



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGIA – SOLAR FOTOTÉRMICA

“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO TÉRMICO DE UN TUBO ABSORBEDOR
DE BOROSILICATO EN LA PLANTA SOLAR, CON DIFERENTES CONDICIONES DE
FLUJO INTERNO”

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

RIGOBERTO DOMÍNGUEZ SURIANO

TUTOR: DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO, II UNAM.

COMITÉ TUTORIAL

DR. DAVID MORILLON GÁLVEZ,	INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM
DR. ARTURO PALACIO PÉREZ,	INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM
DR. IVÁN GALILEO MARTINEZ CIENFUEGOS,	FACULTAD DE QUIMICA
DRA. AZUCENA ESCOBEDO IZQUIERDO,	FACULTAD DE INGENIERIA.

MÉXICO, D. F. 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. DAVID MORILLON GÁLVEZ

Secretario: DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO

Vocal: ARTURO PALACIO PÉREZ

1 er. Suplente: IVÁN GALILEO MARTINEZ CIENFUEGOS

2 d o. Suplente: DRA. AZUCENA ESCOBEDO IZQUIERDO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Coordinación de mecánica y energía, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Planta solar de Canal Parabólico Simple, Instituto de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

RAFAEL ALMANZA SALGADO

FIRMA

Dedicado a: Trini , José y Refugia, mis padres
Paty, Pepe, Adela, Celso, Alejandro, Rogelia, Lola, Silvio, mis hermanos.
Nancy, mi amor
Monse, mi nieta
Alejandra, Alberto, Yessi, Pili , Israel, mi familia.

Rigo. D. Suriano

AGRADECIMIENTOS

Agradecer para mí es la dicha que tiene el ser humano de demostrar la gratitud, y también expresar la felicidad que siente.

De ante mano quiero decir que soy muy dichoso por la cantidad de personas que en mi vida han cruzado y muchas de ellas se han quedado para caminar a mi lado.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, lugar donde he tenido momentos buenos y momentos excelentes, que me han hecho madurar profesional y humanamente. Institución que simplemente me ha dado gran parte de lo que soy y tengo.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico durante mis estudios, que me fortalecieron en la lucha diaria que tengo al estar inmersos en esta sociedad.

Agradezco al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por el apoyo en la instrumentación para las pruebas realizadas en la Planta Solar.

Agradezco al Dr. Rafael Almanza Salgado, mi tutor, por su apoyo incondicional que ha mostrado siempre, por la paciencia que tiene, por sus comentarios técnicos y personales, sin lugar a dudas es un hombre con un amplio criterio que a pesar de las adversidades siempre confió en mí, guardándome un lugar entre sus becarios.

Agradezco al Dr. David Morillon Gálvez, amigo y líder, que ha estado a un lado apoyando y guiándome. He aprendido mucho de los buenos ejemplos que me ha mostrado.

Agradezco a la Dr. Azucena Escobedo Izquierdo, que me ayudo en la revisión de mi tesis aportando aspectos muy importantes con sus comentarios, y es un ejemplo de que existen personas que no solo son amables con quienes conocen, sino que también con los que apenas empiezan a conocer.

Agradezco al Dr. Iván Galileo Martínez Cienfuegos, amigo desde hace ya unos años, por apoyarme en mi tesis con comentarios técnicos que me han dado la confianza para culminar con mis estudios, además de ser un hombre digno de mis respetos y admiraciones como investigador y como ser humano.

Agradezco al Dr. Arturo Palacio Pérez por su apoyo en la elaboración de mi tesis, quien depositó su confianza en mi forma de ser y de trabajar.

Agradezco la paciencia que algunas personas voluntaria e involuntariamente tuvieron a lo largo de toda la etapa de elaboración de mi tesis.

Agradezco afectuosamente la colaboración mi amigo Ceferino Figueroa Hernández por ser mi colaborador y me ha enseñado muchas cosas técnicas, y que sin su ayuda no se hubiera podido terminar el sistema donde se llevó a cabo la investigación.

Agradezco a David Eduardo Ascencio San Pedro quien es mi amigo, mi otro hermano desde hace mucho tiempo y me ha ayudado con comentarios que han enriquecido mi forma plantear y delimitar mi investigación, y a quien le digo “Si se pudo chanfle”.

Agradezco a Nancy Guadiana Cortes, por estar y saber soportarme.

En memoria de mi papá Salome Suriano Domínguez[†], de mi abuela y abuelo Leocadia Linares[†] y Maximiliano Domínguez[†].

Contenido

INDICE DE FIGURAS.....	7
INDICE DE TABLAS	11
NOMENCLATURA.....	12
<i>INTRODUCCIÓN</i>	16
1.- CAPITULO I. EL AGUA EN EL MUNDO.....	21
1.1 <i>ALGUNAS CIFRAS SOBRE EL AGUA</i>	21
1.1.1 La contaminación del agua	21
a) Tipos de contaminación del agua.....	22
b) Tipos de agua en función del origen de su contaminación.....	22
c) Otros contaminantes del agua	23
1.1.2 Tratamientos de agua	24
a) Tratamientos térmicos.....	25
b) Tratamientos de agua con UV	25
c) Fotocatálisis solar	26
1.2 <i>RECURSO Y TÉCNICAS DE CAPTACIÓN DE LA ENERGIA SOLAR</i>	28
1.2.1 Radiación Solar.....	29
1.2.2 Distribución del recurso solar en la República Mexicana.....	32
1.3 <i>DISPOSITIVOS PARA CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR</i>	35
1.3.1 Colectores planos de radiación solar	36
1.3.2 Concentración solar	37
1.3.3 Concentrador de canal Parabólico simple (CCPS).....	38
1.3.4 Concentrador de canal parabólico compuesto (CPC).....	41
1.3.5 Concentradores concéntricos	42
1.4 <i>REACTORES PARA FOTOCATÁLISIS SOLAR</i>	44

1.4.1	Funcionamiento de un reactor para fotocátalisis solar	48
a)	Iluminación en el reactor para fotocátalisis solar.	48
b)	Concentración del catalizador en el reactor para Fotocatálisis Solar.	49
c)	Tiempo de residencia	50
d)	El catalizador en la reacción.	50
e)	Selección de materiales para la construcción de un reactor para fotocátalisis solar.	
	51	
CAPITULO II. ANÁLISIS DEL PROBLEMA Y PLANTEAMIENTO DE SOLUCION.		54
2.1	ANÁLISIS TEÓRICO	55
2.1.1	Perfiles de temperaturas sobre las superficies del tubo de vidrio tipo borosilicato.	56
2.1.2	Método de diferencias finitas	58
2.1.3	Dinámica de fluidos en medio poroso.....	63
2.1.4	Coeficiente de convección del fluido de trabajo, a través de un medio poroso.	65
2.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL	68
2.2.1	Descripción del sistema de experimentación y del equipo utilizado.....	68
2.2.2	Condiciones de trabajo	78
2.2.3	Metodología de pruebas	79
2.2.4	Pruebas realizadas.....	80
2.2.5	Adquisición de datos	81
CAPITULO III. RESULTADOS		85
3.1	Propiedades de los fluidos y materiales utilizados en las pruebas.....	85
3.2	Coeficiente de convección térmica, dentro y fuera del tubo de vidrio tipo Borosilicato.	91
3.3	Análisis para un caudal de 2 L/min.....	100
3.4	Análisis para un caudal de 2.5 L/min	104
3.5	Análisis para un caudal de 3 L/min.....	109

3.6 Análisis para un caudal de 4 L/min.....	113
CAPITULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	117
4.1 Parte Teórica.	118
4.2 Parte Experimental.	119
4.3 Conclusiones	119
4.4 Recomendaciones.	122
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
MESOGRAFÍA.....	126

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema del proceso de fotocátalisis solar con recirculación.....	29
Figura 1.2. Espectro solar, en su trayectoria a la superficie terrestre.....	33
Figura 1.3 Posición relativa del Sol, y una superficie receptora.....	34
Figura 1.4 Distribución de fuentes energéticas en el país. Fuente: Sistema de información energética, SENER.....	35
Figura 1.5 Fotografía de un Colector Solar ubicado en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM	39
Figura 1.6 Foto de Concentrador de canal parabólico simple, ubicado en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM.....	42
Figura 1.7 Fotografía de Concentrador de canal parabólico compuesto, utilizado para proceso de fotocátalisis solar, en la planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM	44
Figura 1.8. Concentrador Solar puntual.....	45
Figura 1.9 Reactor para fotocátalisis solar, con recirculación.....	48
Figura 1.10.Fotografía de Concentrador parabólico simple, acondicionado para fotocátalisis Solar. Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM.....	49
Figura.2.1 Volumen de control $dr.r d\phi dz$, para el análisis de conducción en coordenadas cilíndricas (r,ϕ, z)	58
Figura 2.2. Red nodal propuesta para el experimento.	61
Figura 2.3. Vista transversal del tubo de vidrio tipo borosilicato con radiación solar concentrada incidiendo en la parte inferior.	62
Figura 2.4 Concentrador parabólico simple.....	71
Figura 2.5. Diagrama del experimento	72
Figura 2.6 Fotografía de la bomba utilizada para la recirculación	74
Figura 2.7 Regular de la frecuencia de giro en la bomba, ubicado en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM.....	75
Figura 2.8 Fotografía del Medidor de flujo a la entrada del lecho poroso.....	76

Figura 2.9 Fotografía de Transductor de presión a la entrada y a la salida del medio poroso.....	77
Figura 2.10. Sensor de temperatura LM35AH.....	77
Figura 2.11 Tarjeta de adquisición de datos.....	78
Figura 2.12 Estación meteorológica en la Planta Solar, Instituto de Ingeniería. UNAM.....	79
Figura 2.13 Fotografía del tinaco, utilizado como contenedor del fluido de trabajo en la recirculación.....	80
Figura 2.14 pantalla de inicio del programa para la adquisición de datos.....	84
Figura 2.15 Vista transversal del tubo, de la distribución de los sensores de temperatura.....	85
Figura 2.16 Tiempo transcurrido entre cada muestra.....	85
Figura 2.17 Número de muestra.....	86
Figura 3.1 Gráfica de la caída de presión en los diferentes caudales, utilizados.....	90
Figura 3.2 Gráfica del factor de fricción Darcy, para cada uno de los flujos utilizados.....	91
Figura 3.3. Gráfica del comportamiento del número de Reynold en relación con el caudal usado.....	91
Figura 3.4. Gráfica del comportamiento del factor de fricción, en relación al número de Reynold.....	92
Figura 3.5. Gráfica de las temperaturas experimentales de entrada y de salida, del medio poroso.....	95
Figura 3.6 Gráfica de Temperatura de salida experimental y teórica con la propuesta de $h_f = 4526 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para un caudal de 2 L/ min.....	96
Figura 3.7 Gráfica de Temperatura de salida experimental y teórica con la propuesta de $h_a = 3000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para un caudal de 2.5 L/ min.....	96
Figura 3.8 Gráfica de Temperatura de salida experimental y teórica con la propuesta de $h_a = 1100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para un caudal de 3 L/ min.....	97
Figura 3.9 Gráfica de Temperatura de salida experimental y teórica con la propuesta de $h_a = 767 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para un caudal de 4 L/ min.....	97

Figura 3.10 Gráfica del coeficiente de convección térmica en relación con el caudal utilizado.....	98
Figura 3.11 Gráfica de Caudal Vs el numero de Nusselt.....	100
Figura 3.12 Gráfica del perfil de temperaturas experimental, para un caudal de 2L/ min.....	102
Figura 3.13 Grafica Ditrribución teórica del perfil de temperaturas en la superficie exterior del tubo de vidrio tipo borosilicato, con un caudal de 2L/ min.....	103
Figura 3.14 Gráfica de la ditribución teórica del perfil de temperaturas en la superficie interior , con un caudal de 2L/ min.....	103
Figura 3.15 Gráfica de la distribución de temperatura teóricas, y experimentales, con 2L/ min.....	104
Figura 3.16 Diferencia de temperatura entre los nodos externo e internos.....	105
Figura 3.17. Gráfica de dilatación térmica del tubo de vidrio tipo borosilicato, con las temperaturas de la superficie exterior, para un caudal de 2 L/ min.....	106
Figura 3.18 Gráfica de distribución experimental del perfil de temperaturas, para nodos externos, con un caudal de 2.5 L/ min.....	107
Figura 3.19 Gráfica del perfil de temperaturas teórico en la superficie exterior, para un caudal de 2.5 L/ min.....	108
Figura 3.20. Gráfica del perfil de temperaturas teórico en la superficie interna, para un caudal de 2.5 L/ min	108
Figura 3.21 Gráfica de la comparación de temperaturas, modelo teórico y modelo experimental.....	109
Figura 3.22 Gráfica de la diferencia teórica de temperaturas entre los nodos de las superficies.. externa e interna.....	110
Figura 3.23, Gráfica de la dilatación térmica que presentó el tubo de vidrio tipo borosilicato a la mayor temperatura alcanzada.....	110
Figura 3.24 Gráfica del perfil de temperatura teórico en los nodos exteriores, para un caudal de 3 L/ min	111
Figura 3.25 Gráfica del perfil de temperatura teórico en la superficie exterior del tubo de vidrio.....	112

Figura 3.26. Gráfica del perfil de temperatura teórico en la superficie interior.....	112
Figura 3.27 Gráfica de la Comparación del perfil de temperatura teórico y el perfil de temperatura experimental en la superficie exterior, para un caudal de 3 L/ min.....	113
Figura 3.28 Gráfica de la diferencia de temperatura de superficie interna y superficie externa.....	113
Figura 3.29. Gráfica de dilatación térmica en las diferentes regiones del tubo de vidrio , tipo borosilicato.....	114
Figura 3.30 . Gráfica de perfil de temperatura experimental para 4 L/ min.....	115
Figura 3.31 Gráfica de perfil de temperatura teórico para la superficie exterior a 4 L/ min.....	115
Figura 3.32 Gráfica de perfil de temperatura teórico para la superficie interior a 4 L/ min.....	116
Figura 3.33 Gráfica de la comparación de perfil de temperatura teórico para la superficie exterior y perfil de temperatura experimental para la superficie exterior, a 4 L/min.....	116
Figura 3.34 Gráfica de diferencia de temperatura para los diferentes nodos a un caudal de 4 L/ min.....	117
Figura 3.35 Gráfica de la dilatación para el tubo de vidrio tipo borosilicato , a 4 L/ min.....	117
Figura 3.36. Gráfica de la diferencia de temperatura en los nodos, para los diferentes caudales utilizados.....	118

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Fuentes renovable de energía, Fuente: Balance Nacional de energía 2010. SENER.....	36
Tabla 1.2 Concentración Solar en diferentes concentradores Solares, considerando aplicaciones térmicas [6].....	38
Tabla 2.1 Especificación de los elementos del sistema.....	73
Tabla 2.2 . Características del variador de frecuencia.....	75
Tabla 2.3 Características de la tarjeta de adquisición de datos modelo USB-6216	78
Tabla 3.1 Propiedades del aire.....	85
Tabla 3.2 Propiedades del fluido utilizado.....	86
Tabla 3.3 Propiedades del vidrio tipo Boro silicato.....	87
Tabla 3.4 Temperaturas del fluido a la entrada y a la salida del medio poroso.....	92
Tabla 3.5 . Resultados numericos de la comparativa de la temperatura experimental a la salida del medio con la temperatura propuesta a la salida del medio.....	96
Tabla 3.6 . Propiedades y valores iniciales para el cálculo del perfil de temperaturas.....	99
Tabla 3.7 . Valores del coeficiente de conveccion térmica en el medio poroso, para los diferente caudales.....	99

NOMENCLATURA.

G_{on} -	Irradiancia terrestre, $[W/m^2]$.
G_{sw} -	Irradiancia extraterrestre, $[W/m^2]$.
C -	Concentración solar, [Adimensional]
I_c -	índice de concentración, [Adimensional]
A_c -	Área de captación, $[m^2]$
A_r -	Área concentrada, $[m^2]$
$.h_f$ -	Coefficiente de convección térmica del fluido de trabajo, $[W/m^2 \cdot K]$
$.r_1$ -	Radio interno [m]
$.r_2$ -	Radio externo, [m]
T_{mf} -	Temperatura media del fluido de trabajo, $[^\circ C]$
$.h_{aire}$ -	Coefficiente de convección térmica del aire $[W/m^2 \cdot K]$
$.N_u$ -	Número adimensional de Nusselt, [Adimensional]
P_r -	Número adimensional de Prantl, [Adimensional]
R_e -	Número adimensional de Reynold, [Adimensional]
K_a -	Coefficiente de conductividad térmica del aire, $[W/m^2 \cdot K]$
D_p -	Diámetro de partículas [m]
f_f -	Factor de fricción de Darcy, [Adimensional]
$.d$ -	Dilatación térmica del vidrio tipo borosilicato, [m].
$.g$ -	Gravedad $[m/s^2]$
L -	Litros
$.min$ -	Minutos

Símbolos Griegos.

- Δ - Diferencia
- μ Viscosidad dinámica [Ns/m^2]
- π Pi [Adimensional]
- Ψ Esfericidad [Adimensional]
- ρ Densidad [Kg/m^3]
- λ Longitud de onda
- ε Porosidad del medio

Subíndices

- f- Fluido
- a . – Aire

RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales con fotocátalisis solar, con un catalizador fijo adherido a la superficie de esferas de vidrio sódico-cálcico dentro de un tubo absorbedor de vidrio tipo borosilicato en un concentrador de canal parabólico simple, es un proceso complejo de analizar por los fenómenos térmicos presente, que van desde gradientes térmicos en el interior y exterior del tubo, hasta concentración térmica en el medio formado por las esferas de vidrio que contendrán el catalizador, afectando además la estructura física del tubo absorbedor de vidrio. En el presente trabajo se tiene por objetivo principal estudiar el comportamiento mecánico térmico de un tubo absorbedor de vidrio tipo boro silicato, en cuyo interior se ubica un medio formado por esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm de diámetro, a través del cual circula un flujo de trabajo con diferente intensidad, que puede ser de 2 L/ min, 2.5 L/ min, 3 L/ min o 4 L/ min, el tubo es irradiado en su parte inferior por radiación solar como fuente de energía, cabe mencionar, que el sistema esta libre de fenómenos catalíticos, con la finalidad de ilustrar el comportamiento antes de las reacciones catalíticas y observar la resistencia del material propuesto para el tubo de vidrio tipo borosilicato. Planteado el tema, con un análisis teórico y otro experimental.

El comportamiento térmico teórico del tubo absorbedor se basa en la resolución de la ecuación de difusión térmica en dos dimensiones expresada en coordenadas cilíndricas, la cual se resolvió mediante el método de “análisis de elementos finitos”, y así tener una expresión de la temperatura en un punto de interés sobre la superficie interna o externa del tubo. Sin embargo, para la evaluación de esta última se requiere conocer el comportamiento del coeficiente de convección térmico del caudal del fluido de trabajo en el interior del tubo a través del medio poroso. Para obtenerlo se utilizó un método comparativo e iterativo llamado “*Single blow transient method*”, que relaciona valores experimentales y teóricos. Por otro lado, el perfil de temperaturas experimental sobre la superficie externa del tubo absorbedor se obtuvo con lecturas tomadas en sensores de temperaturas colocados en una trayectoria circular transversal a la longitud del tubo. Lo anterior involucra además; la diferencia de temperaturas y presión en dirección axial, caudal del fluido de trabajo, y ciertas condiciones de intensidad de la irradiancia solar constante.

Se obtuvieron resultados favorables con los caudales utilizados, ya que no se presentó ningún tipo de fractura derivada de gradientes térmicos internos o externos, presiones o movimientos bruscos, que pueden ser utilizados para conocer el funcionamiento de sistemas similares destinados para fotocátalisis pero desde el punto de vista térmico y hacer mejoras geométricas o de configuración del catalizador, sin perder de vista la resistencia de los materiales utilizados.

INTRODUCCIÓN

La escasez actual de agua y el alto índice de contaminación de la misma, derivada de procesos industriales, agrícolas, actividades humanas y una mala distribución en los distintos sectores de uso, han despertado el interés en todo el mundo para la búsqueda de soluciones. Enfocados especialmente en el aspecto de la contaminación, se han propuesto distintos tratamientos para descontaminar y desintoxicar agua.

Uno de los tratamientos de mayor interés para la desintoxicación de agua se conoce como "Fotocatálisis", que forma parte de las tecnologías de oxidación avanzada. Este tratamiento basa su funcionamiento en la irradiación de un catalizador o un sustrato con energía capaz de excitar sus electrones, dejando libre un "hueco" en donde puede ser "alojado" el contaminante, encontrando que la longitud de onda adecuada para el uso de este experimento es la encontrada en la luz ultravioleta. Inicialmente los estudios fueron realizados con fuentes energéticas artificiales (lámparas de UV) mostrando amplias posibilidades de mejoramiento en la eficiencia del proceso, sin embargo el suministro de energía con lámparas de UV genera indirectamente contaminación ambiental, ya que utiliza energía eléctrica, esto aunado a que es un dispositivo costoso. Por esta razón, se ha buscado una fuente alternativa que sea capaz de hacer reaccionar al semiconductor y que no contribuya a la contaminación ambiental, además, que el costo de operación sea menor, llegando a la conclusión de que se puede utilizar energía solar modificando las tecnologías ya existentes para la captación de energía solar, lo que lleva a un cambio de escala y de intensidad de energía en relación con los experimentos hechos a nivel laboratorio.

Por otro lado, el catalizador puede estar disuelto o no en el agua que contiene los contaminantes a tratar, si el catalizador se encuentra disuelto en el agua el fenómeno a generarse tiene el nombre de Fotocatálisis homogénea de lo contrario se le llama Fotocatálisis Heterogénea. En ambos casos se tiene el problema de la recuperación del catalizador que no sufrió cambios significativos después del fenómeno de oxidación – reducción.

Para mejorar la reacción ya sea homogénea o heterogénea se han propuesto algunas alternativas, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- Variar la cantidad del catalizador, con respecto al nivel de agua a tratar.
- Aumento de la incidencia de energía sobre la superficie del catalizador.
- Variar el tiempo de exposición a la incidencia de energía.

Para la fotocatalisis heterogénea, intentando aumentar el aprovechamiento del catalizador se ha propuesto que éste se encuentre sujeto o adherido a alguna superficie anillada o esférica, sin embargo, se han generado dificultades para una buena eficiencia de todo el sistema, ya que el funcionamiento depende de muchas variables.

Por otro lado, y debido al interés del aprovechamiento del recurso solar para fines de fotocatalisis, se deben hacer mejoras a las tecnologías convencionales utilizadas para aplicaciones térmicas, cambiando principalmente en los concentradores, el tubo absorbedor de metal por uno que sea permeable a la parte del espectro solar de interés y que cumpla con las características específicas, entre las que destacan: buena permeabilidad en la longitud de onda energética necesaria para activar al semiconductor (la longitud de onda de la UV, 290 -360 nm) [11], resistencia a los fenómenos térmicos y resistencia a los esfuerzos derivados de fenómenos gravitacionales, estas características se han encontrado en algunos materiales amorfos vítreos(Por ejemplo el borosilicato), y algunos polímeros.

