaturas por tiempos muy prolongados.

Las pruebas mostraron que las fugas del sistema son indispensables para garantizar el tiempo que puede funcionar un recipiente antes de volver a hacerle vacío, así que la hermeticidad también resulta ser un factor considerable para la creación de contenedores térmicos. El diseño del sistema tiene una conexión para insertar gases, sin embargo no se hizo ninguna prueba con algún gas ya que se presentaron problemas con los contactos hacia el foco después de la última prueba que requieren de mejoras y por lo tanto de inversión de tiempo. A pesar de ello las pruebas a presión atmosférica garantizan el funcionamiento del sistema con otro tipo de gases y a partir de las curvas obtenidas es posible medir la rapidez de transferencia del gas.

A lo largo de las pruebas de medición se fueron planeando mejoras al sistema,

como lo son los contactos del foco con los atravesadores que conectan al variac, ya que depender de la verticalidad del sistema resultó demasiado complicado, también se pensó en utilizar un tipo de termopares que no fueran tan rígidos y más fáciles de manipular, la rigidez fue en varias ocasiones un motivo por el cual los tubos no se mantenían concéntricos al momento de realizar las conexiones con el sistema de calefacción, otra de las peculiaridades del sistema es que el tubo interno necesariamente se conectaba a la tapa superior de la tapa para poder ensamblar el sistema, lo cual dificultó en gran medida las conexiones eléctricas. Mantener el tubo interno a temperatura constante con un termostato evitaría la necesidad de estar al pendiente del sistema y tener que hacer los ajustes de forma manual.

4.5 Trabajos a futuro

Algunos experimentos extras que se pueden realizar con el mismo dispositivo es el análisis de la transferencia de calor con gases diferentes a volumen constante, esto se puede hacer con ayuda de la válvula de inserción; se puede analizar la transferencia por convección forzada, conectando un regulador de flujo, también se puede representar un sistema criogénico de doble capa con vacío intermedio, colocando dos tubos externos en lugar de uno, se pueden colocar tubos de otro material para comparar el comportamiento.

Se puede hacer un mejor análisis tomando datos por tiempos más prolongados y con intervalos de tiempos menores a los cinco minutos seleccionados, sobre todo en la primera parte del experimento en donde se comienzan a calentar el tubo interno. Incluso se podría automatizar la toma de datos con ayuda de algún programa de cómputo y una interfaz que registre los voltajes de los termopares.

4.6 Conclusiones

Finalmente se puede concluir que el diseño y construcción del sistema ayudaron a demostrar de forma exitosa que el vacío es un buen aislante térmico y que puede ser aplicado en la industria.

Apéndice A

Datos representativos

Las temperaturas T₁, T₂, T₃, T₄ y T₅ están referidas a una temperatura ambiente de 20°C, es decir, para obtener la temperatura real hay que sumar 20°C, los promedios están referidos a los 0°C.

Tubo 1

Tiempo [min]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T _{int} promedio [°C]	T ₃ [°C]	T ₄ [°C]	T ₅ [°C]	T _{ext} promedio [°C]
0	1	1	21	1	1	1	21
5	77	87	102	9	9	12	30
10	141	148	164	17	19	22	39
15	240	240	260	36	44	46	62
20	188	188	208	49	58	61	76
25	201	198	219	53	65	70	83
30	203	203	223	61	75	77	91
35	198	203	219	55	70	82	89
40	203	203	223	73	82	85	100
45	203	203	223	75	85	87	102
50	203	201	222	77	85	90	104
55	201	201	221	77	87	90	105
60	201	201	221	70	87	90	102
65	203	203	223	70	87	92	103
70	203	201	222	70	87	92	103
75	203	201	222	82	87	92	107
80	201	201	221	82	87	92	107
85	201	201	221	82	90	92	108
90	198	198	218	82	87	92	107
95	198	198	218	82	87	92	107
100	203	203	223	82	87	92	107
105	206	206	226	82	90	92	108
110	201	201	221	82	90	92	108
115	198	198	218	82	90	92	108
120	198	198	218	82	90	92	108
125	198	198	218	82	90	92	108
130	201	201	221	82	87	92	107
135	203	203	223	82	87	92	107
140	203	203	223	82	90	92	108
145	203	203	223	82	90	92	108
150	203	203	223	82	90	92	108
155	203	203	223	82	90	92	108
160	198	198	218	82	87	92	107
165	198	198	218	82	87	92	107