Los dispositivos o concentradores de energía solar más utilizados para los fines de fotocatalisis solar, son los concentradores canales parabólicos compuestos, sin embargo estos dispositivos están limitados a cierta cantidad e intensidad de concentración solar y de volumen de agua a tratar. Por esta razón se estudia el uso de dispositivos con mayor concentración solar, como los concentradores de canal parabólico simple, con la finalidad de observar los beneficios de tener mayor densidad energética concentrada en las reacciones fotocatalíticas y de observar el comportamiento de otros parámetros, como el tiempo, la concentración, el volumen de agua a tratar, etc.

La propuesta de experimentación para los fines de esta tesis, consiste en utilizar una sección de 3 m de un módulo de concentración con concentradores de canal parabólico simple(acoplamiento de concentradores), ubicado en la planta solar del instituto de ingeniería, UNAM., y acondicionarlo para fines de tratamientos de agua, cambiando el tubo absorbedor metálico de 1 in, utilizado normalmente para la generación de vapor, por uno de vidrio tipo borosilicato del mismo diámetro, ya que es permeable a la longitud de onda requerida para el proceso (290 a 360 nm, aprox.) y con un empaquetamiento de esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm de diámetro en su interior, aludiendo a una posible adherencia de un semiconductor sobre la superficie de las mismas. Sin embargo, el experimento no contará con reacciones catalíticas, y únicamente el sistema estará sometido a los fenómenos naturales, mecánicos del fluido y a afectos térmicos de conducción y convección originados por la fuente de energía natural (El Sol).

Uno de los posibles problemas a descartar es la existencia de intensos gradientes de temperatura en el interior del tubo, capaces de generar ruptura, ya que en estudios anteriores realizados en concentradores de canal parabólico simple pero con tubos absorbedores metálicos se han encontrado gradientes de temperaturas internos que doblan los tubos [5], cabe mencionar que en dichos experimentos alcanzan a generar flujos en dos fases y que en este experimento no se llega a tanta concentración de energía, sin embargo no descartar que el acoplamiento de esferas en el interior, la cantidad del caudal utilizado y la forma de suministrar energía, aunado al tipo de material utilizado y espesor del tubo podrían causar algún gradiente térmico considerable.

A continuación, se mencionan los cuatro capítulos que conforman esta investigación para tesis de maestría, con una breve descripción de cada uno de ellos.

El capítulo I, trata la situación del recurso de agua principalmente en México, así como la situación de la contaminación del agua que existe en la actualidad, explicando los diferentes tratamientos de aguas residuales que existen, profundizando en el tratamiento terciario llamado “Fotocatálisis” y se explica que este tratamiento puede utilizar energía solar para su funcionamiento recibiendo el nombre de “Fotocatálisis solar”. Por esa razón el capítulo también contiene conceptos básicos y definiciones para la comprensión del estudio de la energía solar y muestra un panorama del recurso solar en México, explicando el funcionamiento de los sistemas de captación de energía solar, y las aplicaciones que tienen en la Sociedad Mexicana.

En este mismo capítulo se describe que algunos de los “*dispositivos o concentradores de energía solar*” convencionales pueden ser modificados para tratamientos de aguas residuales, llamándose reactores.

Explicando también los parámetros geométricos para el diseño de un reactor para fotocátalisis solar.

Finalmente, se mencionan las consideraciones para el diseño de reactores para fotocátalisis, utilizando un concentrador de canal parabólico simple, y el porqué es importante conocer las condiciones mecánico térmico del tubo absorbedor de vidrio tipo borosilicato con un medio poroso en su interior.

El capítulo II se divide en dos partes; la primera es sobre el planteamiento teórico del comportamiento mecánico térmico del tubo absorbedor, la cual se compone de un análisis interno y un análisis externo. La parte del análisis en el interior del tubo contiene la resolución de la ecuación de difusión mediante el método de “*análisis de elemento finito*” y el método utilizado para el cálculo del coeficiente de convección

térmica en el interior del tubo planteado como el estudio en un medio poroso, el cual se llama “*Single blow transient method*”, y se incluye también, el análisis de mecánica del fluido en donde se estudia la caída de presión, coeficiente de fricción a través del medio poroso y el número adimensional de Reynold. Lo que concierne a la teoría sobre la situación externa del tubo, se incluye el cálculo del coeficiente de convección del tubo hacia el ambiente, utilizando métodos de orígenes empíricos pero validados para el uso de este trabajo. En general esta primera parte del capítulo, contiene los conocimientos necesarios para comprender los fenómenos térmicos, mecánicos y de la dinámica del fluido ocurridos en las superficies del tubo de vidrio tipo borosilicato.

La segunda parte de este capítulo, contiene la explicación del sistema de prueba utilizado en el experimento propuesto, en donde se explican todos los elementos que forman el sistema, cómo se conforma el medio poroso, los equipos utilizados para las mediciones y los pasos a seguir en cada una de las pruebas realizadas, así como la técnica de adquisición de datos y muy importante las consideraciones hechas para la puesta en marcha del sistema para la toma de datos.

El Capítulo III presenta los resultados obtenidos durante las pruebas, entre los que destacan:

- Número adimensional de Reynold con los diferentes caudales utilizados.
- Coeficiente convectivo del flujo del fluido en el interior del tubo para los diferentes caudales propuestos.
- Coeficiente convectivo en la superficie exterior del tubo.
- Energía almacenada en el material del tubo durante el proceso y para diferentes caudales utilizados.
- Los perfiles de temperaturas en las superficies interna y externa del tubo para cada uno de los caudales utilizados, observando los cambios en cada uno.

Es en este capítulo, se muestra gráficamente el comportamiento de la expansión que tendría el borosilicato a la máxima temperatura alcanzada con los diferentes caudales utilizados.

El capítulo IV, presenta las conclusiones de los experimentos mostrando los resultados que se obtuvieron y de las recomendaciones para el uso de sistemas similares en aplicaciones fotocatalíticas.

Este trabajo es parte de la información necesaria para el conocimiento de los fenómenos térmicos y mecánicos ocurridos al cambiar un tubo absorbedor metálico por uno de vidrio tipo borosilicato, ya que da un panorama de los fenómenos térmicos presentes que pueden ayudar o no, al fenómeno, y contribuirán también en la decisión de las dimensiones del tubo. Debido a que los gradientes de temperatura son importantes tanto en la parte interna como en la superficie externa del tubo, cabe destacar la importancia de la concentración de temperatura en el medio formado por las esferas en este experimento en específico.

1.- CAPITULO I. EL AGUA EN EL MUNDO

“Un compuesto esencial para vida, el mismo que abunda y a la vez escasea debido a causas naturales y por actividades humanas, limitando las cantidades reales utilizables para el consumo del hombre”.

1.1 ALGUNAS CIFRAS SOBRE EL AGUA

El agua es vital para la vida y a pesar de ser un compuesto abundante en el planeta, solo el 2.5% es agua dulce y el 97.5% es agua salada. Dos terceras partes del agua dulce total, se encuentra en forma de glaciares y nieves perpetuas. Así mismo, el ciclo hidrológico renueva los recursos mundiales de agua dulce por medio de la evaporación y la precipitación.

La pluviosidad mundial anual sobre la superficie terrestre es de 110,000 km³, pero alrededor de 70,000 km³ se evaporan antes de llegar al mar. Los restantes 40,000 km³ están potencialmente disponibles para su aprovechamiento humano. El consumo mundial de agua dulce se cifra actualmente en 4,000 km³, o sea, tan sólo el 10% del suministro renovable anual.[1]

Podemos pensar que la disponibilidad de agua para el consumo humano es abundante pero, un examen más detenido revela una situación complicada. Los 40,000 km³ de agua disponible, están distribuidos de manera muy desigual, y las dos terceras partes de ellos se pierden en inundaciones. Esto deja un saldo de unos 14,000 km³ como suministro relativamente estable, y de esta cantidad disponible, una buena parte ha de ser dejada seguir su curso natural a fin de salvaguardar los pantanos, los lagos y los ríos.

1.1.1 La contaminación del agua

Aunado a la poca disponibilidad de agua para el consumo del ser humano, la cantidad de agua utilizable en el mundo cada vez es menor, debido a muchas causas como la mala distribución; sin embargo, la causa principal recae en la contaminación que se ejerce sobre ella, derivada de diferentes procesos humanos, agrícolas, e industriales.

a) Tipos de contaminación del agua

La contaminación del agua puede ser producida por:

- **Compuestos minerales:** pueden ser sustancias tóxicas como los metales pesados (plomo, mercurio, etc.), nitratos, nitritos. Algunos elementos afectan a las propiedades organolépticas (olor, color y sabor) del agua, como el cobre, el hierro, etc. Otros producen el desarrollo de las algas y la eutrofización (disminución de la cantidad de O₂ disuelto en el agua), como el fósforo.
- **Compuestos orgánicos:** (fenoles, hidrocarburos, detergentes, etc.), producen también eutrofización del agua ya que permiten el desarrollo de los organismos vivos y éstos consumen O₂.
- **Microbiológica:** se produce principalmente por la presencia de fenoles, bacterias, virus, protozoos o algas unicelulares.
- **Térmica:** provoca una disminución de la Solubilidad del oxígeno en el agua.

b) Tipos de agua en función del origen de su contaminación

El agua contaminada a su vez se clasifica, dependiendo del origen y el tipo de contaminante que presenta:

- **Aguas residuales urbanas,** entre las que se encuentran aguas fecales, aguas de fregado o agua de cocina. Los principales contaminantes de éstas son la materia orgánica y microorganismos. Estas aguas suelen verterse a ríos o al mar tras una pequeña depuración.
- **Aguas residuales industriales:** contienen casi todos los tipos de contaminantes (minerales, orgánicos, térmicos por las aguas de refrigeración). Éstas se vierten a ríos o mares tras una depuración parcial.
- **Aguas residuales ganaderas:** el tipo de contaminantes que presenta es materia orgánica y microorganismos. Pueden contaminar pozos y aguas subterráneas cercanas.
- **Aguas residuales agrícolas:** los contaminantes que contienen son materia orgánica (fertilizantes, pesticidas). Pueden contaminar aguas subterráneas, ríos, mares, embalses, etc.

- Mareas negras. La causa de éstas es el vertido de petróleo debido a pérdidas directas de hidrocarburos (solo un 9%), siendo las fuentes de contaminación marina por petróleo las más importantes.

c) Otros contaminantes del agua

Otros problemas importantes que también contribuyen a la contaminación del agua son la deforestación, la eutrofización, las partículas en suspensión y la salinidad.

- La deforestación. Cuando el suelo es despojado de la cubierta vegetal que lo protege, queda expuesto a la erosión, ésta a su vez, da lugar a un aumento de la turbidez del agua, a causa de la mayor cantidad de materia en suspensión, a la lixiviación de nutrientes y a una merma de la capacidad de retención de agua del suelo.
- La Eutrofización. Es el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, especialmente fósforo y nitrógeno. Puede dar lugar a un mayor crecimiento vegetal y a la reducción de los niveles de oxígeno a medida que ese material vegetal se descompone. Hoy día, entre el 30 y el 40 por ciento de los lagos y embalses del mundo son eutróficos. Las leyes y medidas adoptadas para reducir los tripolifosfatos (utilizados sobre todo en los detergentes) y para eliminar el fósforo de las aguas residuales han tenido efectos positivos.
- Las partículas en suspensión. Son materiales que flotan en el agua y proceden de tres fuentes principales: la erosión natural del suelo, la materia que se forma orgánicamente dentro de la masa de agua y los materiales producidos como consecuencia de la actividad humana. Las partículas en suspensión se asientan en el lecho de sedimentación y forman depósitos en ríos, lagos, deltas y estuarios. La construcción de represas reduce la cantidad de partículas en suspensión que fluye por los ríos hasta los océanos, porque los embalses actúan como depósitos, para tales partículas.
- La salinidad. Es una forma importante y generalizada de contaminación del agua dulce, sobre todo en zonas áridas y semiáridas y en algunas regiones costeras. La causa principal de la salinización es el efecto combinado de un drenaje insuficiente y altas tasas de evaporación, que elevan la concentración de sales en las tierras regadas.

El actual nivel de contaminación de las aguas justifica la adopción de medidas para evitar que los recursos hídricos se sigan deteriorando. Se requieren medidas más

severas en la ordenación de los recursos hídricos, el tratamiento de las aguas residuales y el abastecimiento público de agua salubre. Tanto los países en desarrollo como los desarrollados deberían controlar y reglamentar el tratamiento y reciclaje de los efluentes industriales, y desplegar esfuerzos para sustituir los productos dañinos y prohibir los plaguicidas peligrosos.

1.1.2 Tratamientos de agua

El tipo e intensidad de contaminación que presenta el agua permite utilizar diferentes tratamientos para la eliminación de agentes contaminantes, y se clasifican dependiendo del nivel de eliminación de agentes, en tratamientos primarios, secundarios y terciarios.

En los *tratamientos primarios* se intenta la disminución de los sólidos ajenos a la composición natural del agua, para tener una mejor aplicación de los tratamientos secundarios. Los más conocidos son: la sedimentación, el cribado, la flotación y la neutralización, y la homogeneización.

Los *tratamientos secundarios* son procesos biológicos y los más utilizados son: tratamiento de lodos activados, subdividido a su vez en aireación prolongada, contacto estabilización, aireación escalonada, procesos de lodos activos por mezcla completa y aireación con oxígeno puro.

Finalmente los *tratamientos terciarios* son procesos que tienen como objetivo, mejorar la calidad del agua derivada de tratamientos secundarios, entre los cuales se conocen: separación de sólidos en suspensión, adsorción en carbón activo, intercambio iónico, osmosis inversa, electrolisis, oxidación avanzada (reacciones catalíticas, y tratamientos con UV) y el método de eliminación de nutrientes, entre otros.

Existen tratamientos terciarios de carácter térmico, los cuales consisten en elevar la temperatura del agua hasta llegar a la ebullición, o bien a una temperatura que sea capaz de eliminar los agentes contaminantes en el agua, en ambos casos la temperatura alcanzada se mantiene durante un tiempo considerable.

Así mismo los procesos de oxidación avanzada (Advanced Oxidation Processes AOP), contribuyen con los tratamientos terciarios, las cuales se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes.

Estos dos últimos tratamientos son los de mayor interés, ya que para su funcionamiento pueden utilizar como fuente energética la radiación proveniente del Sol, con lo cual se está evitando gastos monetarios y afectaciones al medio ambiente. Por dicha razón los tratamientos térmicos que utilizan energía solar y las tecnologías de oxidación avanzada con fuente energético del Sol, se explican a detalle en los siguientes párrafos:

a) Tratamientos térmicos

Estos tratamientos se basan principalmente en el aumento de la temperatura del agua durante un considerable tiempo para eliminar contaminantes presentes en la misma. Entre ellos se encuentran: la pasteurización y ebullición del agua, el primero consiste en elevar la temperatura del agua a un poco menos de su punto de ebullición y mantener ese estado térmico durante tiempo considerable, mismo que dependerá del volumen y de las condiciones del agua, sin embargo se ha estimado un promedio, el cual consiste en elevar la temperatura del agua a aproximadamente 75°C durante aproximadamente 10 min [Feachem R.E,1983]. Es un tratamiento económico y funcional, pero aún no es tan eficiente en la eliminación de agentes ajenos al agua, sin embargo muy accesible para la aplicación en zonas rurales de difícil acceso a otras tecnologías.

En las últimas décadas el tratamiento de pasteurización se ha estudiado, utilizando energía solar, ayudados de colectores solares, teniendo muy buenos resultados, ya que en estos dispositivos se pueden concentrar temperaturas para el agua de entre 70 y 80 °C [Almanza y Muñoz, 1994].

Otro de los tratamientos térmicos conocidos es la **ebullición del agua**; En el cual se eleva la temperatura del agua hasta el punto de ebullición, manteniendo este estado durante cierto tiempo (depende del volumen de agua a tratar y de la calidad de la misma), para eliminar los agentes ajenos. Es un método barato y de fácil aplicación también para zonas con pocos recursos, además de poder usar la energía solar como fuente energética, los principales dispositivos solares utilizados para este tratamiento son los concentradores solares.

b) Tratamientos de agua con UV.

Estos tratamientos funcionan con solo la parte del espectro solar que se encuentra en la longitud de onda UV. Entre estos métodos encontramos uno muy utilizado en zonas rurales y que ha mostrado ser de fácil aplicación y eficiente en la eliminación

de agentes patógenos encontrados en el agua, el proceso de desinfección de agua se llama “SODIS” (por sus siglas en inglés), que consiste en un proceso ideal para desinfectar agua en el hogar y en zonas rurales y que se eliminan agentes que causan enfermedades hídricas y hasta la muerte en algunos casos. Sin embargo, es un proceso con algunas deficiencias, entre las que podemos encontrar un desaprovechamiento de la energía neta que llega al sistema de experimentación ocasionado por los materiales utilizados, que son principalmente materiales polímeros como el PET, hasta el vidrio comercial. Además, el tiempo en que se lleva a cabo el proceso es largo, aproximadamente 6 horas, al agua a tratar debe de tener poca turbiedad de entre 30 y 40 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbiedad) [27].

Además de las limitaciones ya mencionadas el tratamiento presenta otras, entre las que se pueden citar se tienen:

- No altera la calidad química del agua
- No incrementa ni reduce la cantidad del agua
- No se presta para grandes volúmenes de agua

En general es un tratamiento de intensidad leve, para desinfectar agua, ya que existen muchos agentes patógenos que toxican el agua y que no pueden ser eliminados con este tratamiento, pero existe otro tratamiento dirigido especialmente a la desintoxicación del agua, con mayor intensidad destructiva, para con los agentes contaminante, este tratamiento es llamado “fotocatálisis” y se le añade el pronombre de “Solar”, cuando este tratamiento utiliza también la energía solar para su funcionamiento.

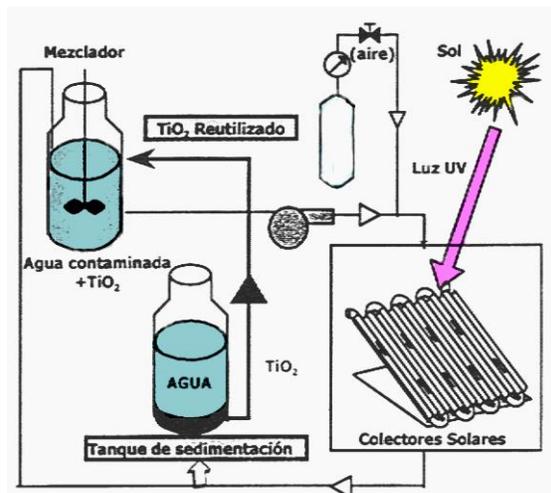
c) Fotocatálisis solar

La fotocatálisis es un tratamiento para desintoxicar el agua basado en los principios de oxidación avanzada, la cual produce una reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador o sustrato, este último es un semiconductor que acelera la velocidad de reacción, entre los catalizadores con mejores resultados en las reacciones se encuentra el Dióxido de Titanio (TiO_2) y el Óxido de Zinc (ZnO) así como otras sustancias como el Fenton (solución acuosa de Peróxido de Hidrogeno), sin embargo el primero (TiO_2), ha sido de mayor importancia por su gran estabilidad para con la reacción y además su bajo costo monetario.

El catalizador o semiconductor puede estar inmerso o no en la solución contaminada, si éste se encuentra inmerso se le llama a la reacción “Fotocatálisis Homogénea” y si no, se le llama “Fotocatálisis Heterogénea”.

La particularidad de este tratamiento, es que puede usar energía solar, se encuentra limitada por algunos factores que podrían afectar su desempeño, como son:

- Factores naturales: Energía requerida para el funcionamiento, ya que varía dependiendo de las condiciones meteorológicas del lugar y del momento en que se utilice el tratamiento.
- Factores de diseño: Un mal diseño en el reactor para fotocátalisis (dispositivo donde se lleva a cabo la reacción), ocasiona un mal aprovechamiento del recurso y por lo tanto un mal funcionamiento de la reacción foto catalítica.



- Factores de materiales: La selección de materiales para la construcción del reactor para fotocátalisis es esencial, en el aprovechamiento del recurso solar.

La eficiencia y el buen funcionamiento de la fotocátalisis solar dependen en buena parte del tipo de reactor que se utilice. Este último tiene que ser diseñado tomando en cuenta muchos aspectos, buscando el mejor aprovechamiento del proceso.

Figura 1.1 Esquema del proceso de fotocátalisis Solar con recirculación.

En la figura 1.1 se muestra un prototipo de un reactor para fotocátalisis solar, con depósito para el agua contaminada revuelta con el catalizador (TiO_2), y un circuito de recirculación, para que la mezcla pase por el concentrador solar genere la reacción fotocatalítica.

Como se verá más adelante, existen varios mecanismos de captación de la energía solar o tecnologías solares, diferenciándose unos de otros, en la cantidad de energía que concentrada, aspecto primordial para el tratamiento de agua, ya que

dependiendo de las condiciones del agua a tratar será el tipo de tecnología solar utilizada.

Además de los factores mencionados, se debe de considerar también el catalizador utilizado, el cual también se elige dependiendo del tipo de efluentes a tratar, y puede hacer variar la velocidad de reacción de un proceso en miles o millones de veces, por lo que suele ser muy interesante su utilización en procesos industriales (producción de ácido sulfúrico, amoníaco, etc).

La selección de un catalizador de acuerdo al o los contaminantes a tratar ya que este puede generar subproductos difíciles de eliminar. Un catalizador aumenta la velocidad de reacción o favorece una reacción frente a otra, pero en ningún caso determina el equilibrio o el punto final de la misma, que vendrán condicionados siempre por cuestiones termodinámicas.

Para utilizar un catalizador en una reacción determinada, se hace necesario llevar a cabo un número elevado de ensayos y pruebas, hasta dar con el más adecuado.

La actividad de un catalizador no sólo depende de su constitución química, sino también de su estructura física o cristalina, ya que el catalizador puede perder su actividad por encima de ciertas temperaturas. Por lo tanto, un estudio exhaustivo de un catalizador debe incluir una investigación de la superficie del mismo. Por ello se ha de procurar que los catalizadores tengan una gran superficie sólida activa por unidad de volumen. En presencia de un catalizador las moléculas reaccionantes sufren un debilitamiento de sus enlaces o forman productos intermedios en las proximidades de la superficie del sólido.

1.2 RECURSO Y TÉCNICAS DE CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR

El Sol y su energía son fundamentales para el desarrollo de la vida diaria. El Sol es una fuente que suministra energía calorífica y lumínica, siendo una fuente natural poderosa, esencial para la vida. De toda la energía emitida por el Sol, y debido a la distancia entre el Sol y la Tierra solo una parte llega a la superficie terrestre, que puede ser utilizada para diferentes aplicaciones.

La energía que llega a la superficie terrestre pasa por diferentes “filtros”, a su paso por la atmósfera que disminuyen la cantidad de energía neta aprovechable. Sería muy inexacto establecer una distribución exacta de la energía total que incide sobre la superficie de la tierra, ya que los efectos que la hacen variar son fortuitos, cambiantes, y dependen de la ubicación terrestre. Sin embargo, del total de la radiación que incide en la tierra aproximadamente el 20% es energía reflejada por las nubes, el 4% reflejada por el suelo, 6% energía reflejada por la atmósfera, 19%

es absorbida por las nubes y corrientes de aire, y el 51% es la energía que llega a la superficie terrestre. Tanto la distribución como flujo final neto de energía solar aprovechable varía de acuerdo con el lugar, fecha, estación, ubicación, nubosidad y contenido de polvo en la atmósfera [2].

La energía solar se ha aprovechado desde la antigüedad, desencadenando en las últimas décadas un gran interés por la optimización de dispositivos para la captación de la misma. La energía neta que llega a la superficie terrestre y que es utilizable en diferentes aplicaciones, nos llega a manera de radiación, la cual se puede cuantificar con cálculos y actualmente con ayuda de satélites.

Inicialmente, en la década de los 70's y 80's la radiación se cuantificaba en unidades de medición de langleyes por día (ly/día), pero esta unidad creó controversia y confusiones al momento de analizar las cifras. Es por esa razón que actualmente se utilizan unidades del sistema internacional para energía sobre área (J/m^2), o de potencia por unidad de área (W/m^2), dependiendo de nuestro interés, facilitando el análisis.

Uno de los trabajos pioneros destinados a cuantificar el recurso solar en la República Mexicana fue el realizado por Rafael Almanza Salgado en 1975 en el cual se presentan mapas de irradiación global solar en la República Mexicana elaborados a través de ecuaciones que relacionan fecha, hora, estación, ubicación, nubosidad y contenido de polvo en la atmósfera. La primera publicación fue en 1975 (Almanza y López, 1975), pero se han hecho mejoras en diferentes publicaciones, con una versión en el 2002 en donde ya se utilizan unidades del Sistema Internacional (W/m^2) y se hace una correlación con resultados obtenidos con ayuda de satélites y con los trabajos realizados, por ejemplo los de Renné (2000). Cabe mencionar que en los trabajos realizados al respecto se toman valores promedios de muestras tomadas a lo largo de cierto intervalo de años.

Más adelante, en este apartado se comentarán conceptos de radiación solar y algunos cálculos para cuantificar dicha energía, así como cálculos y consideraciones que se deben tener en la instalación de dispositivos que funcionen con energía solar.

1.2.1 Radiación Solar

El Sol produce energía en forma de radiación electromagnética, el origen de esta energía se encuentra en el interior del Sol, en donde tienen lugar reacciones de fusión, por la que cuatro átomos de hidrógeno dan lugar a dos átomos de Helio y la masa atómica sobrante se transforma en energía de acuerdo con la célebre fórmula

de Einstein $E = mc^2$. Como si el Sol fuera un reactor de fusión situado a aproximadamente 150 millones de kilómetros de la tierra. [3]

La energía recibida sobre una superficie perpendicular a la trayectoria del Sol desde la distancia promedio entre la tierra y el Sol, en la parte externa de la atmósfera, se le conoce como **Constante Solar**. Este valor ha sido investigado, asignándosele un valor aproximado de 1367 W/m^2 . Este valor puede ser cuestionable debido a que la radiación extraterrestre es variable, esta variación se debe a dos factores principales: el primero es la variación de la radiación emitida por el Sol, y el otro es la fecha en que se hace la medición. [3]

Para los principios de la ingeniería esta variación puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad \text{Ec.1.1}$$

En donde G_{on} es la radiación que incide a la superficie terrestre, “n” se refiere al día del año en el que se calcula el valor, y G_{sc} es la radiación extraterrestre promedio sobre una superficie normal a la trayectoria de la radiación solar en el día “n” del año. La radiación emitida por el Sol varía linealmente a la variación de la longitud de onda y aumenta también al aumentar la temperatura del cuerpo

La radiación útil que llega a la superficie terrestre, se clasifica en radiación directa y radiación difusa.

- Radiación Directa. Es la radiación que incide sobre una superficie después de haber cruzado la atmósfera, sin cambios en su dirección.
- Radiación Difusa. Es la radiación que incide sobre una superficie como producto de un cambio de dirección, a causa de haber chocado con partículas suspendidas en la atmósfera

La radiación solar se cuantifica dependiendo de nuestra conveniencia y se le puede dar el nombre de “**irradiancia**”, si lo que queremos medir es la potencia por unidad de área y se expresa en la unidad correspondiente del Sistema Internacional, vatio por metro cuadrado (W/m^2) o le podemos llamar “**irradiación**”, si lo que nos interesa es la medida de la energía por unidad de área que se expresa en las unidades correspondientes del Sistema Internacional de unidades, es decir, en Julios dividido por metro cuadrado (J/ m^2).

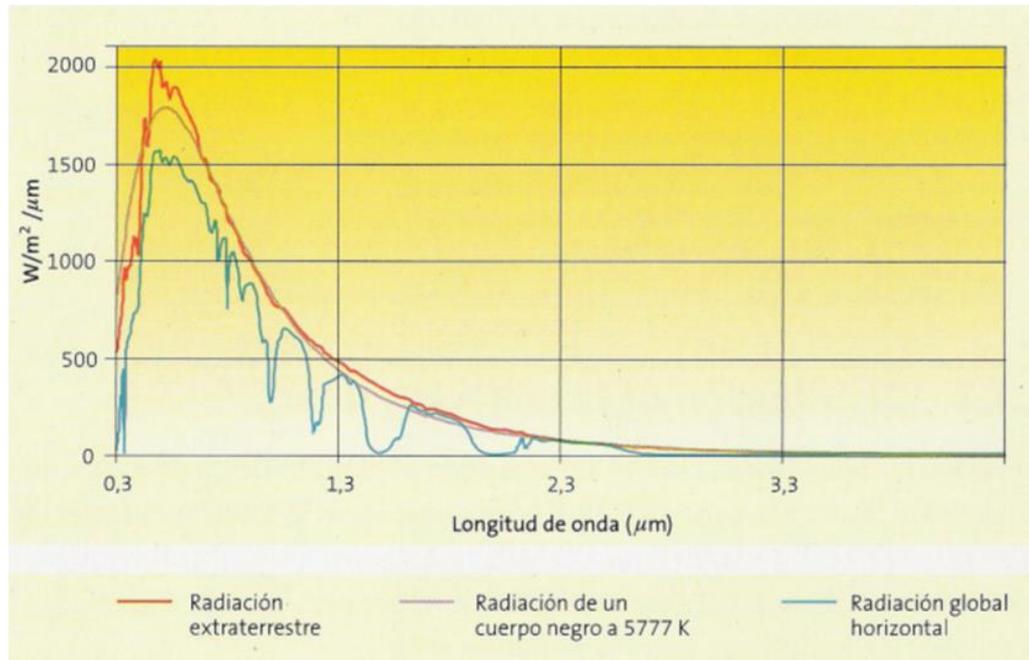


Figura 1.2. Espectro Solar, en su trayectoria a la superficie terrestre. Fuente: "Manual de radiación solar SODEAN, S.A, 2004".

En la figura 1.2., se puede observar el espectro solar antes de cruzar la atmósfera (espectro extraterrestre), el espectro de un cuerpo negro a la temperatura equivalente del Sol (5777K), y el espectro de la radiación solar en un lugar de la superficie terrestre (radiación global horizontal) una vez que ésta ha atravesado la atmósfera.

Los dispositivos que se utilizan para la medición de las diferentes componentes en la radiación solar global se conocen como **pirheliómetro y piranómetro**, los cuales miden la radiación directa y global respectivamente, este último dispositivo se puede modificar tapándolo con una banda para que no mida la componente de la radiación directa y únicamente medir la radiación difusa.

Un factor sumamente importante para la captación de energía solar es también la posición relativa de la superficie de captación respecto al Sol. La posición relativa del Sol con respecto a una superficie receptora, se establece en función de la posición solar en la esfera celeste y de la posición de la superficie sobre el plano del horizonte, la cual viene caracterizada por dos ángulos, como puede verse en la figura 1.3

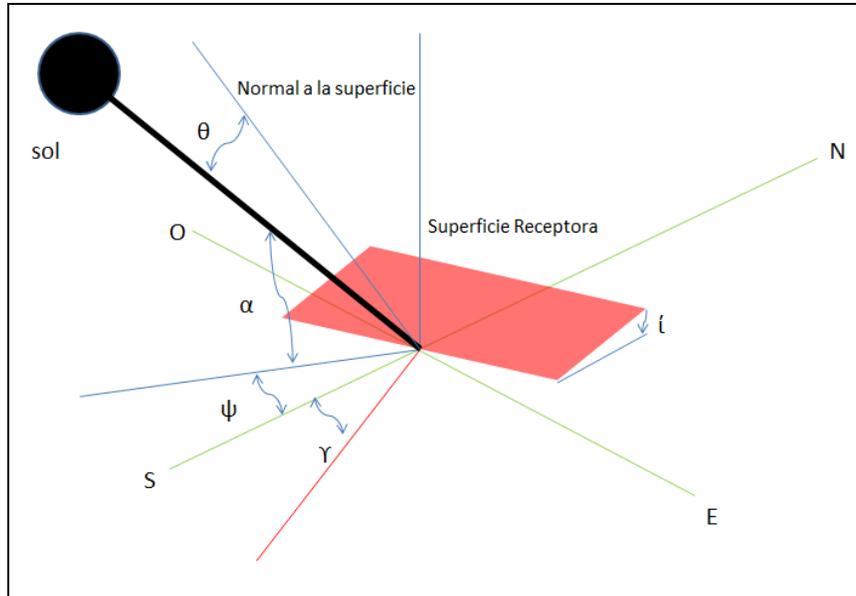


Figura 1.3 Posición relativa del Sol, y una superficie receptora.

- a) El ángulo azimutal (γ), también llamado de orientación, que forma la proyección de la normal a la superficie sobre el plano horizontal con el plano meridiano del lugar. Se cuenta a partir del punto cardinal Sur, de 0° a $\pm 180^\circ$, positivamente hacia el Oeste y negativamente hacia el Este.
- b) La pendiente o inclinación (i) de la superficie, que es el ángulo formado por dicha superficie con el plano horizontal. Se mide de 0° a 180° .

La radiación solar recibida por una superficie está influida por el ángulo de incidencia (θ), que forman los rayos del Sol con la normal a la superficie. Este ángulo, para una superficie arbitrariamente orientada e inclinada, viene dado en función de las coordenadas horizontales del Sol.

1.2.2 Distribución del recurso solar en la República Mexicana

En México el recurso solar ha sido aprovechado principalmente en aplicaciones térmicas, fotovoltaicas y procesos que funcionan con la parte de la UV del espectro solar, las aplicaciones de la energía solar en México, se han hecho en lugares o regiones en donde se ha necesitado, basados en sus necesidades y desde luego en el recurso disponible de la zona.

Las principales necesidades en México que se han solucionado con el uso de la energía solar son:

Calefacción (Calentamiento de espacios en zonas rurales y con escasos recursos)

- Calentamiento de agua
- Desinfección de agua
- Secado de fruta
- Cocción de alimentos
- Generación de electricidad con sistemas fotovoltaicos.

La necesidad que más se ha buscado solucionar, debido a que la manera en que se está haciendo en la actualidad genera contaminación ambiental, es la necesidad de energía eléctrica, sin embargo hasta el 2011 solo el 6.9% de la energía eléctrica generada en México es de origen renovable, y que el 1.7% de esa cantidad, es de origen solar.[4]

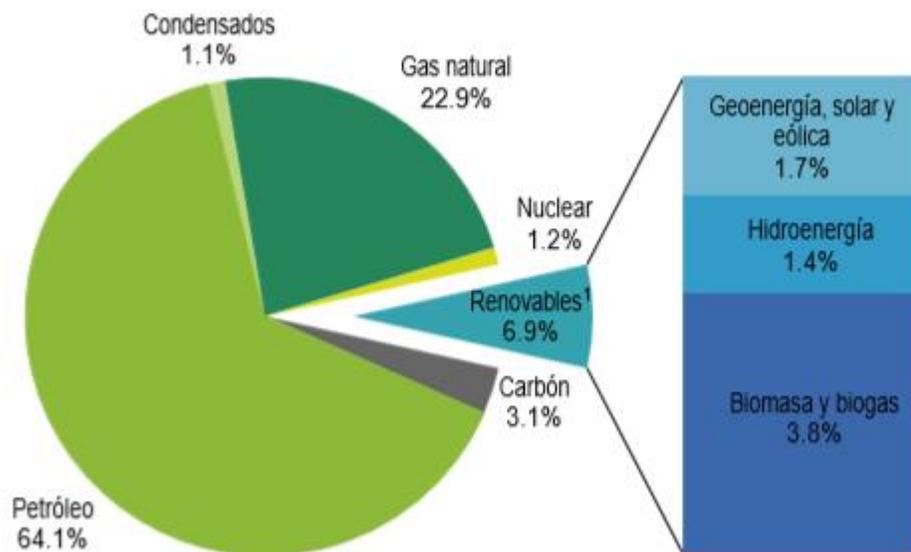


Figura 1.4 Distribución de fuentes energéticas en el país. Fuente : Sistema de información energética, SENER.2011.

Como se puede observar en la figura 1.4, la producción de energía eléctrica con fuentes renovables en México no es representativa y más aún la parte generada con recurso solar.

Tabla 1.1 Aprovechamiento de la energía solar en el país, Fuente: Balance Nacional de energía 2011, SENER

Cuadro 54. Aprovechamiento de energía solar

Características	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Variación porcentual (%) 2011/2010	Uso final
Calentadores solares planos									
Instalados en dicho año (miles de m ²):	100.3	96.7	154.3	165.6	233.3	272.6	312.6	14.7	Calentamiento de agua para albercas, hoteles, clubes deportivos, casas habitación, hospitales e industrias
Total instalados (miles de m²):	743.0	839.7	994.0	1,159.6	1,392.9	1,665.5	1,978.2	18.8	
Eficiencia promedio ¹ :	40%	40%	50%	50%	50%	50%	50%	-	
Radiación solar promedio (kJ/m ² -día):	20,880	20,880	20,880	20,880	20,880	20,880	20,880	-	
Disponibilidad de calor solar primario (PJ):	5.662	6.399	7.575	8.837	10.616	12.693	15.076	18.8	
Generación (PJ):	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	19.8	
Módulos fotovoltaicos									
Capacidad instalada en dicho año (kW):	515	1,056	901	872	5,712	3,502	1,955	-11.2	Electrificación rural, comunicaciones, bombeo de agua, refrigeración y conexión a la red
Total capacidad instalada (kW):	16,577	17,633	18,534	19,406	25,118	28,620	30,575	6.8	
Horas promedio de insolación (h/día)	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	-	
Factor de planta ² :	16%	16%	16%	16%	20%	21%	21%	-	
Rendimiento promedio por año:	0.67	0.67	0.67	0.67	0.84	0.86	0.86	-	
Generación (PJ):	0.08	0.07	0.07	0.07	0.10	0.11	0.113	1.0	

Fuente: Asociación Nacional de Energía Solar, A.C. y Contratos de interconexión.

¹Los valores de eficiencia se asocian únicamente a la nueva capacidad instalada en el año en cuestión.

²Las proporciones de sistemas interconectados se asocian únicamente a la nueva capacidad instalada en el año en cuestión.

³Los valores de factor de planta se asocian únicamente a la nueva capacidad instalada en el año en cuestión.

Según ANES: El rendimiento típico para sistemas aislados= 0.67, para sistemas interconectados=0.87; los valores de rendimiento se asocian únicamente a la nueva capacidad instalada en el año en cuestión.

Como se puede observar en la tabla 1.1, el uso de la energía solar en los últimos años ha sido dirigido principalmente al calentamiento de agua, y generación directa de electricidad con dispositivos fotovoltaicos y una pequeña porción en elementos pasivos utilizados en diseños arquitectónicos y de ayuda a pequeñas regiones con escasos recursos económicos.

1.3 DISPOSITIVOS PARA CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR

Existen dispositivos para la captación del recurso solar, llamados colectores o concentradores solares. La diferencia entre ellos es principalmente el nivel de concentración de la radiación solar que pueden alcanzar o simplemente no presentar.

Los colectores solares son dispositivos que no concentran la radiación solar, y aprovechan la radiación directa que incide sobre una superficie, así como la radiación difusa que llega por efectos de reflexión de partículas suspendidas en el medio ambiente.

Los dispositivos de concentración solar son equipos cuyo objetivo es captar la radiación solar en cierta área, con superficie reflejante, para aprovechar los efectos de reflexión y poder direccionar la radiación en una pequeña área. La geometría que pueden tener estos concentradores es muy importante, ya que de ella se deriva el nivel de concentración y la aplicación de cada uno de ellos. Entre los más importantes se encuentran los concentradores de canal parabólico simple, y los concentradores de canal parabólico compuesto. Estos hacen una concentración en forma de "línea", lo que permite utilizarlos en aplicaciones muy importantes como lo son el calentamiento de agua, y la generación directa de vapor. Esta última es una aplicación muy importante y de mucho interés en el ámbito científico; a ella se han dedicado tesis de investigación como la elaborada por Iván Galileo Cienfuegos en el año 2007 [5], en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En esa tesis se estudió los problemas físicos generados por la aparición de gradientes térmicos dentro del dispositivo de prueba.

La generación directa de vapor mediante el uso de la energía solar permite aprovechar este recurso energético, para la generación de electricidad a gran escala.

Por otro lado, el calentamiento de agua para uso doméstico ha tenido gran auge a nivel comercial, ya que al sustituir un calentador convencional por un dispositivo solar, se tiene además de una gran contribución para la conservación del medio ambiente, un ahorro de combustible que se ve reflejado en la economía del usuario.

En la Tabla 1.2, se observan los diferentes dispositivos de captación solar, y el rango de concentración aproximado que pueden alcanzar, dependiendo de los parámetros de diseño y climatológicos. Cabe aclarar que para los rangos de temperaturas presentados en dicha tabla, se consideran en zona de concentración, con un material de gran nivel de absorción como los metales.

Tabla 1.2 Concentración solar, en diferentes concentradores solares, considerando aplicaciones térmicas [6]

DISPOSITIVO	CONCENTRACION	TEMPERATURA	GRADOS DE LIBERTAD
COLECTOR PLANO	$C=1$	$30 < T < 80$	CERO
TUBOS EVACUADOS	$C < 1$	$50 < T < 190$	CERO
CONCENTRADOR PARABOLICO COMPUESTO	$1 < C < 5$	$70 < T < 240$	CERO
	$5 < C < 15$	$70 < T < 290$	UNO
CONCENTRADOR PARABOLICO SIMPLE	$15 < C < 40$	$70 < T < 290$	UNO
CENTRADOR PUNTUAL	$100 < C < 1000$	$70 < T < 930$	DOS
TORRE CENTRAL	$10 < C < 1500$	$130 < T < 2700$	DOS
HORNO SOLAR	$1500 < C < 5000$	$600 < T < 3000$	DOS

Para todos los dispositivos solares, la orientación juega un papel muy importante en su desempeño y en su eficiencia, todos pueden ser posicionados horizontales, verticales o inclinados, tratando de seguir la trayectoria solar. La posición de una superficie con respecto al Sol se puede controlar, dependiendo de la posición relativa de la misma con respecto a la trayectoria del Sol, sobre la periferia del globo terráqueo.

A continuación se explica la estructura geométrica de: colector solar, concentrador parabólico simple, concentrador parabólico compuesto y concentrador puntual. Mencionando también su funcionamiento, y los materiales utilizado en cada uno así como las principales aplicaciones que tienen.

1.3.1 Colectores planos de radiación solar

Un colector para radiación solar, llamado también “colector de placa plana”, es un dispositivo diseñado para la captación de la radiación solar global, para transmitir dicha energía a un fluido de trabajo, para diferentes usos. Un uso muy común es el calentamiento de agua para uso doméstico o comercial.

Este dispositivo no tiene ningún fin de concentración de la radiación captada, sólo alcanza temperaturas del fluido de trabajo inferior a 100 ° C. Se caracterizan por ser económicos y resultan eficientes para obtener agua caliente sanitaria. Comúnmente usa una orientación fija y aprovecha tanto la radiación directa como la difusa. Estos

dispositivos se componen de cuatro elementos principales: Cubierta transparente (que puede ser de vidrio o policarbonato), Placa captadora (superficie negra que absorbe la radiación solar), Aislante (puede ser fibra mineral) y la estructura de soporte (carcasa). Cabe mencionar que actualmente se han utilizado otros materiales para la elaboración de colectores, entre ellos los polímeros, evitando con este nuevo diseño el uso de la cubierta transparente, aislante y en ocasiones hasta de la carcasa. Los colectores hechos de polímeros se han utilizado en los últimos años para el calentamiento de agua en albercas.



Figura 1.5 Fotografía de un Colector Solar Simple, ubicado en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM.

1.3.2 Concentración solar

La principal función de un concentrador solar es captar radiación solar en cierta área recubierta con superficie reflejante y concentrarla a un área mucho menor. A este fenómeno se le llama concentración solar.

Si hablamos de concentración debemos de tener algún índice que nos indique el grado de concentración, el que dependerá de factores geométricos que más adelante se explicarán.

El índice de concentración solar, es un indicador que relaciona el área de captación A_c con el área que alcanzamos a reducir A_r , por lo que dicho índice se expresa en la siguiente ecuación.

$$IC = \frac{A_c}{A_r} \quad \text{Ec.....1.2}$$

1.3.3 Concentrador de canal Parabólico simple (CCPS)

Este tipo de concentrador también es conocido como concentrador cilíndrico parabólico, el cual presenta un perfil en forma de parábola recubierto con superficie reflejante, que direcciona la radiación solar a una pequeña zona de concentración ubicada en el foco geométrico del perfil del mismo, haciendo una mayor densidad fotonica. Dicha superficie se encuentra adherida a una base rígida.

Un concentrador de canal parabólico simple, está compuesto principalmente por los siguientes elementos:

- Base rígida con un perfil parabólico,
- Superficie reflejante,
- Tubo absorbedor
- Tubo concéntrico.

La base rígida: comúnmente está hecha por materiales rígidos como fibra de vidrio o algún tipo de acrílico resistente a las condiciones de trabajo, entre ellas las climatológicas. El objetivo de esta base es darle al concentrador el perfil deseado para que direcciona la radiación incidente sobre la superficie reflejante a la zona de concentración según sea el perfil.

Superficie reflejante: Es una superficie que tiene como finalidad direccionar la radiación solar incidente en dicha superficie a una zona común ubicada de acuerdo a su geometría, pero que en los casos de este concentrador la zona se ubica en el foco del perfil parabólico con el que cuenta. El material del que está hecha puede variar ya que los mismos se comportan diferente con respecto a la radiación incidente, es decir, que la cantidad de energía que absorben, reflejan y transmiten es diferente en cada material, para cada longitud de onda. Un ejemplo común de superficie reflejante atizada en concentradores solares, es el aluminio con acabado espejo capaz de reflejar la mayor parte de radiación, ya que toda la radiación que

incide sobre la superficie es reflejada y a pesar de que esta propiedad depende del material, también lo hace de la limpieza que tenga en condiciones reales de trabajo o de pequeñas deformaciones que presente la superficie, así mismo otra parte de esa radiación se transmite por el material o se pierde en forma de calor, al ambiente o a la base rígida.