Tubo 1: Continuación

Tiempo [min]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T _{int} promedio [°C]	T ₃ [°C]	T ₄ [°C]	T ₅ [°C]	T _{ext} promedio [°C]
170	198	198	218	82	87	90	106
175	201	201	221	82	87	92	107
180	201	201	221	82	90	92	108
185	201	201	221	82	90	92	108
190	201	201	221	82	87	92	107
195	201	201	221	82	90	92	108
200	201	201	221	82	87	92	107
205	201	201	221	82	87	92	107
210	201	201	221	82	87	92	107
215	201	201	221	82	87	92	107
220	201	201	221	82	87	92	107
225	201	201	221	82	87	92	107
230	201	201	221	82	87	92	107
235	201	201	221	82	87	92	107
240	201	201	221	82	87	92	107

El renglón en negritas de tabla del tubo 1, fue la referencia para realizar el cálculo del error ya que fue el que mostró mayor variación.

Tubo 2

Tiempo [min]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T _{int} promedio [°C]	T ₃ [°C]	T ₄ [°C]	T ₅ [°C]	T _{ext} promedio [°C]
0	1	1	21	1	1	1	21
5	138	131	154	61	61	61	27
10	203	193	218	19	22	17	39
15	211	198	224	31	34	26	50
20	206	193	219	41	44	34	59
25	211	198	224	51	53	44	69
30	208	193	221	61	56	49	75
35	208	193	221	63	65	53	80
40	208	193	221	70	68	58	85
45	206	193	219	75	70	63	89
50	208	193	221	73	77	65	92
55	208	193	221	75	80	65	93
60	208	193	221	77	82	68	96
65	206	193	219	77	82	68	96
70	208	196	222	80	85	70	98
75	208	193	221	80	85	70	98
80	208	193	221	80	85	70	98
85	208	193	221	80	85	70	98
90	208	193	221	80	85	70	98
95	208	193	221	80	85	70	98
100	208	193	221	80	87	70	99
105	208	193	221	80	87	70	99
110	208	193	221	80	85	70	98

Tubo 2: Continuación

Tiempo [min]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T _{int} promedio [°C]	T ₃ [°C]	T ₄ [°C]	T ₅ [°C]	T _{ext} promedio [°C]
115	206	193	219	80	87	70	99
120	206	193	219	80	87	70	99
125	206	193	219	80	87	68	98
130	206	196	221	80	87	68	98
135	206	196	221	82	87	68	99
140	206	196	221	80	87	68	98
145	206	193	219	82	87	68	99
150	206	193	219	80	87	68	98
155	203	193	218	80	87	68	98
160	208	196	222	82	87	70	100
165	206	193	219	82	87	70	100
170	206	193	220	82	87	70	100
175	206	193	220	80	87	68	98
180	206	193	220	82	87	70	100
185	206	193	220	80	85	68	97
190	206	193	220	80	85	68	97
195	206	193	220	80	85	68	97
200	206	193	220	80	85	68	97
205	206	193	220	80	85	68	97
210	206	193	220	80	85	68	97
215	206	193	220	80	85	68	97
220	208	196	222	80	85	68	97
225	208	198	223	80	87	68	98
230	201	188	214	80	85	68	97
235	203	191	217	80	85	68	97
240	203	191	217	80	85	68	97

Tubo 3

Tiempo [min]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T _{int} promedio [°C]	T ₃ [°C]	T ₄ [°C]	T ₅ [°C]	T _{ext} promedio [°C]
0	1	1	21	1	1	1	21
5	143	138	161	7	9	7	27
10	206	198	222	14	17	14	35
15	208	198	223	29	29	29	49
20	203	196	219	39	36	39	58
25	213	206	229	46	44	46	65
30	206	201	223	51	49	51	70
35	208	201	224	53	51	53	72
40	206	198	222	56	56	56	76
45	203	198	221	58	56	58	77
50	213	206	229	61	58	61	80
55	203	198	221	63	61	63	82
60	208	201	224	63	61	63	82
65	206	198	222	65	63	65	84
70	201	196	218	65	62.5	65	84