Tubo absorbedor: Se ubica en el foco geométrico del perfil parabólico del concentrador, en donde se sitúa la zona de concentración de energía solar. El objetivo principal de este tubo es contener un fluido, el cual cambiará sus propiedades térmicas debido a la energía concentrada, por lo cual, el material del mismo, debe de ser adecuado dependiendo los intereses para los cuales fue diseñado (térmicos o para aprovechar otra longitud de onda diferente a la intensidad del infrarrojo).

Para aplicaciones térmicas el material del tubo debe de cumplir con un alto coeficiente de conducción térmica y un alto nivel de absorción, porque es sometido a radiación solar concentrada, para transmitir esa energía a un fluido de trabajo por el efecto de radiación, convección y conducción de calor.

Con la finalidad de tener un mejor aprovechamiento de radiación incidente sobre la superficie del tubo se han utilizado recubrimientos especiales que permiten aumentar la energía absorbida por el material y aumentar las temperaturas de trabajo para el fluido contenido.

Para aplicaciones en donde el interés radica en aprovechar la luz del Sol, se requiere un material que permita el paso de las bajas longitudes de onda que forman parte del espectro solar, el material debe de cumplir con esa permeabilidad y además ser resistente a considerables temperaturas ya que el sistema puede alcanzar temperaturas mayores de 100°C, además resistente a deflexión y compresión (esto último debido al aumento de presión, generando vibraciones que pueden romper este tubo).

Tubo concéntrico: Se ubica con el mismo eje transversal que el tubo absorbedor, y tiene por objetivo disminuir la pérdida de calor por el efecto de convección natural o forzada del tubo absorbedor al medio ambiente. Debe ser de un material permeable a la radiación solar y resistente a altas temperaturas y de la misma manera que el tubo absorbedor, éste también debe ser resistente a deflexión y compresión. El material más utilizado en un tubo concéntrico es el borosilicato.

La radiación solar directa debe ser paralela al eje de la parábola, y perpendicular a la apertura de la misma, para mejores resultados. Para cumplir con este requerimiento, el concentrador se puede equipar con seguidores electrónicos con uno o con dos

grados de libertad, buscando que siga al Sol durante el día y en las diferentes temporadas del año.

Entre las aplicaciones de un concentrador parabólico simple, se encuentran; la generación directa de vapor con agua como fluido de trabajo, y actualmente aplicaciones para desinfección de agua.



Figura 1.6 Foto de Concentrador de canal parabólico simple, ubicado en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM

La orientación de un concentrador de canal parabólico simple influye en la eficiencia del mismo y además en la cantidad de energía captada, en nuestro país la mejor posición para un concentrador sin seguimiento, es orientarlo al sur y con una inclinación igual a la latitud (Para el Distrito Federal $19^{\circ} 11' 29.7''$)

En la Figura 1.6, muestra una foto de un concentrador de canal parabólico simple, colocado para estudios de generación directa de vapor, en la planta solar del Instituto de Ingeniería, UNAM, haciendo coincidir su eje transversal del tubo absorbedor de oriente a poniente y la superficie reflejante orientada hacia el sur para seguir al Sol en su trayectoria en las diferentes temporadas del año, y además cuenta con un seguidor el cual le proporciona un ajuste diario, y la libertad de aprovechar mejor la energía solar durante del año.

1.3.4 Concentrador de canal parabólico compuesto (CPC)

Los concentradores de canal parabólico compuesto, son diseñados para tener una mayor concentración solar en comparación con un concentrador de canal parabólico simple y provocar mayores temperaturas para el fluido de trabajo, las cuales pueden llegar a valores mostrados en la tabla 1.2 , estos valores dependerán del diseño y de las condiciones climatológicas del lugar. Las aplicaciones más comunes para este concentrador, son; calentamiento de agua, y procesos para la desinfección y desintoxicación de agua, entre otros.

Un concentrador de canal parabólico compuesto, se conforma de los siguientes elementos:

- Base rígida con un perfil parabólico compuesto,
- Superficie reflejante,
- Tubo absorbedor .

Los elementos que conforman un concentrador de canal parabólico compuesto, son muy similares y prácticamente con los mismos materiales a los utilizados en un concentrador de canal parabólico simple.

La base rígida con un perfil parabólico compuesto, es comúnmente de fibra de vidrio , ya que es un material ligero, rígido y poco conductor del calor. El perfil de un concentrador de canal parabólico compuesto está formado, inicialmente por la involuta de un círculo, en sus dos direcciones, seguido de una sección de parábola.

La superficie reflejante, se utiliza con las mismas propiedades que se mencionaron para una superficie utilizada en un concentrador de canal parabólico simple, la cual debe de cumplir con una gran reflejancia y un valor muy pequeño de absorción, para aprovechar la mayor parte de radiación solar que incide en dicha superficie.

El tubo absorbedor utilizado en un concentrador de canal parabólico compuesto, se ubica en la zona de concentración solar, capaz soportar temperaturas de aproximadamente 250°C, por lo cual se busca un material resistente a este rango de temperatura, y que además cumpla con un buen nivel de conductancia de calor y un buen nivel de absorción en el material.

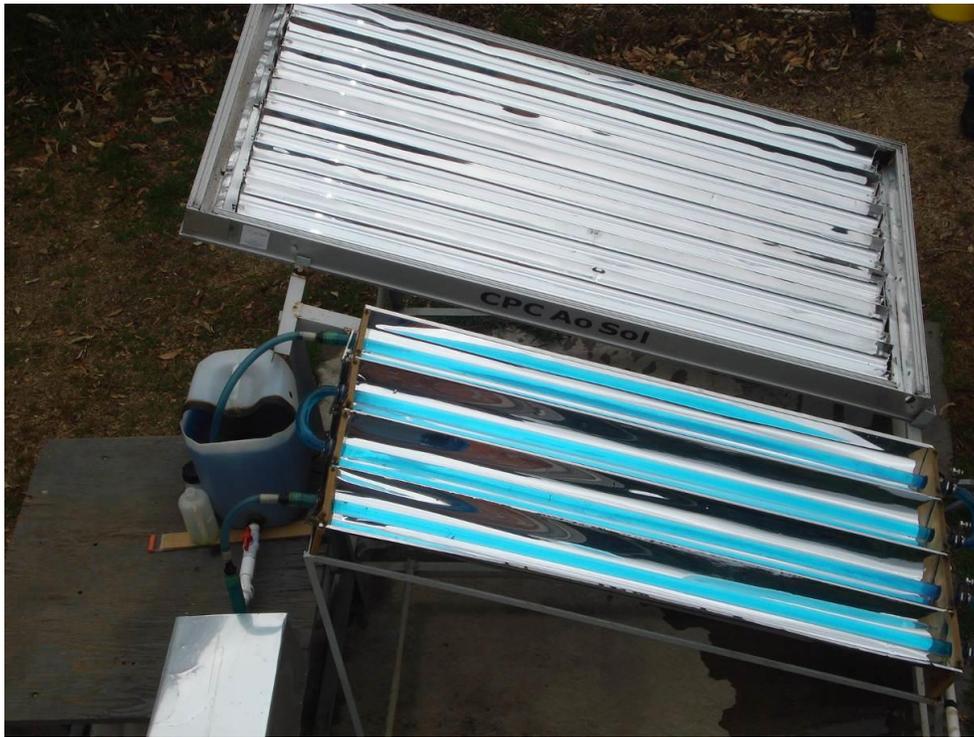


Figura 1.7 Fotografía de Concentrador de canal parabólico compuesto, utilizado para proceso de fotocátalisis solar, en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM

Con respecto a la orientación e instalación de dichos concentradores, se tienen las mismas consideraciones mencionadas para los colectores solares y en general para cualquier tipo de concentrador solar. Lo cual menciona mantener cierta inclinación y orientación, que para nuestro país (México), se recomienda una orientación con la superficie transparente del concentrador hacia el sur, y una inclinación igual a la latitud del lugar, para aprovechar la radiación durante todo el año, sin necesidad de moverlo.

1.3.5 Concentradores concéntricos

Este tipo de concentradores se consideran de alta potencia debido a que puede generar altas temperatura para el fluido de trabajo en el área de concentración, este tipo de concentradores son mucho más caros, necesitan ser movidos para el

seguimiento del Sol y utilizan sólo la radiación que no es dispersada por las nubes o la neblina.

Dependiendo de la perfección óptica del colector (superficie reflejante), se puede obtener una temperatura de hasta 3500 °C con radiación solar focalizada con espejos circulares de sección parabólica. Un colector rudimentario fabricado con una geometría en forma de paraboloides de revolución, fabricado con lámina de plástico aluminizado puede conseguir temperaturas de 500° C o superiores.

Este tipo de concentradores permiten aplicaciones térmicas con altas temperaturas, como pueden ser hornos solares, y en la actualidad para generación de electricidad, utilizando las grandes diferencias de temperaturas de un fluido.



Figura 1.8. Concentrador solar puntual. Ubicado en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.

La zona de concentración, se ubica en el foco del paraboloides de revolución que forma su perfil. El concentrador debe seguir la trayectoria solar lo más posible, tratando de conservar la perpendicularidad del plano imaginario de apertura con la radiación solar directa y de no hacerlo, la zona de contracción cambia no permitiendo un buen funcionamiento.

1.4 REACTORES PARA FOTOCATÁLISIS SOLAR

Es posible utilizar recursos solares en tratamientos para desinfección de agua, utilizando métodos de oxidación avanzada, un tratamiento muy interesante es el llamado “Fotocatálisis Solar”, esto se puede lograr con colectores o concentradores solares, efectuando algunas modificaciones principalmente en el tubo absorbedor. A estos dispositivos modificados los podremos llamar reactores para fotocátalisis solar, aquí se explica en qué consiste su diseño, las consideraciones de instalación y los materiales utilizados para su construcción.

Los reactores para fotocátalisis son dispositivos en donde se lleva a cabo una reacción química con la finalidad de eliminar agentes contaminantes, inmersos en un medio, el cual puede ser líquido a gaseoso.

El comprender y manejar los fenómenos que ocurren en un reactor para fotocátalisis solar a cualquier escala, requiere utilizar conocimientos de distintas disciplinas, dependiendo de la forma en que se enfoque el estudio. El análisis del proceso se hace a partir de su etapa inicial, considerando la emisión de energía radiante en forma de fotones por parte de una fuente, que en este caso es el Sol, hasta el final en donde la molécula de un contaminante presente en un fluido a tratar pasa a una especie inocua para éste. Por lo tanto, se requieren conocimientos de fisicoquímica, hacer balances de conservación de energía, conservación de masa, y conocer sobre fenómenos de transporte, transferencia de calor, termodinámica, óptica, etc. [7]

El diseño de un reactor para fotocátalisis es importante para el proceso, ya que la eficiencia de la reacción foto catalítica también depende de los parámetros geométricos del reactor utilizado.

Existen varios factores a considerar en el diseño de un reactor para fotocátalisis. Pero en general podemos considerar los siguientes [7]:

- Asegurar, un buen contacto de la superficie del catalizador con el agua a tratar.
- Tener una buena exposición del catalizador a la energía utilizada en el proceso.

- Considerar parámetros tales como la distribución del fluido mezclado o interacción del reactivo y el catalizador, transferencia de masa, conservación de energía.
- Registrar los parámetros ambientales, dirección e intensidad del aire que circula por el reactor, flujo de radiación solar, temperatura del aire.
- Usar materiales adecuados que permitan, aprovechar la mayor energía UV posible, encontrada en el espectro .
- Distancia desde la fuente de energía a la zona de la reacción.

Uno de los aspectos más importantes en el diseño de un reactor, es la manera de contacto del catalizador con el fluido a tratar, ya que puede estar inmerso en el fluido o fijo en algún tipo de soporte para el caso de procesos con agua, o bien catalizador monolítico o también soportado para el caso de procesos gaseosos. Además fenómenos térmicos y de dinámica de fluidos que se presentan en el funcionamiento de un reactor para fotocatalisis solar y que pueden ser importantes en las reacciones catalíticas, por lo cual se debe tener en cuenta para el diseño lo siguiente:

- Posición del reactor respecto a la trayectoria solar.
- Fenómenos térmicos dentro de la cámara de reacción foto catalítica(tubo absorbedor)
- Dinámica del fluido a tratar dentro del tubo absorbedor
- Temperaturas del fluido de trabajo debido a dicha concentración solar.

En un proceso fotocatalítico se busca un reactor con una buena eficiencia, sin embargo en gran parte de las investigaciones realizadas hasta el momento, la eficiencia no resultaba tan importante como la obtención de un conocimiento exhaustivo sobre la influencia de los diferentes parámetros relevantes del proceso. Desde el punto de vista científico este planteamiento resulta adecuado, pero no así cuando intenta llevar un cambio de escala para su aplicación práctica. Existen dos tipos de reactores más comunes, en sistemas fotoquímicos a nivel laboratorio, uno es iluminado dentro de un sistema de recirculación, mientras que el otro es un sistema de un reactor fotoquímico continuamente agitado.

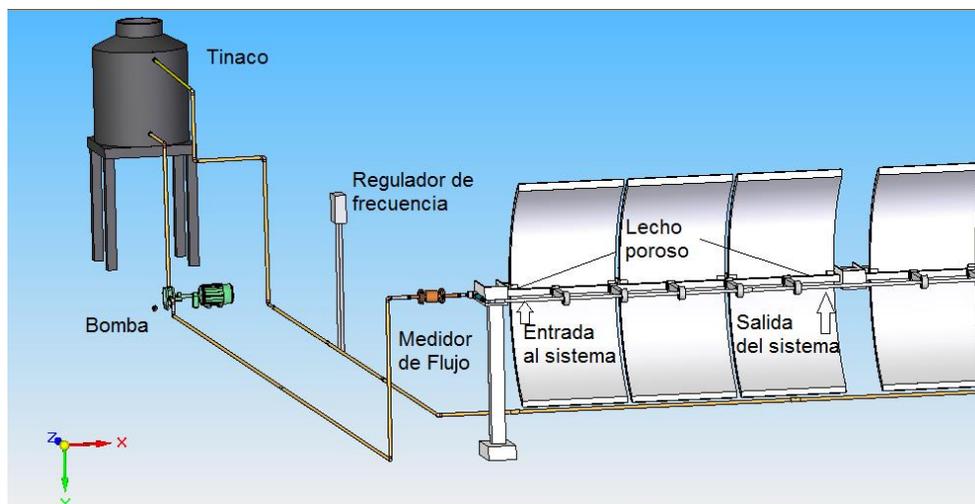


Figura 1.9 Modelo del reactor para fotocátalisis solar, con recirculación.

Para el funcionamiento de algunos reactores para fotocátalisis a nivel laboratorio, solo una parte de la radiación emitida por la lámpara (fuente de energía), es interceptada por el reactor por lo que se debe de considerar también el volumen de agua a tratar, el nivel de mezclado etc. En general la eficiencia es poca desde el punto de vista funcional. Es hasta el planteamiento de los primeros diseños de plantas piloto que aparecen diseños optimizados de reactores para procesos de fotocátalisis con TiO_2 . Las primeras plantas fueron desarrolladas, a finales de la década de los 80's, utilizando la luz solar; dichas plantas fueron las desarrolladas por el *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* y *Sandia National Laboratories*, ambos en USA.

Las primeras plantas de tratamiento de agua con fotocátalisis solar fueron construidas utilizando colectores cilíndricos parabólicos (simples y compuestos), modificándolos, reemplazando el tubo receptor de acero por un tubo absorbedor de vidrio tipo borosilicato, a lo largo del cual circulaba agua contaminada [12]. Desde ese momento se ha estudiado la manera de optimizarlos, en costos y en funcionamiento, sin perder de vista que se tiene una aplicación óptica y con miras al manejo de diferentes niveles de contaminación y diferentes volúmenes de agua. Actualmente en México, en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM, se llevan a cabo investigaciones sobre el proceso de fotocátalisis solar, en donde se ha modificado un concentrador de canal parabólico simple, para que funcione como reactor para fotocátalisis, el cual se muestra en la figura 1.10, del que se hablará a detalle más adelante.



Figura 1.10. Fotografía de Concentrador parabólico simple, acondicionado para fotocátalisis solar. Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM.

En un reactor para fotocátalisis solar es muy importante decidir qué tipo de dispositivo solar se va a utilizar, ya que como se mencionó en apartados anteriores, se diferencian en la intensidad de concentración de energía, misma que se notará en la cantidad de UV disponible para el proceso.

El uso de un sistema que funcione con la luz concentrada, tiene ventajas tales como: un área del reactor mucho menor, lo que significa un volumen menor de reactor; un circuito menor; controlar el fluido de trabajo, así como trabajar con mucho más volumen de fluido a tratar, etc. Por tal razón, el trabajar con un reactor para fotocátalisis solar, que funciona con concentración solar, parecería la mejor opción; sin embargo también hay que considerar los costos de la superficie reflejante, los costos de los mecanismos de sujeción del catalizador, de ser necesario, los costos de los mecanismos de seguimiento del Sol. Esto último y otros aspectos del funcionamiento hacen tener una complejidad ingenieril para su correcto funcionamiento. También se deben considerar los costos elevados, cuando se trate de reactores que presenten una elevada calidad de materiales (Por ejemplo el uso de materiales con elevada transividad de la radiación UV).

Los reactores para fotocátalisis solar que funcionan con concentración solar o alta irradiación lumínica tienen tres importantes desventajas en comparación con los

reactores para fotocátalisis solar sin concentración solar. La primera es su invalidación para el aprovechamiento de la radiación difusa; esto no es importante en el caso de aplicaciones térmicas (generación de vapor o simplemente calentar agua), dado que la radiación solar difusa es solo una pequeña proporción de la radiación solar total depende de la nubosidad. Sin embargo para los procesos de fotocátalisis solar con TiO_2 , sólo es útil la fracción UV del espectro solar y ya que esta radiación no es absorbida por el vapor de agua que se encuentra en la atmosfera, se dispersa, ocasionando un efecto similar a lo que se produce con la longitud de onda correspondiente al color azul, que hace que veamos el cielo de ese color. Este fenómeno en el que la radiación directa se convierte en radiación difusa supera el 50% del total de radiación UV para un valor de masa de aire $MA = 1.5$ (La Masa de aire se define como el cociente entre la trayectoria óptica oblicua que describe un fotón, a lo largo de la atmosfera, y la trayectoria vertical mínima que hubiese tenido que recorrer para llegar al mismo lugar). Debido a que los colectores solares tienen la capacidad de aprovechar la radiación directa y la radiación difusa, su eficiencia puede llegar a ser muy elevada. La segunda desventaja está relacionada con la forma de llevar a cabo la reacción, y la relación que tiene el flujo de energía captada por el reactor y la intensidad de reacción alcanzada, debido a la variación enorme que se tiene en las condiciones climatológicas como se puede observar en los estudios realizados a lo largo del tiempo y los resultados conseguidos. La tercera desventaja es principalmente el costo elevado tanto de construcción como de mantenimiento.

El uso de un reactor u otro para la fotocátalisis solar, con o sin concentración solar, conlleva a tener complicaciones ya que se trabaja con radiación solar, y dicha iluminación es variante con la hora del día, con las condiciones de nubosidad, posición del reactor respecto al Sol, etc.

1.4.1 Funcionamiento de un reactor para fotocátalisis solar

Un reactor para fotocátalisis solar está diseñado para un fin, por lo cual debe de cumplir ciertas condiciones de funcionamiento, las mismas que se enumeran a continuación.

a) Iluminación en el reactor para fotocátalisis solar.

La disposición del catalizador dentro del reactor, así como el tipo de soporte inerte a utilizar, es todavía un tema de investigación, ya que existen múltiples propuestas pero no hay una elección definida de cuál utilizar y el por qué. Se han estudiado diferentes configuraciones, entre ellas poner esferas con catalizador adherido al

interior de un tubo de vidrio, o poner directamente el catalizador sobre la superficie del tubo por donde circula el agua. La iluminación en el reactor para fotocátalisis solar también depende de la forma en que se encuentre el catalizador en la reacción, ya sea móvil o fijo. Las ventajas de trabajar con un catalizador fijo son varias, ya que se evita tener que recuperar el catalizador después de la reacción (siendo un gran problema este tema), y su recuperación en condiciones óptimas. Sin embargo podemos mencionar desventajas también como pueden ser:

- La disminución de la superficie de TiO_2 activada, en un determinado volumen de reactor, en comparación con el mismo volumen con catalizador en suspensión.
- Limitaciones en la transferencia de materia a bajos caudales. Este efecto es más intenso cuando se aumenta la potencia de iluminación, no aprovechándose una buena parte de ella. Cuando esto ocurre, la velocidad de reacción no aumenta al hacerlo el flujo de fotones.
- Dificultades para conseguir una correcta iluminación, cuando la fuente de fotones no se sitúa en el interior del reactor. Esto es particularmente problemático cuando se pretende trabajar con radiación solar.
- Aumento de la pérdida de carga del reactor. La consecuencia es un incremento en los costos energéticos, y del capital, ya que se deben instalar sistemas de bombeo de mayor potencia.

b) Concentración del catalizador en el reactor para Fotocatálisis Solar.

El nivel de concentración del catalizador varía de reactor en reactor dependiendo de su diseño y de la fuente energética; algunas investigaciones se han hecho, respecto a reactores que funcionan con energía solar, ya sea concentrada o no. La mayoría de las investigaciones se han hecho a nivel laboratorio teniendo como fuente de energía una lámpara de UV, y la relación que tienen la concentración de catalizador en la eficiencia del proceso. Los resultados son muy diferentes pero se puede deducir que la forma en que la radiación incide sobre el reactor y la longitud del camino óptico de ésta en su interior es fundamentalmente para determinar la concentración óptima de catalizador.

Cuando la concentración de catalizador es muy alta, se sufre de un efecto llamado “pantalla” que produce excesiva opacidad en la solución, impidiendo a las partículas más lejanas ser iluminadas y disminuyendo el rendimiento del sistema.

En el caso de procesos heterogéneos en fase acuosa con el catalizador en suspensión, es importante diseñar el sistema evitando cualquier posible sedimentación del catalizador, lo que puede ocurrir en determinadas circunstancias si se alcanza un flujo laminar en alguna zona del circuito hidráulico.

En este sentido, se debe de realizar el diseño teniendo en cuenta que el número Reynold (Re) debe estar siempre por encima de 4000 para garantizar un caudal turbulento.

c) Tiempo de residencia

Se define como tiempo de residencia en fotocatalisis, al momento real que permanece al agua a ser tratada en contacto con el catalizador llevándose a cabo la reacción de oxidación, considerando el suministro de energía

El tiempo de residencia, puede no ser relevante en el caso de procesos en recirculación (es decir, aquellos en los que el tiempo necesario para alcanzar la degradación deseada excede notablemente el tiempo de residencia), pero sí resulta evidente que se trata de un parámetro fundamental cuando se pretende completar el proceso fotocatalítico con un único paso por el reactor. Lo que se busca siempre es reducir el tiempo de residencia, logrando una degradación rápida pero eficiente, para poder aumentar el volumen de fluido a tratar, sólo que para eso se deben tomar en cuenta varios factores que alteran este parámetro; como pueden ser:

- El caudal de trabajo.
- Geometría del reactor
- Disposición del catalizador.

También se puede controlar el propio proceso fotocatalítico, pero en los casos que impliquen energía solar, deberán considerarse normalmente procesos fotocatalíticos en recirculación, ya que no va a ser posible garantizar procesos en línea con una fuente de luz no controlable como es el Sol.

d) El catalizador en la reacción.

En cualquier tipo de aplicación, tanto en el caso del tratamiento de aguas contaminadas como en el de gases, resulta evidente el requisito previo del diseño de

un reactor para fotocátalisis solar eficiente. En el caso de los procesos de fotocátalisis heterogénea los principales factores que se deben optimizar, son el aprovechamiento energético de la radiación y la disposición del catalizador.

La disposición del catalizador dentro del reactor es una parte fundamental para que la reacción sea lo más eficiente posible y es un tema que aún está en desarrollo, ya que no hay una forma establecida para que se considere como idónea. Se ha usado para ello tanto vidrio químicamente inerte, en forma esférica, recubierto con catalizador, como mallas recubiertas con el catalizador, o bien la superficie interna del tubo recubierta con el catalizador.

Al trabajar con el catalizador inmovilizado en vez de en suspensión es importante evitar la separación posterior al tratamiento, la recuperación en condiciones óptimas que permitan su reutilización, y la suspensión del sólido del paso previo del proceso. Para la inmovilización del catalizador se tiende a usar soportes dentro del reactor, haciendo que el uso de los mismos tenga desventajas para el proceso.

- Disminución de la superficie de catalizador activada, de un determinado volumen de reactor, en comparación con el mismo volumen con catalizador en suspensión.
- Limitación de la transferencia de materia a bajos caudales. Este efecto es más intenso cuando aumenta la potencia de iluminación, no aprovechándose una buena parte de ella. Cuando esto ocurre, la velocidad de reacción no aumenta al hacerlo el flujo de fotones.
- Dificultad para tener una buena iluminación, cuando la fuente energética no se sitúa en el interior del reactor.
- Aumento de la caída de presión del reactor.

e) Selección de materiales para la construcción de un reactor para fotocátalisis solar.

Para la construcción del reactor para aplicaciones foto catalíticas y en especial los que trabajan con energía del Sol, se debe tener en consideración tanto los requerimientos mecánicos, funcionales (ópticos) y también de resistencia debido a que trabajan en condiciones a la intemperie, a diferencia de los reactores de laboratorio (que trabajan a condiciones muy controladas teniendo que cumplir con un funcionamiento más idóneo para el estudio). Es por eso que el análisis de materiales

se realiza para cada tipo de reactor; sin embargo muchas de las consideraciones son semejantes tanto para reactores solares, como para los de laboratorio.

Hablando un poco del uso de la luz solar, los materiales específicos necesarios para aplicaciones foto catalíticas tienen mucho en común con los usados normalmente para aplicaciones solares térmicas. Es por eso que los reactores de sistemas foto catalíticos aires han seguido inicialmente diseños de captación de fotones ya utilizados en colectores térmicos, como son los colectores cilíndricos parabólicos y colectores sin concentración, a pesar de que son semejantes en función del principio de captación de energía, deben diferenciarse uno de otro en varios factores como son:

- El fluido (en este caso el fluido a descontaminar) debe estar expuesto a la radiación solar UV y, por lo tanto, el material del reactor debe tener una buena transmitancia para esta parte del espectro solar (UV).
- La temperatura no representa un papel significativo para el proceso fotocatalítico por lo que el aislamiento térmico en la tubería no resulta necesario.
- El material utilizado para el fotoreactor solar debe, además de cumplir con la permeabilidad en UV, cubrir la resistencia a las condiciones de trabajo (intemperie, fatiga térmica).

Cuando hablamos de que un material permeable a la UV será sometido a la radiación solar, debemos considerar condiciones de trabajo térmicamente fuertes, ya que los concentradores solares, como se menciona anteriormente, logran alcanzar grandes temperaturas dependiendo del tipo de concentrador del que se habla.

Debemos tomar en cuenta para la selección del material para la construcción de reactores para fotocatalisis solar, dos aspectos muy importantes: el primero es la parte reflejante a utilizar en el concentrador solar, y el segundo es el material a utilizar para el reactor (forma tubular).

Los materiales seleccionados para la construcción de un reactor para fotocatalisis solar, son sin duda una parte fundamental para el rendimiento de la reacción, debido a que una buena selección puede llegar a ayudar o mejorar el funcionamiento y rendimiento del reactor, buscando beneficiar con los materiales seleccionados la entrada de energía al sistema.

Los materiales recomendables para aplicaciones fotocatalíticas son: Cuarzo, borosilicato y vidrio común. La diferencia que hay entre estos materiales es la

permeabilidad en la parte del espectro solar referente a la franja UV, ya que el contenido de hierro en estos materiales refleja una porción de UV.

El cuarzo es muy buen material pero es costoso, seguido del borosilicato, que tiene una buena propiedad y de costo accesible, el cual es por ello más utilizado. Sin embargo es un tema de investigación las dimensiones utilizadas que sean adecuadas de acuerdo a la resistencia térmica y mecánica, necesarias debido a las condiciones de trabajo en el reactor.

Ya que el borosilicato es idóneo para un reactor para fotocatalisis, esta tesis tiene como objetivo principal el estudio del comportamiento mecánico térmico de un tubo absorbedor de vidrio tipo borosilicato, que se pretende utilizar como elemento de un reactor para fotocatalisis solar, y que además considera que en el interior existirá un catalizador adherido a esferas, lo cual forma un medio “poroso”, por donde circulará un fluido de trabajo.

La complejidad de un proyecto de este tipo son los fenómenos térmicos y de dinámica de fluidos presentados en el flujo interior del fluido en el mencionado tubo, los cuales repercuten en la energía que finalmente absorbe el tubo y que puede ocasionar alteraciones internas del mismo. Todo esto con la finalidad de profundizar en el tema de materiales útiles para la construcción de un reactor para fotocatalisis solar, y poder disminuir costos de construcción y aumentar la eficiencia del proceso.

CAPITULO II. ANÁLISIS DEL PROBLEMA Y PLANTEAMIENTO DE SOLUCION.

Debido a que la fotocatalisis solar es un fenómeno en donde intervienen variables ambientales imposibles de controlar, el aumento de la eficiencia del mismo se puede buscar en las mejoras de diseño del reactor en donde se lleve a cabo la reacción y de control de reactivos, lo cual genera otro tipo de problemas, ya que algunos de los dispositivos solares trabajan a altas temperaturas y pueden sobre pasar la resistencia de materiales usados.

La selección del mejor dispositivo solar para fotocatalisis, implica tener un buen conocimiento de las condiciones térmicas de trabajo, y una buena selección de materiales de construcción. En la búsqueda por conocer los beneficios que tienen los diferentes tipos de concentradores y colectores solares, para el proceso de fotocatalisis solar, se han hecho varios estudios e investigaciones, sometiendo diferentes tipos de dispositivos solares a las mismas condiciones de trabajo y observando el comportamiento térmico que tienen y sobre todo en la cámara de reacción, donde se aplica concentración solar.

Un ejemplo de las comparativas que se han hecho para estos dispositivos es el realizado por Erik R Bandala y Claudio Estrada en el 2007, en Cuernavaca Morelos, México [8], en donde se compararon 4 diferentes concentradores: el Concentrador Parabólico Compuesto (CPC), Concentrador de Canal Parabólico Simple (CCPS), Concentrador en V y el Colector Solar (CS). Entre los resultados, destaca la relación encontrada entre el foto catalizador utilizado, la concentración, y el rendimiento global del concentrador utilizado, encontrando que la geometría con mejores resultados fue el concentrador de canal parabólico compuesto, seguido por el colector cilindro V, el Concentrador de canal parabólico simple y finalmente el colector tubular. La comparación se llevó a cabo, simultáneamente con los cuatro dispositivos, bajo las mismas condiciones ambientales y usando como contaminante ácido oxálico y como catalizador dióxido de titanio (TiO_2), haciendo pruebas con 6 concentraciones diferentes para el catalizador, 0,00,0,01,0,05, 0,20, 0,50, y 1,00 g/L.

Sin embargo, aún existen muchas variables que no permiten identificar cuál de los concentradores es mejor para el uso de fotocatalisis solar.

La eficiencia de la reacción en un reactor para fotocatalisis solar, depende de muchas variables pero principalmente de las siguientes:

- La concentración del fotocatalizador.

- La iluminación que presenta el catalizador en el reactor para fotocátalisis solar (concentrador).
- Tiempo de residencia.
- Geometría del fotocatalizador.
- Envenenamiento de éste.
- Tipo de sustancia a degradar.

La mejora a la eficiencia del proceso puede estar en una serie de cambios a variables controladas durante el proceso, lo cual ha llevado a diferentes combinaciones de catalizador, reactivo, concentrador etc. Una propuesta para un reactor experimental se está estudiando en el Instituto de Ingeniera de la UNAM, que hasta el momento, está fase de prueba. Propone el uso de un concentrador de canal parabólico simple, que por su diseño permite utilizar un tubo absorbedor de vidrio tipo borosilicato (cámara de reacción fotocatalítica) de aproximadamente 26 mm, y en su interior esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm recubiertas con catalizador, con lo que se busca que el agua contaminada cuente con una buena iluminación y exista una buena reacción foto catalítica.

2.1 ANÁLISIS TEÓRICO

Para comprender el comportamiento térmico del tubo de vidrio tipo borosilicato se debe saber las temperaturas en la superficie interna y externa del mismo, sin embargo ésta no es constante en toda la periferia, teniendo en realidad perfiles de temperaturas según sea la superficie o zona observada.

El modelado teórico del perfil de temperaturas ya sea interno o externo sobre la superficie del tubo se logra con un balance de conservación de energía en el mismo, lo cual depende de variables internas y externas a las que está sometido dicho tubo. Para las variables externas se considera principalmente, la velocidad del aire que circula sobre la superficie externa del tubo, así como la temperatura ambiente. Las variables internas más importantes a considerar son:

- Caudal interno
- Energía suministrada

- Porosidad del medio

A continuación se describe teóricamente el procedimiento para el cálculo de los perfiles de temperaturas para las superficies del tubo, así como el comportamiento dinámico del flujo del fluido en el medio poroso.

2.1.1 Perfiles de temperaturas sobre las superficies del tubo de vidrio tipo borosilicato.

Para el planteamiento del perfil de temperaturas interno y externo se define un volumen de control teniendo en cuenta que se trata de un material isotrópico e indeformable, al cual nos dirigimos para su análisis, ya que es vidrio tipo borosilicato. Dicho volumen de control cumplirá en todo momento con la ley de conservación de energía, la cual cambia dependiendo de la zona de interés.

En la figura 2.1 se muestra un esquema, en el cual se aprecia gráficamente el elemento mínimo o elemento diferencial (Incropera, 2001) del tubo en cuestión, con lo que se plantean las ecuaciones dominantes de conservación de energía y de masa, para el análisis de conducción en el tubo de vidrio tipo boro silicato.

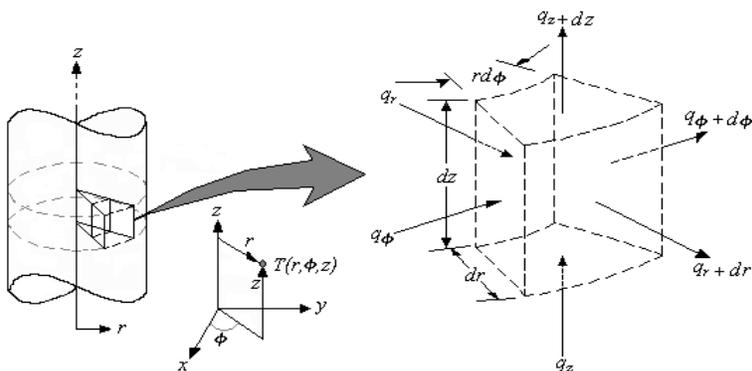


Figura.2.1 Volumen de control $dr \cdot r d\phi \cdot dz$, para el análisis de conducción en coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z) (Fuente: " Fundamentos de transferencia de calor ",incropera,2001)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_v * r * \frac{\partial}{\partial r} T \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k_v \frac{\partial}{\partial \phi} T \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_v * \frac{\partial}{\partial z} T \right) + \dot{q} = \rho * C_p * \frac{\partial}{\partial t} T$$

Ec..2.1. Ecuación de difusión de calor

Donde: T – Temperatura de un punto del material
 Cp – Capacidad calorífica a presión constante del material
 ρ – densidad del vidrio tipo boro silicato
 r – coordenada radial de un punto del cuerpo
 Ø -- coordenada azimutal de un punto del cuerpo
 z – coordenada longitudinal de un punto del cuerpo
 \dot{q} – generación de energía por unidad de volumen
 kv- Coeficiente de conducción térmica del vidrio utilizado

La ecuación 2.1, representa, la forma general de la ecuación de difusión de calor, indicando de manera textual” *en cualquier punto dentro del medio, la rapidez de transferencia de energía por conducción en un volumen unitario, más la rapidez de generación volumétrica de energía térmica, debe ser igual a la rapidez de cambio de la energía térmica almacenada dentro del volumen*“(Incropera, 2001).

Para nuestro caso en particular, la ecuación 2.1, se simplifica, teniendo las siguientes condiciones de trabajo real:

- Estado permanente del sistema ; $\frac{\partial}{\partial t} T = 0$
- Calentado por radiación concentrada, proveniente del concentrador cilindro parabólico simple.
- No hay variación de temperatura en el eje axial(z); $\frac{\partial}{\partial z} T = 0$
- No hay generación interna de calor; $\dot{q} = 0$

Por lo tanto la ecuación de difusión de calor en el material se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kv * r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(kv \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) = 0 \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde se puede observar que la temperatura cambia en dirección radial y azimutal. Además depende de propiedades de conducción de calor del material (vidrio tipo boro silicato) y de dimensiones del tubo

Esta ecuación nos muestra la temperatura en cualquier coordenada (r, φ) de la superficie del tubo no importando si es en la parte interna del tubo o en la parte externa del mismo. La resolución de esta ecuación aplicada en diferentes zonas del tubo genera el perfil de temperaturas.

Para la resolución de la ecuación 2.2 como ya se mencionó se utiliza un método de aproximación, el cual consiste en dividir en pequeñas secciones todo el cuerpo, haciendo una especie de “mallado” y generando puntos específicos de interés llamados nodos que se aproximan a valores conocidos muy próximos a ellos y que se le conoce como “Método de Diferencias finitas”, este método se basa en el uso de la ley de conservación de energía para un volumen de control, aplicada a cada punto de interés llamado “nodo”.

2.1.2 Método de diferencias finitas

En contraste con una solución analítica que permite la determinación de la temperatura en cualquier punto de interés en un medio, una solución numérica permite determinar la temperatura solo en puntos discretos. El uso de este método atiende a una serie de pasos. Siendo el primero la selección de los puntos discretos de interés, por lo cual se subdivide el medio de interés en pequeñas regiones y se asigna a cada uno, un punto de referencia en su centro. Los puntos de referencia suelen denominarse punto nodal (o simple nodo), y el agregado de los puntos se conoce como red nodal, malla o rejilla. Los puntos nodales se designan por un esquema numérico que, para sistemas bidimensionales toman la forma que se muestra en la figura 2.2, cada uno representa cierta región, y su temperatura es una medida promedio en la misma.

La selección de los puntos nodales rara vez es arbitraria y a menudo, depende de cuestiones como la conveniencia geométrica y a la precisión que se desee. La precisión deseada de los cálculos depende del número de puntos nodales designados, si este número es grande (una malla fina) es posible obtener soluciones extremadamente precisas.

La propuesta de la malla para este experimento, se muestra en la figura 2.2, en donde dividió cada superficie del tubo en 16 nodos, teniendo una malla de 16 nodos internos y 16 externos.

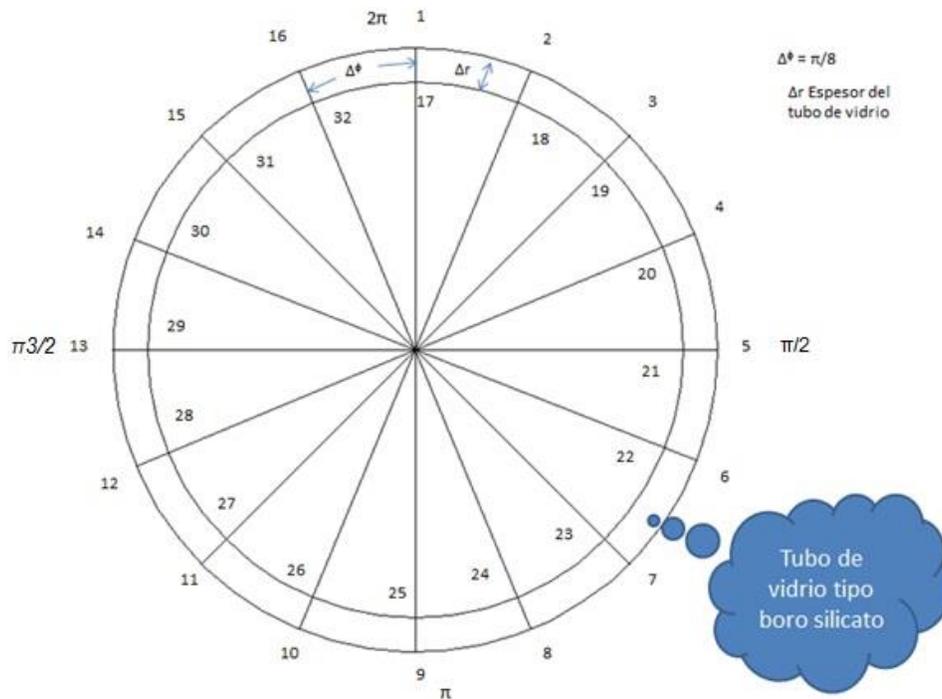


Figura 2.2. Red nodal propuesta para el experimento. π

Se aplica la ley de conservación de energía a un volumen de control, considerando que todo el flujo de calor se da hacia el nodo analizado (Rohsenow, et al., 1973).

Existen muchos trabajos realizados para la obtención del perfil de temperaturas en las superficies de un tubo absorbedor, por ejemplo los realizados por Heideman, et al. (1992), Flores (2003) y Martínez (2004) entre otros, donde el tubo absorbedor tenía como utilidad la generación directa de vapor, y fabricado con acero cromado o compuesto de cobre y acero. Sin embargo la metodología no depende del tipo de material utilizado, pudiendo adaptar para este experimento, la aplicación del cálculo del perfil de temperaturas ya conocido, haciendo los cambios pertinentes de las propiedades del material utilizado.

De acuerdo a las ecuaciones de balance de energía, cada nodo se encuentra en función de los nodos que los rodean, para nuestro caso existen tres zonas que debido a la energía suministrada a cada una, son diferentes, ya que existe una zona interna, y externa , de esta ultima una sección es irradiada con concentración solar .

En la figura 2.3 se aprecia que los nodos externos inferiores del 5 al 13 del tubo se encuentran irradiados por la radiación solar concentrada y difusa, ya que los nodos restantes (1-4 y 14-16), solo se encuentran irradiados por radiación solar global , sin concentración.

Según el mallado propuesto de 16 nodos externos y 16 nodos internos (Figura 2.2 y 2.3), se deben obtener las ecuaciones para cada uno de ellos, tomando en cuenta las diferentes condiciones de trabajo a las que se encuentra sometido el nodo.

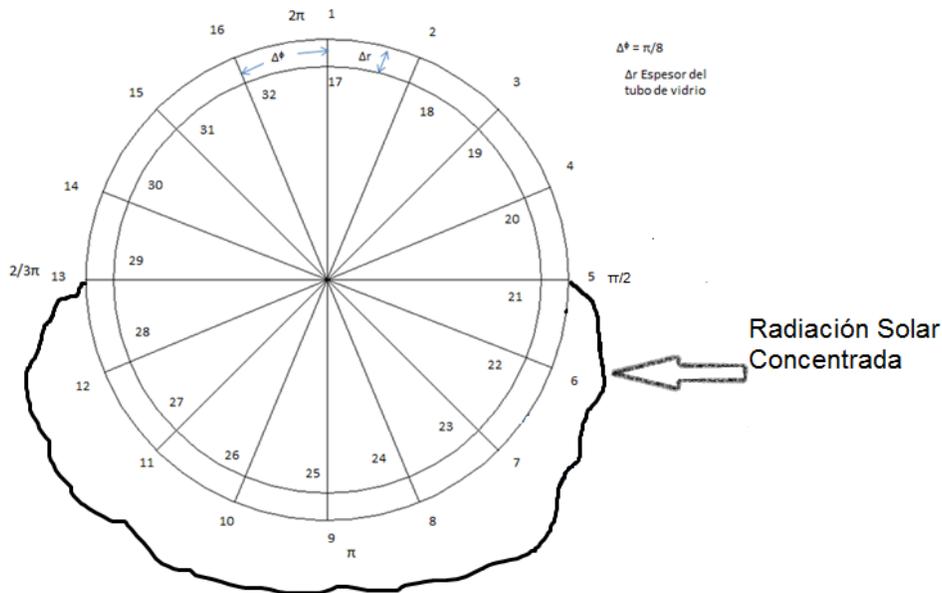


Figura 2.3. Vista transversal del tubo de vidrio tipo borosilicato con radiación solar concentrada incidiendo en la parte inferior.

Para las ecuaciones de los nodos del 1 al 16, el término de radiación puede ser mayor o igual a cero, dependiendo de las condiciones de frontera que se planteen.