Tubo 3: Continuación

Tiempo [min]	T1 [°C]	T2 [°C]	T _{int} promedio [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T _{ext} promedio [°C]
75	208	201	224	65	62.5	65	84
80	203	198	221	68	65	65	86
85	203	196	219	68	65	65	86
90	203	198	221	68	65	65	86
95	206	198	222	68	65	68	87
100	206	198	222	68	65	68	87
105	206	198	222	68	65	68	87
110	206	198	222	68	65	68	87
115	203	203	223	68	65	68	87
120	206	198	222	70	65	68	88
125	206	198	222	70	65	68	88
130	206	198	222	70	65	68	88
135	206	198	222	70	65	68	88
140	206	198	222	70	65	68	88
145	206	198	222	70	65	68	88
150	206	198	222	70	65	68	88
155	203	198	221	70	65	68	88
160	206	198	222	70	65	68	88
165	203	198	221	70	65	68	88
170	203	196	219	70	65	68	88
175	203	198	221	70	65	68	88
180	203	198	221	70	65	68	88
185	203	198	221	70	65	68	88
190	203	198	221	70	65	68	88
195	203	198	221	70	65	68	88
200	203	198	221	70	65	68	88
205	206	198	222	70	65	68	88
210	206	198	222	70	65	68	88
215	206	198	222	70	65	68	88
220	206	198	222	70	65	68	88
225	206	198	222	70	65	68	88
230	206	198	222	70	65	68	88
235	206	198	222	70	65	68	88
240	206	198	222	70	65	68	88

MAXIMUM TEMPERATURE RANGE

Thermocouple Grade

- 328 to 2282°F
- 200 to 1250°C

Extension Grade

- 32 to 392°F
- 0 to 200°C

LIMITS OF ERROR

(whichever is greater)

Standard: 2.2°C or 0.75% Above 0°C

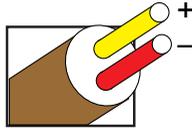
2.2°C or 2.0% Below 0°C

Special: 1.1°C or 0.4%

COMMENTS, BARE WIRE ENVIRONMENT:

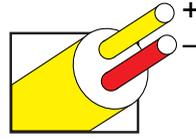
Clean Oxidizing and Inert; Limited Use in Vacuum or Reducing; Wide Temperature Range; Most Popular Calibration