Aplicando el balance de energía para cada uno de los nodos se tienen las siguientes ecuaciones:

Para los nodos externos, del 5 al 13 se considera el valor de radiación mayor que cero y para los nodos externos restantes el valor de la radiación es igual a cero. Por ejemplo para el nodo 1 la ecuación de balance de energía se presenta de la siguiente manera:

$$\left[\frac{\Delta r}{r_2 \Delta \varphi} + \frac{(2 r_2 - \Delta r) \Delta \varphi}{2 \Delta r} + \frac{h_a r_2 \Delta \varphi}{k v} \right] T_1 - \left[\frac{\Delta r}{2 r_2 \Delta \varphi} \right] T_{16} + \left[\frac{\Delta r}{2 r_2 \Delta \varphi} \right] T_2 + \left[\frac{(2 r_2 - \Delta r) \Delta \varphi}{2 \Delta r} \right] T_{17} = \left[\frac{\varepsilon_{sup} \sigma_{sup} T_{sup}^4 - (h_a a r_2 \Delta \varphi T_a)}{k v} \right]$$

Ec. (2.3)

Para el nodo 5 la ecuación correspondiente queda de la siguiente manera:

$$\left[\frac{\Delta r}{r_2 \Delta \varphi} + \frac{(2r_2 - \Delta r)\Delta \varphi}{2\Delta r} + \frac{h_a r_2 \Delta \varphi}{k\nu} \right] T_5 - \left[\frac{\Delta r}{2r_2 \Delta \varphi} \right] T_4 + \left[\frac{\Delta r}{2r_2 \Delta \varphi} \right] T_6 + \left[\frac{(2r_2 - \Delta r)\Delta \varphi}{2\Delta r} \right] T_{21} = \left[\frac{\varepsilon \sup \sigma \sup T \sup^4 - ((\alpha_s G_s + \alpha_{atm} G_{atm}) + h_a r_2 \Delta \varphi T_a)}{k\nu} \right]$$

Ec.(2.4)

Haciendo el balance de energía para los nodos internos considerando las condiciones de frontera y reagrupando términos, se tiene que para el nodo 17 la ecuación correspondiente es:

$$\left[\frac{(2r_1 - \Delta r)\Delta \varphi}{2\Delta r} \right] T_1 - \left[\frac{\Delta r}{r_1 \Delta \varphi} + \frac{(2r_1 - \Delta r)\Delta \varphi}{2\Delta r} + \frac{h_f r_1 \Delta \varphi}{k\nu} \right] T_{17} + \left[\frac{\Delta r}{2r_1 \Delta \varphi} \right] T_{32} + \left[\frac{\Delta r}{2r_1 \Delta \varphi} \right] T_{18} = \left[\frac{h_f r_1 \Delta \varphi}{k\nu} \right] T_{m_f}$$

Ec.(2.5)

El balance energético para los nodos internos es el mismo, en todas las regiones de la superficie interna.

De tal manera que las ecuaciones para los nodos restantes ya sean internos o externos se plantean de manera similar a las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5, según sea la posición del nodo en cuestión, quedando en función de la caída de presión, del coeficiente de convección en el interior del medio poroso "h_f", y del coeficiente de convección del aire "h_a", así como de las propiedades del material

El conjunto de ecuaciones planteadas, nos genera una matriz de 16 X 16, para una resolución simultánea, la cual se puede resolver utilizando algún software para cálculos matemáticos. Para este trabajo se resolvió el sistema de ecuaciones con un programa de cómputo llamado *MAPLE versión 13*.

Por otro lado, se puede apreciar en las ecuaciones de nodos externos, la influencia de variables ambientales, del fluido en el que está inmerso el tubo de vidrio (aire). Para el perfil de temperaturas de los nodos internos se necesita saber el coeficiente

de convección térmica del fluido de trabajo y temperatura media del fluido, así como las temperaturas de superficie del mismo.

Para conocer los valores de las variables necesarias y evaluar las ecuaciones para los perfiles de temperaturas, se tienen las siguientes consideraciones:

- Velocidad de la corriente del aire es uniforme sobre la superficie del tubo.
- La temperatura de la corriente del aire es igual a la temperatura ambiente.
- La temperatura de la superficie del tubo absorbedor tipo boro silicato, T_i , se toma como el promedio de las temperaturas azimutal del mismo tubo.

El coeficiente de transferencia de calor entre la superficie externa del receptor y el aire ambiente (h_a), se obtiene de la ecuación 2.6., para lo cual se necesita conocer el valor del número de Nusselt mismo que se determina considerando correlaciones de origen empírico que modelan el comportamiento del número de Nusselt con relación al número de Reynold y al número de Prandtl,

Una correlación que se ajusta al comportamiento del tubo de vidrio tipo borosilicato posicionado como tubo absorbedor y sometido a condiciones naturales de flujo de aire, es la propuesta por Zhukauskas en 1972, en investigaciones de flujo cruzado sobre superficies de tubos cilíndricos.

Donde todas las propiedades se evalúan en T_∞ (Temperatura ambiente) excepto Pr_s , que se evalúa en T_s (temperatura de superficie).

Inicialmente esta ecuación se particularizaba dependiente del número adimensional de Reynold, (Re) sin embargo Churchill y Bernstein en 1997 en su libro “ Heat Transfer” propusieron una sola ecuación de gran extensión que cubre todo el rango de Re (Ec. 2.7), así como para un gran amplio número de Prandtl, siempre y cuando se cumpla con las restricciones siguientes:

$$Re \cdot Pr > 0.2. \text{ y } 7 \times 10^4 < Re < 4 \times 10^5$$

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4 / Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (2.6)$$

$$h_a = \frac{Nu \cdot k_a}{d_2} \quad (2.7)$$

Para el coeficiente de convección térmico en el interior del tubo, se modela considerando un flujo a través de un medio poroso, lo cual se explica más adelante, pero antes se explica la dinámica del fluido en el interior del tubo.

2.1.3 Dinámica de fluidos en medio poroso

Un medio poroso es un medio formado por partículas contiguas que dejan entre ellas huecos o espacios libres a través de los cuales puede circular un fluido, que en el caso específico de este trabajo las partículas son totalmente esféricas y con dimensión conocida de 10 mm de diámetro. La cantidad de espacio libre depende de las variables siguientes:

- Porosidad de la capa.
- Diámetro de las partículas.
- Esfericidad o forma de las partículas.
- Orientación o disposición del empaquetado de las partículas.
- Rugosidad de las partículas.

La velocidad lineal real del fluido a través de los huecos del medio poroso se puede expresar en función de la velocidad lineal superficial (calculada como velocidad de flujo del fluido por la sección transversal total no obstruida en el medio) y de los parámetros ya mencionados (Brown et.al., 1950).

Un número adimensional que mide la turbulencia en un fluido dentro de un tubo es el número adimensional de Reynold, ya que a mayor valor de este número, mayor será la intensidad de turbulencia que presente dicho fluido, lo cual también depende de las dimensiones del tubo. Para un caso en el cual, el fluido circula a través de un medio poroso, delimitado por una superficie cilíndrica, este número adimensionales tiene modificaciones.

A continuación se presentan las ecuaciones para el número de Reynold en un medio poroso y la caída de presión que sufre un fluido de trabajo al cruce por dicho medio.

$$Re' = \frac{D_p F R_s v \rho}{\mu} \quad (2.8)$$

$$\overline{w_f} = \frac{v^2 L f F_f}{2gc D_p} \quad (2.9)$$

$$f = \frac{2gc D_p \overline{w_f}}{L v^2 F_f} = \frac{2gc D_p (-\Delta P) f}{F_f L v^2 \rho} \quad (2.10)$$

Donde

D_p : diámetro de la partícula.

Si tienen todas, el mismo tamaño, D_p es el tamaño medio del tamizado. Para tamaños mixtos se aplica:

$$D_p = \sqrt{\frac{\sum \frac{m_i}{D_i}}{\sum \frac{m_i}{D_i^2}}} \quad (2.11)$$

m_i : fracción de masa correspondiente a un tamaño dado D_i de partícula.

D_i : diámetro de las partículas, en cada una de las fracciones, según tamaños tomados como valores medios aritméticos de las aberturas de tamices utilizados para aislar las partículas.

v : velocidad superficial, velocidad calculada, como si el tubo no contuviese partículas, m/s.

ρ : densidad del fluido , [Kg/m³]

μ : viscosidad del fluido ,

L : espesor de la capa porosa, en la dirección del flujo, [m]

$-\Delta P_f$: Pérdida de carga, debido a pérdidas por roce y al aumento de la turbulencia , [kg/m²]

F_f : Coeficiente de corrección del roce.

Porosidad:

$$X = \frac{\text{Volumen ocupado por los huecos}}{\text{Volumen total del medio}} \quad (5)$$

2.1.4 Coeficiente de convección del fluido de trabajo, a través de un medio poroso.

Dentro del tubo en donde circula un fluido a través de un medio poroso, existe un fenómeno de transferencia de calor por convección del fluido de trabajo al medio poroso, y a las paredes del tubo contenedor, así como un fenómeno de transferencia de calor por conducción no considerado, al contacto del fluido con el medio poroso y la superficie interna del tubo. La intensidad de lo anterior depende también de la energía que se suministre al sistema. Recordemos que la ecuación de transferencia de calor por convección se expresa en la siguiente ecuación:

$$q'' = h_f(T_s - T_\infty) \quad (2.12)$$

Donde q'' es flujo de calor, h_f es el coeficiente convectivo de calor, T_s temperatura de la superficie en contacto con el fluido, y T_∞ temperatura del fluido. Esta ecuación se le conoce como ley de enfriamiento de Newton. Debido a que el fenómeno de transferencia de calor por convección se presenta ocasionado por el flujo de un fluido dentro de un tubo, la ecuación 2.12 se puede expresada como:

$$q'' = m * C_p(T_{sal} - T_{ent}) \quad (2.13)$$

Donde q'' es el flujo de calor, C_p es el calor específico del fluido a presión constante, T_{sal} y T_{ent} son las temperaturas de salida y entrada respectivamente.

De esta manera se ilustra que la ganancia o la pérdida de calor del fluido que pasa por cierto “tramo del medio poroso” está relacionado con el coeficiente de convección, y que además éste último se relaciona con la temperatura de entrada y salida del medio de prueba.

Para el cálculo del coeficiente de convección térmica en un medio poroso se considera un flujo de un fluido que cruza un medio poroso, con diferentes temperaturas entre sí, teniendo en el caso específico de este trabajo una disipación de calor linealmente proporcional a la distancia recorrida por el fluido en dirección axial del tubo, considerando al fluido de trabajo (agua con cierta opacidad), como un fluido incompresible y newtoniano, eso quiere decir que las propiedades tales como la densidad (ρ), viscosidad absoluta (μ), conductividad térmica (κ) y calor específico (C_p), permanecen constantes. Considerando además que el medio poroso está formado por esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm y que es de material isotrópico e indeformable, teniendo propiedades constantes tales como: porosidad (ε), permeabilidad (K), densidad (ρ), conductividad térmica (κ) y calor específico (C_p).

En resumen, para la evaluación del coeficiente de convección en un medio poroso se considera lo siguiente:

- El fluido de trabajo (agua con opacidad), no está en equilibrio térmico con el medio poroso (esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 [mm]).
- La ganancia de temperatura del agua es constante en dirección axial del tubo absorbedor, derivado de la radiación concentrada, suministrada por el concentrador solar, pero que cierta cantidad de esta energía ganada se transmite también al medio poroso.
- El intercambio térmico en el sistema, favorece la ganancia de calor en las esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm del medio poroso, aumentando de manera proporcional a la trayectoria axial recorrida por el fluido de trabajo.

El cálculo del coeficiente de convección de calor dentro del tubo para un fluido en medios porosos es derivado de la resolución de ecuaciones de balance de conservación de energía, conservación de masa y cantidad de movimiento para la fase líquida y un balance de energía para la fase sólida (medio poroso).

Se tiene para la fase líquida, el siguiente balance de energía y ecuación de conservación de movimientos:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon} v \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\rho}{\varepsilon} u \frac{\partial v}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v) \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - \frac{\mu}{K} \varepsilon v - \frac{\rho F \varepsilon}{\sqrt{K}} \cdot |V_{-}| \cdot v \quad (2.14)$$

En donde u es la velocidad del fluido en la dirección axial (z), v es la velocidad del fluido en dirección radial (r) y t es el tiempo, y ε es la porosidad del medio.

La ecuación de cantidad de movimiento en la dirección axial se expresa de la siguiente manera:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\varepsilon} u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \frac{\mu}{K} \varepsilon v - \frac{\rho F \varepsilon}{\sqrt{K}} |V_{\rightarrow}| \cdot u \quad (2.15)$$

Donde p es la presión del fluido; V_{\rightarrow} es el vector velocidad del fluido; F es el coeficiente inercial y también llamado término de Forchheimer y K es la permeabilidad del medio [Incropera,2001]

Para la fase sólida se tiene la siguiente ecuación de conservación de energía:

$$\rho_s C_p s (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} + hA(T_s - T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_s (1 - \varepsilon) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s (1 - \varepsilon) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.16)$$

Para la resolución de estas ecuaciones, se utilizó un método llamado “*Single blow transient method*”, que consiste en relacionar valores obtenidos experimentalmente, con un comportamiento deseado.

Para el uso de este método se requieren valores de temperatura de entrada y salida del medio, y consiste en despejar el valor de la temperatura de salida en función de la temperatura de entrada y del coeficiente de convección térmica, posteriormente sustituir el valor experimental de la temperatura de entrada y suponer un valor del coeficiente de convección, hasta que el valor de la temperatura de salida calculado sea similar al real, esto se hace de manera repetitiva y encontrando por lo menos 6 casos en los que se cumpla este comportamiento, tomando un valor promedio de estos seis casos.

Si la temperatura del medio poroso (esferas de vidrio) es constante T_{sup} , la transferencia de calor para el lecho se puede calcular como se expresa en la ecuación 2.16.

$$q = h_f A_{p,t} \Delta T_{ml} \quad \text{Ec...2.17}$$

Donde $A_{p,t}$, es el área total de las esferas y ΔT_{ml} es la diferencia de la temperatura media logarítmica definida por la ecuación. La temperatura de salida, que se necesita para calcular ΔT_{ml} , y además estimar el valor de h_f , se obtiene a partir de la ecuación siguiente [Incropera,2001]:

$$\frac{T_s - T_{sal}}{T_s - T_{ent}} = e^{\left(\frac{-hf A_{p,t}}{\rho V A_{c,b} C_p}\right)} \quad \text{Ec... 2.18}$$

Donde ρ y V son la densidad y la velocidad de entrada, respectivamente, y $A_{p,t}$ es el área de la sección transversal del medio poroso que para nuestro caso es el área interna del tubo de vidrio tipo borosilicato.

2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los materiales utilizados en procesos de fotocátalisis solar deben cumplir con una resistencia mecánica y con una buena permeabilidad en la longitud de onda de entre 290 -360 nm (Luz ultra violeta), así como una buena resistencia térmica. Por esa razón, en este trabajo se propone un experimento con el que se pretende estudiar el comportamiento mecánico térmico de un tubo absorbedor de vidrio tipo borosilicato, con un acoplamiento de esferas en el interior por el cual circulará un fluido de trabajo, variando el caudal de entrada al medio de prueba, utilizando un concentrador de canal parabólico simple que se ubica en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

2.2.1 Descripción del sistema de experimentación y del equipo utilizado.

El sistema utilizado es el acoplamiento de un concentrador de canal parabólico simple como el mostrador en la figura 2.6, diseñado originalmente para la generación de vapor de agua, éste se encuentra ubicado en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM, localizada en la Ciudad de México a $19^\circ 19'6.9''$ de latitud norte, $99^\circ 11'29.7''$ de longitud oeste y a una altitud de aproximadamente 2330 m, sobre el nivel del mar. La Planta Solar, se divide en ocho módulos de concentradores conectados en serie, cada uno con longitud de 15 m y un área de captación de aproximadamente 34 m². Teniendo un área total de captación de 272 m².

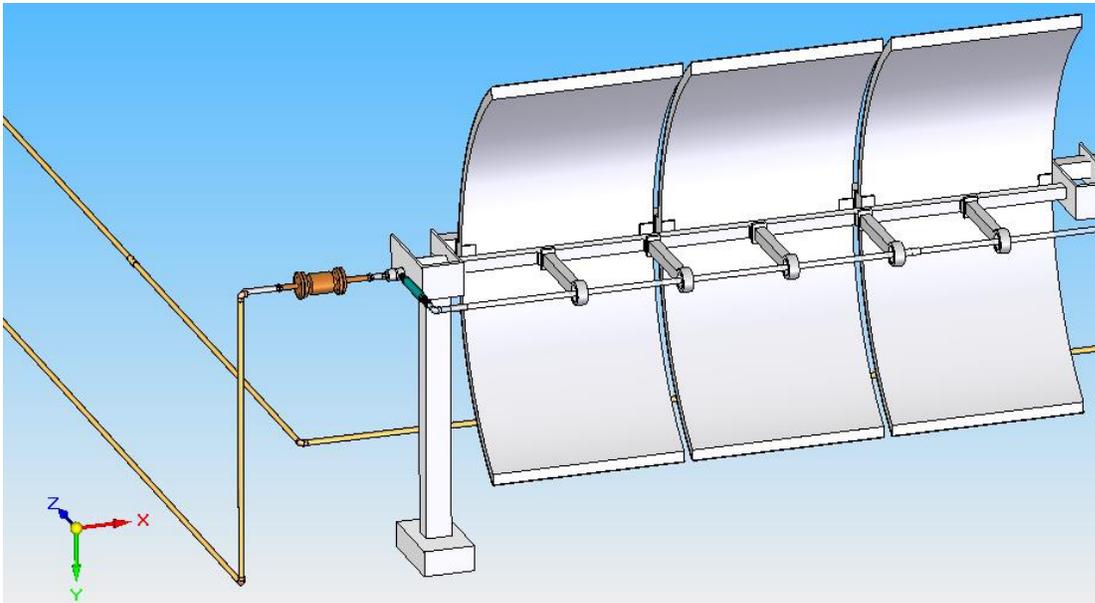


Figura 2.4 Concentrador parabólico simple.

Para el experimento se utilizó un módulo de 15 m de longitud y de 34 m² de captación, habilitado para el propósito del experimento. La adaptación consistió en cambiar el tubo de acero cromado usado para absorción de calor, por un tubo de vidrio tipo borosilicato, en el cual se pretende aprovechar la parte UV del espectro solar, sin embargo también se tiene la influencia de la parte infrarrojo actuando sobre el mismo. Cabe mencionar que el tubo en su interior cuenta con 1500 esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm de diámetro para simular un lecho poroso, utilizando como fluido de trabajo agua con tinta negra (con un nivel de opacidad del 65%).

La superficie reflejante de la estructura de los concentradores que conforman el módulo de prueba tiene una reflejancia especular de aproximadamente 0.85. y el tubo utilizado que tiene un diámetro exterior de 26 mm, y un diámetro interno de 23 mm, hecho de vidrio tipo boro silicato comercial.

Este experimento contiene un medio poroso de prueba para lo cual se utilizan esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm de diámetro, empaquetadas de tal forma que el fluido pueda pasar libremente, aunque sufriendo algunos cambios en velocidad, temperatura y presión.

Para el fluido de trabajo en este experimento se utiliza agua alterada con tinta negra a una proporción de 1 ml de tinta negra por cada litro de agua y sin tener residuos en el tubo de vidrio al aumentar la temperatura, cabe mencionar que lo importante es la tonalidad y no la composición química que se genera. Teniendo un fluido de trabajo

con una opacidad del 65% aproximadamente e inicialmente a temperatura ambiente alrededor de 21 °C.

La figura 2.7, muestra el sistema de prueba que consiste en un tinaco, tubería de acero hasta la entrada del medio poroso, un medio poroso de 3 m de longitud y 26 mm de diámetro externo, una bomba de agua con regulador, un medidor de flujo y sensores de temperatura y presión, que más adelante se explicará a detalle la forma en que se utilizaron y se posicionaron.

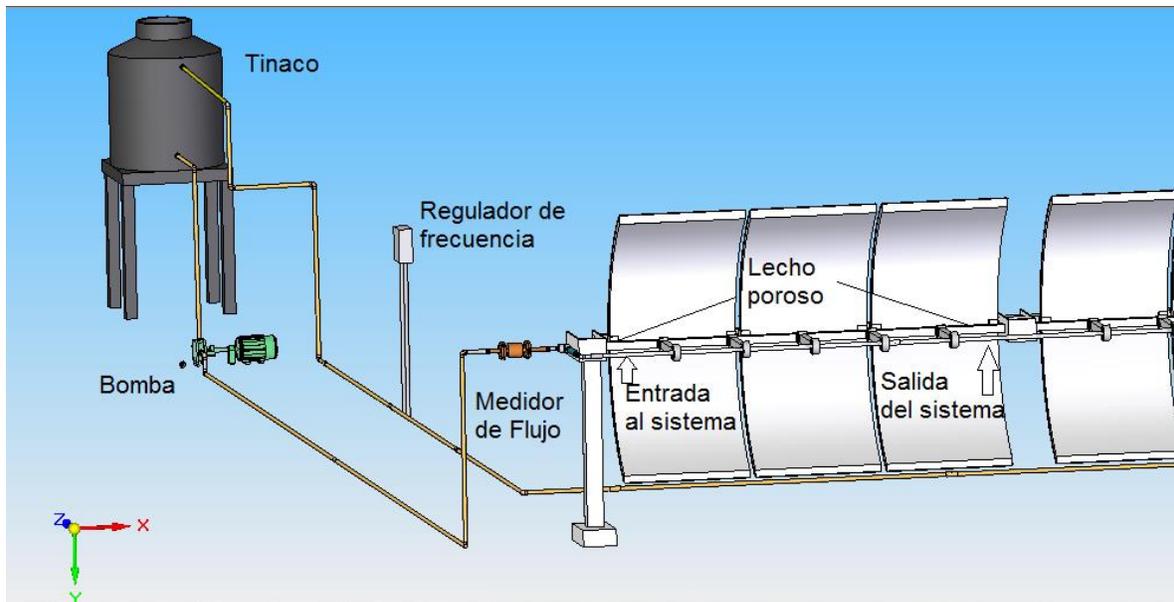


Figura 2.5. Diagrama del experimento

El circuito de experimentación consta de los siguientes elementos:

- Un módulo de concentración de 12 concentradores de canal parabólico simple, cada uno de los concentradores cuenta con un ancho de 1.18 m aproximadamente y 2.4 m de largo.
- 34 metros cuadrados de área de captación para todo el módulo.
- Tubo absorbedor de vidrio tipo boro silicato de mediana calidad de 3 m de largo.
- Un medidor electrónico de flujo.
- 2 Transductores de presión de la marca MSI fabricados en acero posicionando uno a la entrada y otro a la salida.

- 10 sensores de temperatura tipo LM35AH
- Tarjeta de adquisición de datos del tipo NI USB-6216 de la marca *National Instruments*.
- 1500 esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm con diámetro de 10 mm
- Un sistema de seguimiento solar.
- Un tanque almacenador de agua de 1000 L
- Tubería de acero para transportación del fluido desde el tanque hasta la entrada del sistema de captación
- Bomba para la recirculación de fluido de trabajo
- Regulador de frecuencias
- Estación meteorológica.

En la tabla 2.1 se muestra las especificaciones de los elementos del sistema mostrados en el diagrama de la figura 2.5.

Tabla 2.1 Especificación de los elementos del sistema

No de elementos	Nombre	Ubicación	Función
1	Medidor de flujo	Entrada del medio poroso	Envía una señal analógica en la que se puede cuantificar el flujo a la entrada del proceso.
1	Transductor de presión	Entrada del medio poroso	Envía una señal digital que se puede decodificar con una tarjeta de adquisición de datos y ser transmitida a una computadora para el uso en cálculos.
1	Transmisor de Temperatura	Entrada del medio poroso	Envía una señal digital que se puede decodificar con una tarjeta de adquisición de datos y ser transmitida a una computadora para el uso en cálculos.
1	Transductor de presión	Salida del medio poroso	Envía una señal digital que se puede decodificar con una tarjeta de adquisición de datos y ser transmitida a una computadora para el uso en cálculos.
1	Transmisor de Temperatura	Salida del medio poroso	Envía una señal digital que se puede decodificar con una tarjeta de adquisición de datos y ser transmitida a una computadora para el uso en cálculos.
8	Transmisor de temperatura	Superficie del tubo de prueba	Envía una señal digital que se puede decodificar con una tarjeta de adquisición de datos y ser transmitida a una computadora para el uso en cálculos

A continuación se explican los detalles y características de cada elemento utilizado que forma parte del equipo de experimentación

Bomba

La alimentación del fluido de trabajo al campo de prueba se lleva a cabo utilizando una bomba de turbina regenerativa de doble etapa (figura 2.6) cuya capacidad de bombeo es de hasta 32 L/min, con una presión máxima de 16.5 bar (550 ft H₂O); dicha bomba impulsada por un motor de 3 hp de potencia, cuya regulación se hace por medio de un regulador de frecuencia.



Figura 2.6 Fotografía de la bomba utilizada para la recirculación

Regulador de frecuencia

Para controlar el caudal del fluido de trabajo emitido por la bomba se utilizó un regulador de frecuencias de la marca SIEMENS que permite contralar la velocidad de la bomba, aumentando o disminuyendo la frecuencia del giro de la flecha que esta acoplada en la bomba y que controla la velocidad del caudal (Figura 2.7)



Figura 2.7 Regulador de la frecuencia del giro en la bomba, ubicado en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM

Tabla 2.2 . Características del variador de frecuencia.

Alimentación de entrada	1-3 AC, 230 V, 47-63 Hz
Potencia de salida	2.2 KW
Corriente continua de salida	4 k WA
Corriente de salida	9 A
Potencia motor salida	3.0 HP

Medidor de flujo

A la entrada del medio poroso se encuentra un medidor electrónico de flujo, que es de la marca Toshiba, con un diámetro para el paso de 1 in, manejando rangos de flujo desde .1 m/s hasta 5 m/s. aproximadamente.



Figura 2.8. Fotografía del Medidor de flujo a la entrada del medio de prueba.

Transductor de presión

Los transductores de presión utilizados son de la marca MSI y mandan una señal en forma de voltaje de entre 0.5 y 5 V con una precisión de $\pm 0.25\%$ y trabajan a una temperatura de 40 a 125 °C. Estos transductores al igual que los sensores de temperatura son conectados a una tarjeta de adquisición de datos modelo NI-USB-6216, la misma que es conectada a un puerto USB de una computadora, en donde por medio de un software realizado en la plataforma de Labview los datos son analizados.



Figura 2.9 Fotografía de Transductor de presión a la entrada y a la salida del medio de prueba.

Sensor de temperatura

Los sensores de temperatura utilizados son sensores de contacto de la marca "NATIONAL SEMICONDUCTOR tipo LM35AH son circuitos integrados de precisión, sensores de temperatura que emite un voltaje linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius. El sensor proporciona precisión típica de $\pm 1/4$ °C a temperatura ambiente y maneja un rango de temperatura de -55 a 150 °C.



Figura 2.10. Sensor de temperatura LM35AH

Tarjeta de adquisición de datos

Se utilizó una tarjeta de adquisición de datos de la compañía Texas Instruments modelo USB-6216, cuyo objetivo es interpretar las señales enviadas por los

sensores y los transductores de temperatura y presión respectivamente y enviar los datos a una PC por medio de un cable USB.

La forma en que la tarjeta adquiere los datos de los sensores es en forma de voltaje, y estos valores son interpretados por un software para transformarlos a las unidades correspondientes, que para el caso de presión, las unidades de medición son Pascales y para las temperaturas grados Celsius °C. Las especificaciones de la tarjeta se encuentran en la tabla 2.3.



Figura 2.11 Tarjeta de adquisición de datos

Tabla 2.3 Características de la tarjeta de adquisición de datos modelo USB-6216

Características	Valor
Canales	16,8
Resolución	16 bits
Voltaje máximo de entrada	-10 A 10 [V]
Voltaje máximo de salida	-10 A 10 [V]
Sistema operativo	Windows

Estación meteorológica

Los datos de la radiación utilizados en la experimentación fueron adquiridos de la estación meteorológica ubicada en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería, UNAM, la cual es mostrada en la figura 2.12. La estación es de la marca *Ascension Technology* (AT) equipada con un piranómetro de banda giratoria de sombra, que mide la irradiancia global horizontal, la irradiancia difusa horizontal y calcula la irradiancia normal. La estación cuenta además con un sensor de temperatura ambiente y un anemómetro que registra velocidad y dirección del viento.



Figura 2.12 Estación meteorológica en la Planta Solar, Instituto de Ingeniería. UNAM.

Depósito del fluido de trabajo

Se utilizó un depósito para el fluido de trabajo de la marca ROTOPLAS con capacidad de 1000 L, de color negro, y modificado con tuberías de acero para nuestro propósito, el cual se muestra en la figura 2.15



Figura 2.13. Fotografía del depósito del fluido de trabajo, utilizado como contenedor del fluido de trabajo en la recirculación

2.2.2 Condiciones de trabajo

El tubo de vidrio tipo borosilicato se encuentra sometido a diferentes fenómenos físicos naturales y provocados, las condiciones de trabajo del tubo en su parte interna son diferentes a las condiciones de trabajo en la parte externa. La superficie externa considera condiciones climatológicas y la energía que entra al sistema, mientras que la superficie interna se encuentra sometida principalmente a efectos convectivos ocasionados por el fluido de trabajo y también a la energía de entrada al sistema.

El tubo está inmerso en un fluido (aire) en contacto con la superficie exterior de la geometría cilíndrica que cuenta con una temperatura propia y un estado dinámico. El estado térmico del tubo es afectando, por pérdidas y ganancias de energía interna (en el material) hacia el exterior del mismo.

Hay que considerar la energía suministrada al tubo y la forma en que él mismo es capaz de conservarla. La relación que existe entre las alteraciones de las propiedades del material de trabajo (vidrio tipo boro silicato) y la energía suministrada (radiación solar) por el concentrador solar es uno de los aspectos importantes a evaluar, ya que el tubo está pensado en ser utilizado en un reactor para fotocatalisis solar y cuanto más se aproveche la energía, sin alterar el estado

crítico (dígase ruptura o deformación) del vidrio será mucho más eficiente el sistema y la reacción catalítica.

Por otro lado, las condiciones de trabajo internas reflejan la manera en la que el material está siendo alterado de acuerdo a los requerimientos de ganancia de energía del fluido de trabajo durante el proceso.

Una de las propiedades con mayor complicación para el conocimiento de fenómenos térmicos dentro del tubo es el coeficiente de convección térmico del fluido de trabajo (agua con opacidad) debido a que la temperatura es muy cambiante al igual que la velocidad y la temperatura.

En conjunto, las condiciones térmicas de trabajo externas e internas del tubo de vidrio tipo boro silicato, altera la forma atómica del material, haciendo vulnerable a “caer” en un estado crítico, produciendo daños en su forma y en su estructura interna, produciendo expansión o ruptura. Ya que el proceso en general es un fenómeno estable pero en un estado transitorio.

En el experimento se hizo cambiando el caudal de trabajo que se refleja en un incremento o decremento gradual de las propiedades térmicas del material en estudio para observar su comportamiento durante el proceso, y cuantificando las alteraciones que sufre por las condiciones de trabajo. Dígase condiciones climatológicas y controladas en la prueba.

2.2.3 Metodología de pruebas

Para iniciar el experimento se llevó a cabo una serie de actividades previas de acondicionamiento a la forma original en que operaban los concentradores. Consistió en cambiar el tubo absorbedor de acero cromado, por un tubo absorbedor de vidrio tipo borosilicato, con las dimensiones geométricas (26 mm), quitando también el tubo concéntrico de vidrio que protegía al tubo de acero.

Además se cambió la superficie reflejante que estuviese dañada, por una de mejor calidad para garantizar el correcto funcionamiento, revisando en cada uno de los concentradores las condiciones óptimas de trabajo. Posterior a esto, se llenó el tubo de vidrio, con esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm de diámetro. Así mismo se llevó acabo la colocación del tubo de prueba (vidrio tipo boro silicato), y de las esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm, que funcionarían como medio poroso (esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm de 10 mm de diámetro), poniendo

soportes y elementos de amortiguamiento para las vibraciones que pudieran generarse durante el proceso, mismos que fueron fabricados con un polímero resistente a la temperatura. Para terminar la recirculación del sistema se completó el circuito con tubería de acero, es decir, la bomba, el depósito de agua, el medidor de flujo, están conectados con tubería de acero y únicamente el tramo del módulo de concentración solar (12 m) es la tubería de vidrio tipo borosilicato. Antes de la colocación de los dispositivos de medición se calibró también la posición de los concentradores del módulo de prueba para que la zona de concentración fuera lo más lineal posible, para que la radiación en el tubo se pudiera considerar constante en dirección de su eje de simetría.

Por último, después de armar el sistema de trabajo se procedió a colocar los dispositivos de medición, que son los transmisores y transductores de temperatura y presión, respectivamente. Una vez colocados se calibraron para un funcionamiento fidedigno, en cuanto a los sensores se conectaron a una tarjeta de adquisición de datos y esta última a una computadora para el análisis de resultados.

2.2.4. Pruebas realizadas

Las pruebas realizadas en este experimento consistieron en poner en marcha el sistema de prueba y monitorear los valores de presión y temperaturas de entrada y salida del sistema, así como las temperaturas en la periferia del tubo de vidrio tipo boro silicato, con un intervalo de tiempo de 5 min entre cada lectura y con una irradiancia próxima a 800 W/m^2 .

Una prueba diaria consistía en tomar lecturas cada 5 minutos con un caudal fijo utilizado de 2 L / min, 2.5 L / min, 3 L / min o de 4 L / min, hasta completar 32 tomas de lecturas. Para otro día se cambiaba el caudal y se procedía a tomar el mismo número de lecturas, lo cual se hizo repetitivamente durante varios días, dependiendo de las condiciones climatológicas hasta observar que el comportamiento de los valores tomados fuera similar.

Para la puesta en funcionamiento del sistema en cada prueba se utilizó la siguiente secuencia de pasos.

1. Verificar que se cuenta con agua suficiente para todo el recorrido del sistema.
2. Conectar el medidor de flujo, a la entrada del sistema de prueba (Tubo de vidrio con lechos porosos).
3. Posicionar correctamente los sensores de temperatura.

4. Conectar los sensores tanto de temperatura como de presión, a la tarjeta de adquisición de datos.
5. Encender la computadora con el programa elaborado para este experimento basado en la plataforma de *Labview* 6.5.
6. Encender el seguidor solar y el control de la bomba, el primero elaborado en el departamento de instrumentación y control del Instituto de Ingeniería, UNAM.
7. Revisar y mantener cerradas las válvulas de seguridad y de purga encontradas a la entrada y a la salida del sistema de prueba.
8. Encender la bomba y ajustarla según el flujo requerido en cada prueba, cabe señalar que en este experimento se trabajaron con flujo de 2,2.5,3 y 4 L / min.
9. Esperar a que el sistema se encuentre en estado transitorio y estable, esto se logra en unos minutos, cuando aire contenido en el sistema es eliminado y se estabiliza dinámicamente el fluido, manteniendo constantes sus propiedades de velocidad y turbulencia, principalmente.

La forma en que se guardaban los datos en cada toma de lecturas se explica a continuación.

2.2.5 Adquisición de datos

Para la adquisición de datos o lecturas de los transmisores y transductores de temperatura y presión respectivamente se elaboró un programa computacional basado en la plataforma de *Labview* 6.5 , para el cual se consideran datos iniciales fijos y otros adquiridos. El programa fue elaborado por el editor de esta tesis con ayuda del departamento de instrumentación del Instituto de Ingeniería, UNAM, mismo que se encuentra a cargo del M. I Lauro Santiago Cruz.

En la figura 2.14 se muestra la pantalla de inicio de dicho programa.

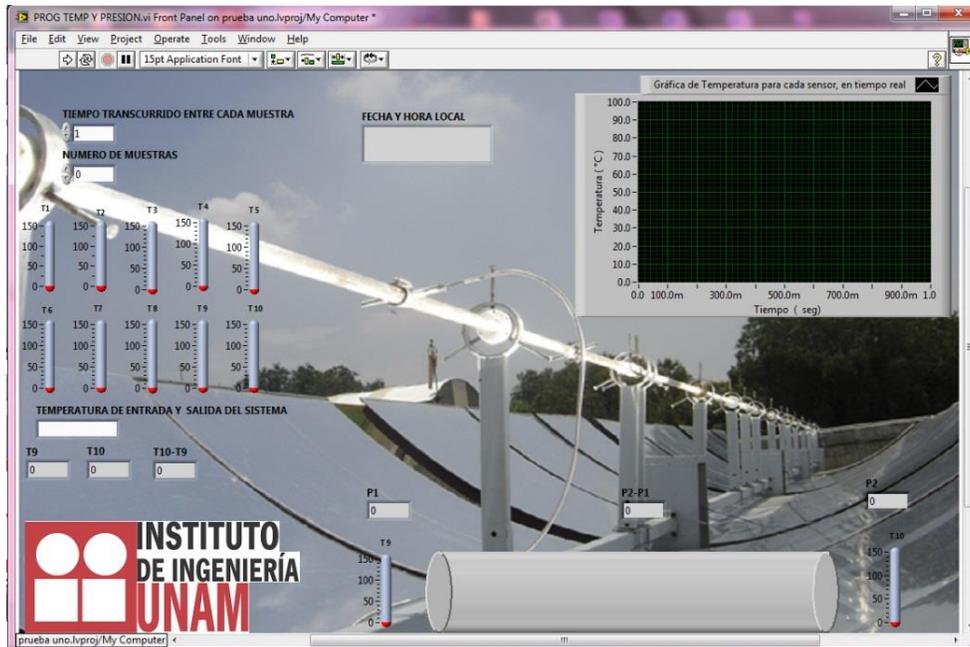


Figura 2.14 pantalla de inicio del programa para la adquisición de datos.

Es un programa básico, con el cual solo se controla, el intervalo de tiempo de las pruebas, así como el número de las mismas, permitiendo poner un intervalo de tiempo entre cada toma de mediciones, recolectando los valores tomados de cada prueba, en un archivo de Excel con terminación *.xls.

Recordemos que la distribución de los sensores de temperatura se ha hecho como se muestra en la figura 2.15.

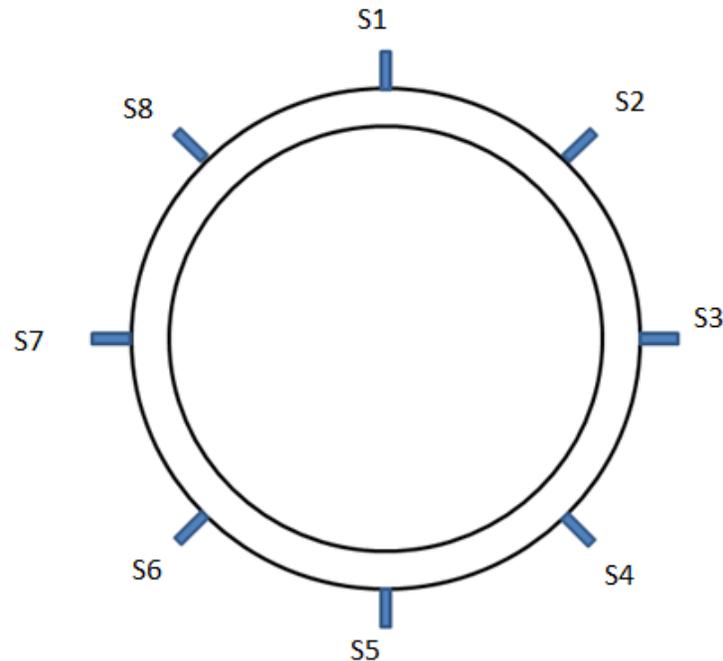


Figura 2.15 Vista transversal del tubo, de la distribución de los sensores de temperatura.

De la figura 2.14, podemos observar en la parte izquierda superior de la pantalla inicial del programa, se muestran en tiempo real los valores de las temperaturas sobre la superficie del tubo. En la parte superior derecha se aprecia una gráfica en tiempo real de los valores de los transmisores y transductores de temperatura y de presión respectivamente.

Del lado derecho inferior, se muestran los valores de presión y de temperatura a la entrada y a la salida del tubo de prueba.

Las variables iniciales designadas por el usuario son principalmente, el número de muestras que va a tomar el programa, y el tiempo que habrá entre cada una de las tomas designadas en la pantalla del programa como; TIEMPO TRANSCURRIDO ENTRE CADA MUESTRA [min], y NÚMERO DE MUESTRAS.

En las pruebas realizadas para este experimento, se usan intervalos de tiempo de 5 min, entre cada toma de datos.

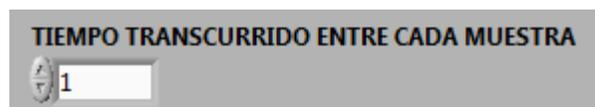


Figura 2.16 Tiempo transcurrido entre cada muestra

En el espacio que dice NÚMERO DE MUESTRAS, se debe de poner el número de tomas o muestras que queremos que el programa realice, para nuestro caso el número de muestras se tomaban de 50.

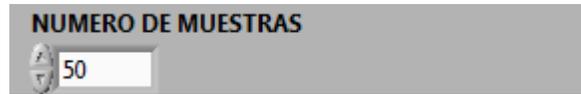


Figura 2.17 Número de muestra.

Este programa ilustra los valores tomados de temperatura sobre la superficie del tubo, también las temperaturas a la entrada y a la salida, así como los valores de presión de entrada y de salida en el tubo de prueba.

Después de que el programa termina de realizar la toma, el número de veces requerido, se genera un archivo de Excel, que permite analizar los resultados.

CAPITULO III. RESULTADOS

A continuación se mostrará gráficamente los resultados obtenidos tanto teóricos como experimentales, de acuerdo a los valores obtenidos de la evaluación de la ecuación de difusión térmica (Ecuación 2.6), así como el comportamiento real de temperaturas medidas en la superficie del tubo, la caída de presión del fluido de trabajo al cruce por el medio poroso, las temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo al paso por el medio poroso, velocidad y temperatura del aire en contacto con la superficie externa del tubo, al momento de las pruebas.

Con dichos valores medidos se puede mostrar el comportamiento dinámico y térmico del medio y además el comportamiento mecánico térmico del material (borosilicato) del tubo y así mismo las condiciones térmicas del material del medio poroso (vidrio sódico-cálcico de 10 mm de diámetro). Lo anterior es resultado de evaluar el modelo propuesto en el capítulo II, ecuación 2.3, 2.4 y 2.5 (dependiendo de la posición del nodo en cuestión).

3.1 Propiedades de los fluidos y materiales utilizados en las pruebas.

La superficie externa del tubo de vidrio tipo borosilicato a estudiar, estuvo sometido aproximadamente a las mismas condiciones de aire en todas las pruebas realizadas, con las siguientes propiedades promedio para aire:

Tabla 3.1 Propiedades del aire en las prueba realizadas.

PROPIEDADES DE AIRE A 21°C			
μ_a	2.08E-05	[N s/m ²]	VISCOCIDAD DINÁMICA
ν_a	2.09E-05	[m ² /s]	VISCOCIDAD CINEMATICA
β_a	0.0029	[K ⁻¹]	COEF. DE EXPANSION TÉRMICA
k_a	0.03	[W/m K]	CONDUCTIVIDAD TERMICA
$C_{pa} =$	1009.1	[J/kg K]	CAPACIDAD CALORIFICA
$D =$	0.026	[m]	DIAMETRO EXTERNO DEL TUBO

De acuerdo a la resolución de la ecuación 2.7 y utilizando el valor calculado del número adimensional de Nusselt de la ecuación 2.6, así como respetando las consideraciones para la validarlo, el valor calculado para “ h_a ” (coeficiente de

convección de la superficie externa de tubo de vidrio tipo borosilicato y el aire), es el siguiente:

$h_{\text{aire}} = 13.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ (a una velocidad promedio de un día de prueba de 1.18 m/s, y a una temperatura ambiental de aproximadamente 22°C)

Las ecuaciones 2.6 y 2.7 están basadas en resultados empíricos obtenidos por diferentes investigadores, en experimentos relacionados con este fenómeno y que son mencionadas por Incropera en el 2001, en su libro “Fundamentos de Transferencia de calor” y utilizada también por Martínez en el 2005, y muchos investigadores más. Por lo cual dicha ecuación es considerada verdadera a pesar de ser de origen empírico.

Cabe mencionar que para tener un valor representativo de h_{aire} , se utilizó un valor promedio de las temperaturas del aire y de la velocidad del mismo, en los días de pruebas, asegurándose de que la desviación estándar entre ellos fuera mínima y buscando en los días de pruebas que esto se cumpliera.

El fluido de trabajo es agua con tinta de color negro, elegida así, para tener mayor concentración de energía y poder observar mejor los fenómenos térmicos en el sistema, ya que si el agua fuese transparente la absorción de energía sería mínima casi no observable. Las propiedades del fluido de trabajo utilizado en el experimento son similares al agua, sin embargo, ya que tiene una opacidad del 60% , cambian las propiedades de absorción y su aspecto, teniendo un mayor valor de calor específico y mayor conductividad térmica, pero sin cambiar la propiedad de viscosidad, que se mantiene como si no tuviera alteración.

Tabla 3.2 Propiedades del fluido utilizado.

PROPIEDADES DEL FLUIDO UTILIZADO			
$C_p =$	1	J/Kg*K	calor específico
$k_{\text{agua}} =$	0.6	W/m*K	Conductividad térmica.
$\mu =$	1.3E-05	N*s/m ²	Viscosidad

Las propiedades del vidrio tipo borosilicato utilizado, se presentan en la tabla 3.3, en donde se observa la resistencia del material tanto para la difusión térmica, como para la alteración de sus enlaces atómicos debido a la temperatura (dilatación térmica). Siendo estas propiedades de nuestro interés en la resolución de los modelos propuestos.

Tabla 3.3 Propiedades del vidrio tipo Boro silicato.

Propiedades del bosilicato		
D =	0.0000001	m/°c
K _{boro} =	1.3	W / m K

3.2 Comportamiento dinámico del fluido de trabajo, al cruce por el medio poroso.

Todas las pruebas realizadas en este experimento se hicieron con aproximadamente las mismas condiciones ambientales, la misma densidad de irradiancia solar 800 W/m^2 , realizándolas con una posición solar semejante en todas las pruebas (muy próximo al medio día solar), misma posición que depende del día y el lugar de prueba.

Del comportamiento dinámico del fluido derivan muchos otros fenómenos, que se cuantifica de acuerdo a los valores y tendencia del coeficiente de fricción y de la caída de presión que tiene el fluido al cruzar por el medio poroso. El coeficiente de fricción se puede relacionar con el desgaste de materiales. Así mismo la caída de presión, se puede relacionar con el tiempo de residencia de fluido en el medio poroso.

Recordemos que las pruebas fueron hechas en un medio simulado poroso con esferas de vidrio sódico-cálcico de 10mm de diámetro, con una longitud de 3 m y un diámetro interno del tubo de 23 mm, que los caudales utilizados fueron de 2 L/ min, 2.5 L/ min , 3 L/ min y 4 L/ ,min.