**TEMPERATURE IN DEGREES °C
REFERENCE JUNCTION AT 0°C**



Apéndice B

**Nickel-Chromium
VS.
Nickel-Aluminum**



**Extension
Grade**

**Revised Thermocouple
Reference Tables**

TYPE K
Reference
Tables
N.I.S.T.
Monograph 175
Revised to
ITS-90

Z

Thermoelectric Voltage in Millivolts

°C	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C	°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
-260	-6.458	-6.457	-6.456	-6.455	-6.453	-6.452	-6.450	-6.448	-6.446	-6.444	-6.441	-260	250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561	250
-250	-6.441	-6.438	-6.435	-6.432	-6.429	-6.425	-6.421	-6.417	-6.413	-6.408	-6.404	-250	260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971	260
-240	-6.404	-6.399	-6.393	-6.388	-6.382	-6.377	-6.370	-6.364	-6.358	-6.351	-6.344	-240	270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382	270
-230	-6.344	-6.337	-6.329	-6.322	-6.314	-6.306	-6.297	-6.289	-6.280	-6.271	-6.262	-230	280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795	280
-220	-6.262	-6.252	-6.243	-6.233	-6.223	-6.213	-6.202	-6.192	-6.181	-6.170	-6.158	-220	290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209	290
-210	-6.158	-6.147	-6.135	-6.123	-6.111	-6.099	-6.087	-6.074	-6.061	-6.048	-6.035	-210	300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624	300
-200	-6.035	-6.021	-6.007	-5.994	-5.980	-5.965	-5.951	-5.936	-5.922	-5.907	-5.891	-200	310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040	310
-190	-5.891	-5.876	-5.861	-5.845	-5.829	-5.813	-5.797	-5.780	-5.763	-5.747	-5.730	-190	320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457	320
-180	-5.730	-5.713	-5.695	-5.678	-5.660	-5.642	-5.624	-5.606	-5.588	-5.569	-5.550	-180	330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.666	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874	330
-170	-5.550	-5.531	-5.512	-5.493	-5.474	-5.454	-5.435	-5.415	-5.395	-5.374	-5.354	-170	340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293	340
-160	-5.354	-5.333	-5.312	-5.292	-5.271	-5.250	-5.228	-5.207	-5.185	-5.163	-5.141	-160	350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713	350
-150	-5.141	-5.119	-5.097	-5.074	-5.051	-5.029	-5.006	-4.983	-4.960	-4.936	-4.913	-150	360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133	360
-140	-4.913	-4.889	-4.865	-4.841	-4.817	-4.793	-4.768	-4.744	-4.719	-4.694	-4.669	-140	370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554	370
-130	-4.669	-4.644	-4.618	-4.593	-4.567	-4.542	-4.516	-4.490	-4.464	-4.437	-4.411	-130	380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.848	15.891	15.933	15.975	380
-120	-4.411	-4.384	-4.357	-4.330	-4.303	-4.276	-4.249	-4.221	-4.194	-4.166	-4.138	-120	390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397	390
-110	-4.138	-4.110	-4.082	-4.054	-4.025	-3.997	-3.968	-3.939	-3.911	-3.882	-3.852	-110	400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820	400
-100	-3.852	-3.823	-3.794	-3.764	-3.734	-3.705	-3.675	-3.645	-3.614	-3.584	-3.554	-100	410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243	410
-90	-3.554	-3.523	-3.492	-3.462	-3.431	-3.400	-3.368	-3.337	-3.306	-3.274	-3.243	-90	420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667	420
-80	-3.243	-3.211	-3.179	-3.147	-3.115	-3.083	-3.050	-3.018	-2.986	-2.953	-2.920	-80	430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091	430
-70	-2.920	-2.887	-2.854	-2.821	-2.788	-2.755	-2.721	-2.688	-2.654	-2.620	-2.587	-70	440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516	440
-60	-2.587	-2.553	-2.519	-2.485	-2.450	-2.416	-2.382	-2.347	-2.312	-2.278	-2.243	-60	450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.899	18.941	450
-50	-2.243	-2.208	-2.173	-2.138	-2.103	-2.067	-2.032	-1.996	-1.961	-1.925	-1.889	-50	460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366	460
-40	-1.889	-1.854	-1.818	-1.782	-1.745	-1.709	-1.673	-1.637	-1.600	-1.564	-1.527	-40	470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792	470
-30	-1.527	-1.490	-1.453	-1.417	-1.380	-1.343	-1.305	-1.268	-1.231	-1.194	-1.156	-30	480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218	480
-20	-1.156	-1.119	-1.081	-1.043	-1.006	-0.968	-0.930	-0.892	-0.854	-0.816	-0.778	-20	490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644	490
-10	-0.778	-0.739	-0.701	-0.663	-0.624	-0.586	-0.547	-0.508	-0.470	-0.431	-0.392	-10	500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071	500
0	-0.392	-0.353	-0.314	-0.275	-0.236	-0.197	-0.157	-0.118	-0.079	-0.039	0.000	0	510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497	510
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397	0	520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924	520
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798	10	530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350	530
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.959	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203	20	540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776	540
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612	30	550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203	550
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023	40	560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629	560
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436	50	570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055	570
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851	60	580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480	580
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267	70	590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905	590
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682	80	600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330	600
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096	90	610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755	610
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.26																				

Bibliografía

[1] Física. Serway. Ed. Pearson Educación. pág. 314

[2] Fundamentals of heat and mass transfer. Frank. P. Incropera. Ed. John Wiley and Sons. Canadá. pág. 6

[3] Transferencia de calor. J. P. Hollman. Compañía editorial continental. México. pág. 20-31, 243-265

[4] Fundamentals of heat and mass transfer. Frank. P. Incropera. Ed. John Wiley and Sons. Canadá. pág 6, 13

[5] Vacuum Technology. A.Roth. Ed. North-Holland, Netherlands. pág. 56-59

[6] Física. Serway. Ed. Pearson Educación. pág. 328-332