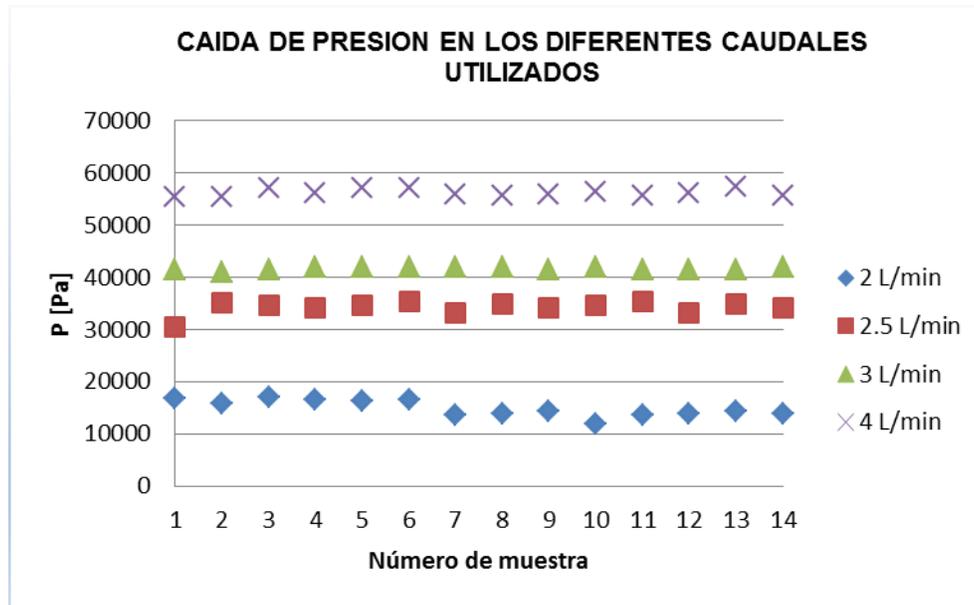


Figura 3.1 Gráfica de la caída de presión en los diferentes caudales, utilizados.

En la figura 3.1, se observa que a mayor caudal, mayor es la caída de presión, esto sucede por que se genera mas turbulencia alrededor de las esferas que forman el medio poroso, como lo observaremos mas adelante, también con el número adimensional de Reynold. Estas lecturas fueron realizadas con un transductor de presión a la entrada del sistema y otro a la salida, con características ya mencionadas y con un tiempo de prueba considerable de aproximadamente 2.5 hrs, para cada caudal., en un día representativo de pruebas.

Otra propiedad importante a observar, es el factor de fricción de Darcy para lo cual se modificó el cálculo tradicional para medios porosos, cuyo razonamiento se encuentra en el capítulo II, ya que este valor es relacionado con la caída de presión y con el cambio de la velocidad, se puede observar que a medida que se aumenta el caudal, el factor de fricción disminuye(figura 3.2), lo que indica que la caída de presión aumenta a razón del aumento del caudal. Recordando que al aumentar el caudal en la superficie de una esfera la capa límite turbulenta, se retrasa y disminuye la cantidad de vortice sobre la estela que forma el fluido sobre la esfera, pero aumenta la turbulencia promedio del fluido por el empaquetamiento del medio.

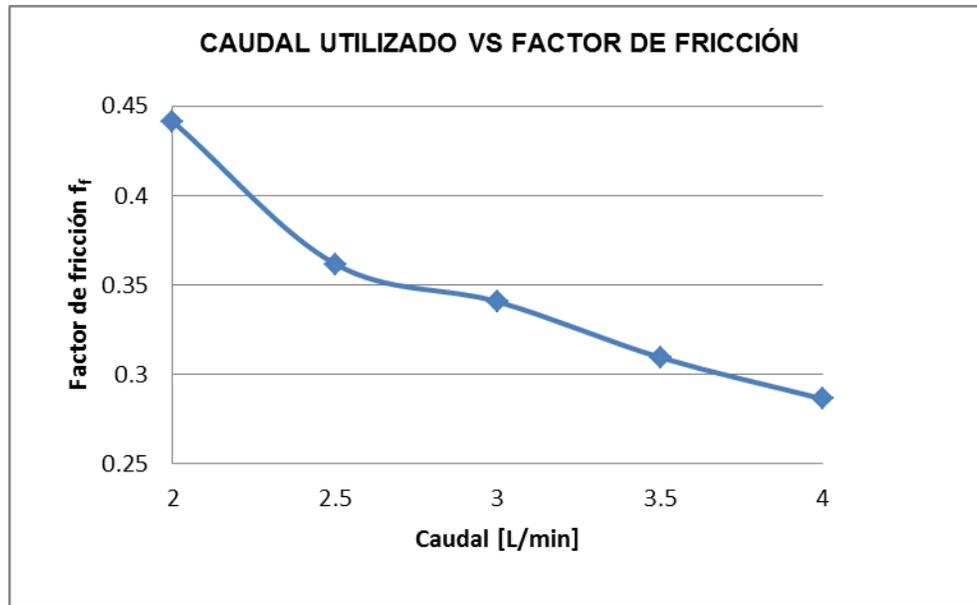


Figura 3.2 Gráfica del factor de fricción Darcy, para cada uno de los flujos utilizados

Cuando aumentamos el caudal, la turbulencia también lo hace, y esto se observa en la figura 3.3, en donde gráficamente observamos el aumento del número adimensional de Reynold (número adimensional que indica el nivel de turbulencia) al aumentar el caudal, dicho fenómeno se comporta de manera cuasilineal.

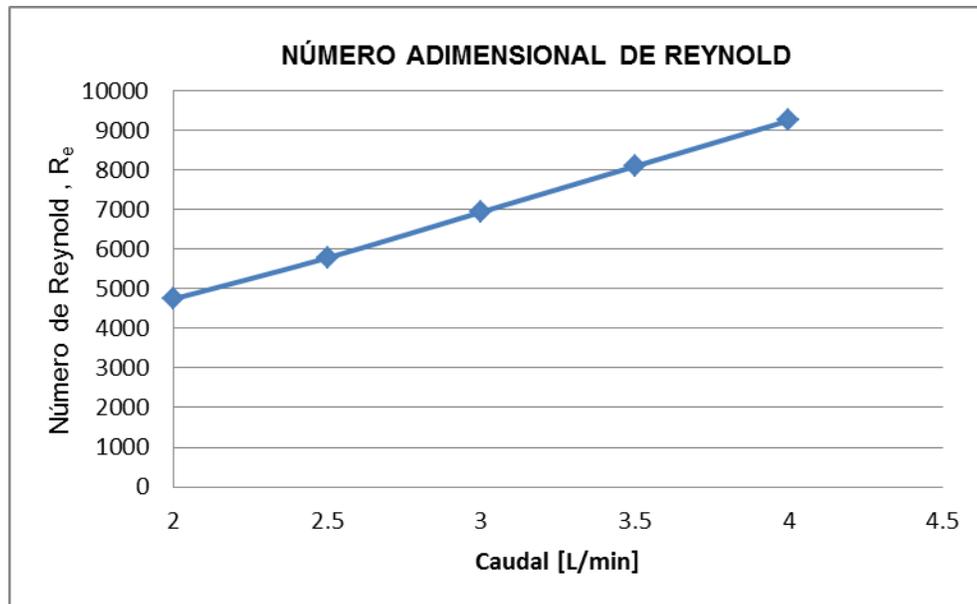


Figura 3.3. Gráfica del comportamiento del número de Reynold en relación con el caudal usado.

El incremento del caudal además provoca cambios, como la disminución del factor de fricción con el aumento de la turbulencia del fluido. Si aumentamos el nivel de turbulencia del fluido, es decir, si el número adimensional de Reynold aumenta, el factor de fricción disminuye.

En la figura 3.4 se observa que el factor de fricción disminuye al aumentar el número de Reynold, lo cual significa un aumento en el ángulo de desprendimiento de la capa límite, disminuyendo la estela de turbulencia derivada de este fenómeno sobre las esferas que forman el medio poroso.

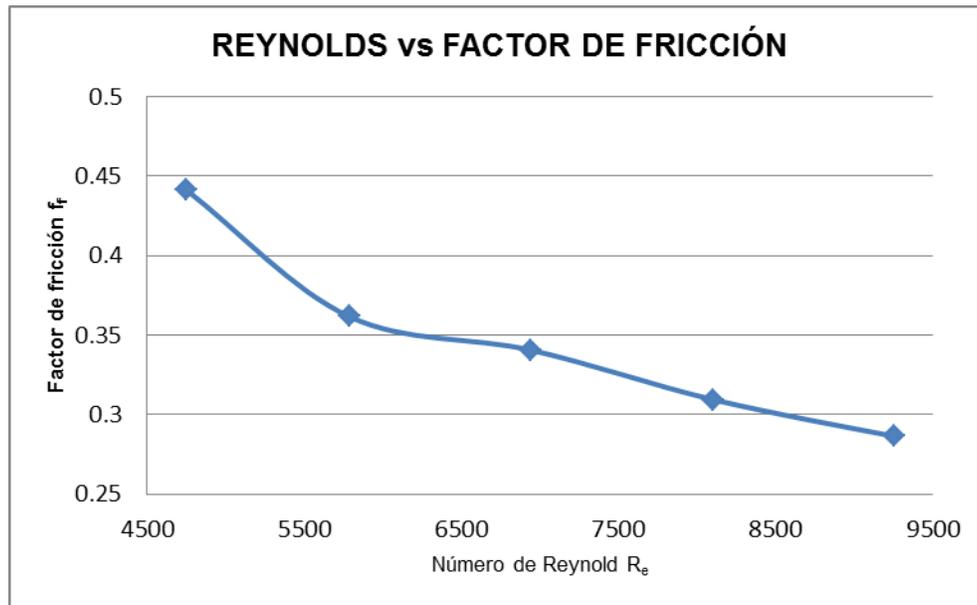


Figura 3.4. Gráfica del comportamiento del factor de fricción, en relación al número de Reynold

En general, las propiedades observadas anteriormente permiten concluir que a medida que se aumenta el caudal, aumenta el número de Reynold y la caída de presión, pero disminuye el factor de fricción. Teniendo un comportamiento ya conocido en la literatura para un medio poroso delimitado por una superficie cilíndrica.

3.2 Coeficiente de convección térmica, dentro y fuera del tubo de vidrio tipo Borosilicato.

El fenómeno de convección de calor presentado sobre el tubo de vidrio tipo Borosilicato, tanto en la pared interna como en la externa, es diferente, teniendo consideraciones en la zona que se quiera analizar el fenómeno. En la pared exterior, el tubo se somete a una convección natural del aire que circula en la periferia del mismo, afectando el equilibrio térmico de la superficie externa. En la pared interior existe un fenómeno de convección forzada, mismo que es ocasionado por el fluido que cruza el medio poroso en el interior del tubo de vidrio tipo borosilicato.

El cálculo de la convección sobre la superficie exterior del tubo se hizo utilizando una ecuación empírica que permite saber el valor real de la convección alrededor del tubo, tomando valores promedios de temperatura y velocidad del aire, al momento de realizar la prueba.

Para el cálculo del valor de coeficiente de convección del fluido a través de un medio poroso, se necesitó saber la ganancia de calor que tiene el fluido al cruce por el mismo, desde el inicio hasta el final del medio. Sin embargo para dicho cálculo no se tiene una ecuación derivada de un comportamiento totalmente teórico, pero sí una ecuación derivada de conocimientos empíricos ganados de experimentos realizados por varios investigadores, como los realizados por Patiño (2007) y los expuestos por Bejan (1999). Misma ecuación que es el resultado de realizar un balance de energía y de conservación de momento para el fluido de trabajo y un balance de conservación de energía para las esferas que forman el medio poroso, estos balances se encuentran en el capítulo II de este mismo trabajo.

Ya que en este experimento se trabajó con caudales de 2 L/ min , 2.5 L/ min 3 L/ min y 4 L/ min, tomando lecturas en cada prueba de temperaturas a la entrada y salida del medio poroso, utilizando sensores electrónicos de contacto del tipo LM35AH, lo cual se puede apreciar en la tabla 3.4 y en la figura 3.5

Tabla 3.4 Temperaturas del fluido a la entrada y a la salida del medio poroso.

T_{ent} [°C]	T_{sal} [°C]	ΔT	Caudal [L/min]
28.10	34.70	6.60	2
28.40	34.90	6.50	
28.70	35.00	6.30	
27.90	33.20	5.30	
28.20	33.80	5.60	
27.90	33.10	5.20	
28.70	33.50	4.80	2.5
29.70	33.90	4.20	
28.40	32.30	3.90	
29.70	34.20	4.50	
30.50	34.70	4.20	
31.00	35.10	4.10	
33.60	35.00	1.40	3
33.60	35.00	1.40	
33.70	35.10	1.40	
33.80	35.20	1.40	
33.80	35.00	1.20	
33.70	35.10	1.40	
33.90	35.20	1.30	3.5
34.00	35.30	1.30	
34.20	35.40	1.20	
33.60	35.00	1.40	
34.20	35.10	0.90	
34.80	35.80	1.00	
35.20	36.00	0.80	4
35.50	36.20	0.70	
35.10	36.00	0.90	
35.30	36.20	0.90	
35.20	36.00	0.80	
35.60	36.50	0.90	

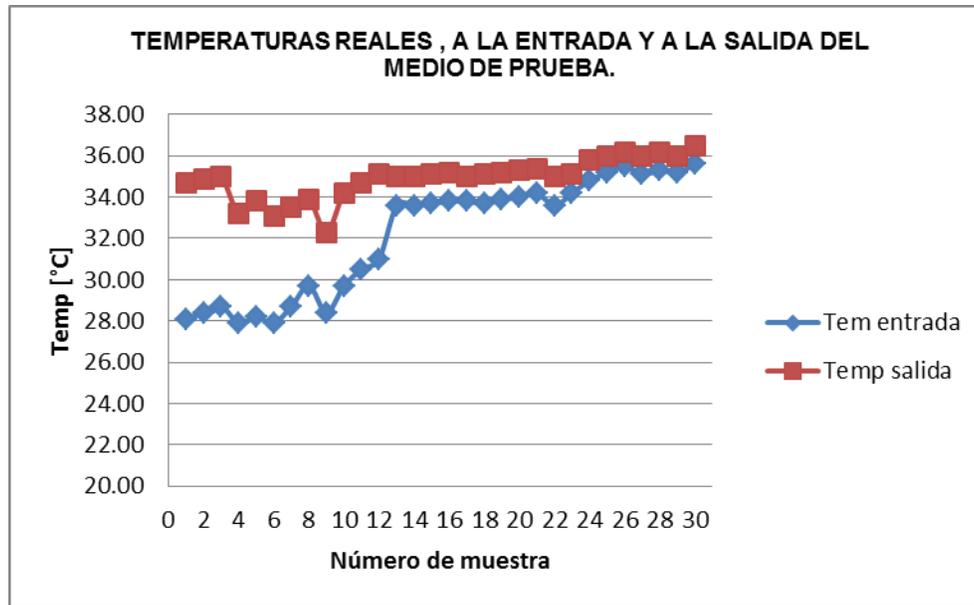


Figura 3.5. Gráfica de las temperaturas experimentales de entrada y de salida , del medio poroso

Se realizó una serie de pruebas especiales, para cada una de las pruebas se tienen 30 lecturas, de las cuales 6 son lecturas se hicieron con un caudal de 2 L/min y cada 6 lecturas se incrementó 0.5 L/ min el caudal, es decir, se inició la prueba con 2 L/ min y se terminó en 4 L/ min, con un intervalo de tiempo de 5 min para cada una de las tomas de datos. Como se puede observar en la figura 3.5 para un comportamiento promedio, al incrementar el caudal del fluido, la diferencia de temperatura de entrada y salida del medio poroso de prueba disminuye, esto se debe a que a mayor velocidad se tiene menos tiempo de residencia del fluido en medio poroso, y además menor transferencia de calor por radiación y conducción al fluido de trabajo.

La diferencia de temperatura de entrada y salida del medio tiende a disminuir. Como se puede observar en la figura 3.5 y en la tabla 3.4, cuando se incrementó el caudal, la diferencia de temperatura disminuyó, por esa razón para cada uno de los caudales se debe de calcular un valor del coeficiente de convección.

Para el caudal de 2 L/ min se tiene que la tendencia de la temperatura de salida se puede simular con un valor de $h_f = 4526 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, ya que dicho valor genera un comportamiento similar al real.

La figura 3.6 muestra gráficamente que el valor experimental y el valor teórico de la temperatura de salida son similares, si se utiliza el valor de “ h_{aire} ” propuesto. Cabe mencionar que se calcularon por lo menos 6 casos en los que se cumple esto.

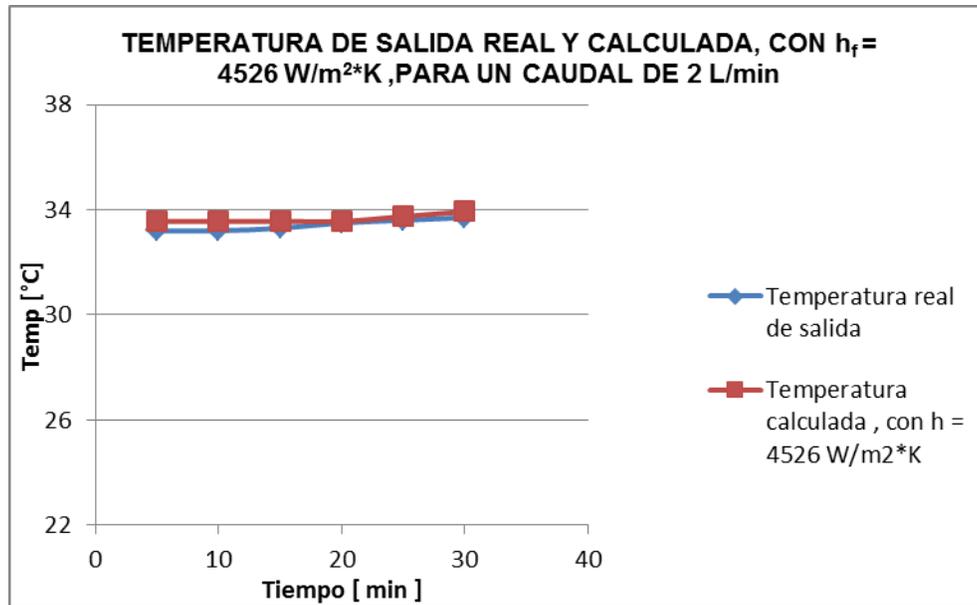


Figura 3.6 Gráfica de Temperatura de salida experimental y teórica con la propuesta de $h_f = 4526 \text{ W/m}^2\text{K}$ para un caudal de 2 L/min.

Utilizando la misma técnica se muestran a continuación los resultados de los valores de coeficientes de convección del fluido dentro del medio poroso para los caudales de 2.5 L/min, 3 L/min y 4 L/min.

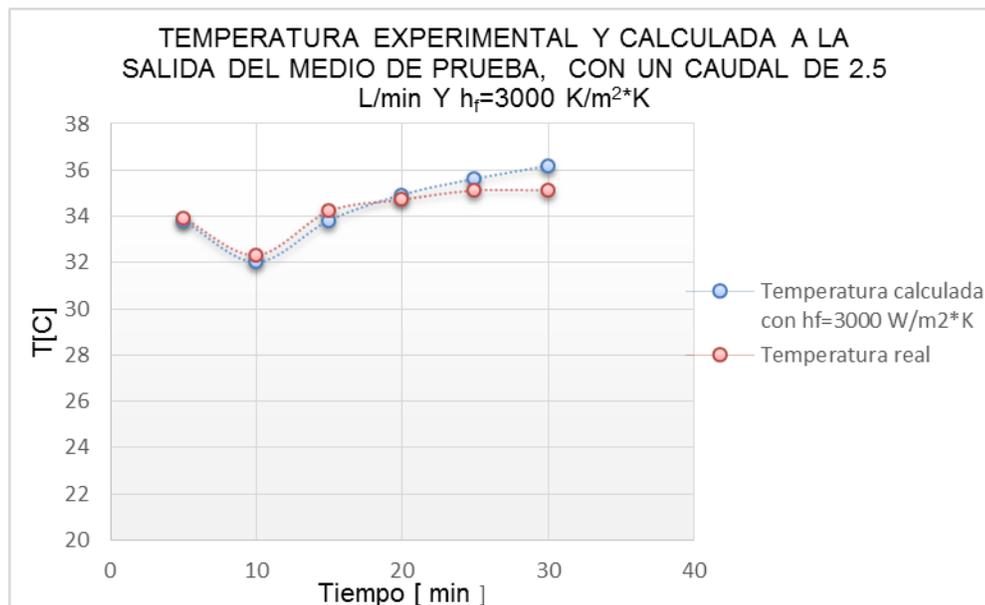


Figura 3.7 Gráfica de Temperatura de salida experimental y teórica con la propuesta de $h_f = 3000 \text{ W/m}^2\text{K}$ para un caudal de 2.5 L/min

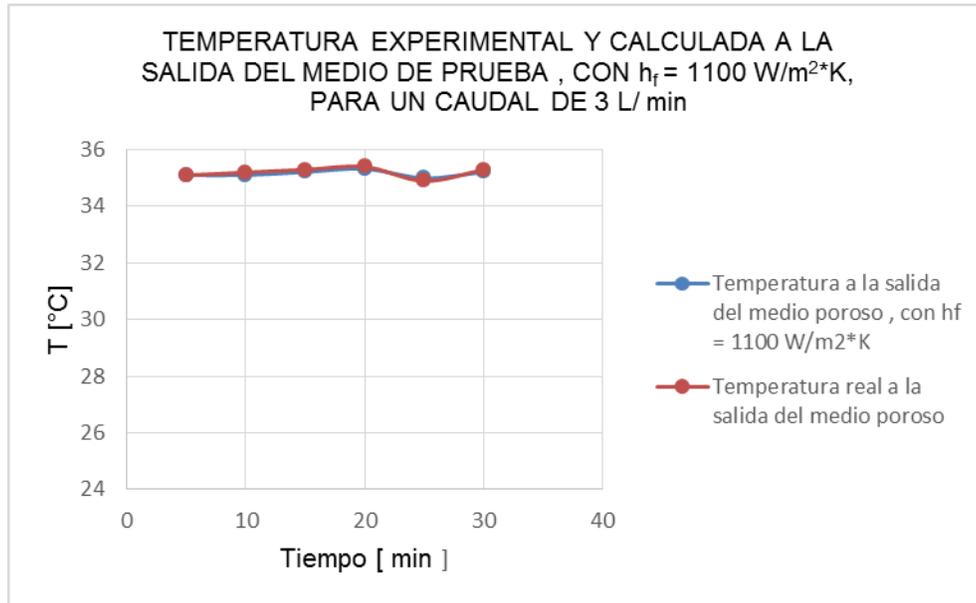


Figura 3.8 Gráfica de Temperatura de salida experimental y teórica con la propuesta de $h_f = 1100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para un caudal de 3 L/min

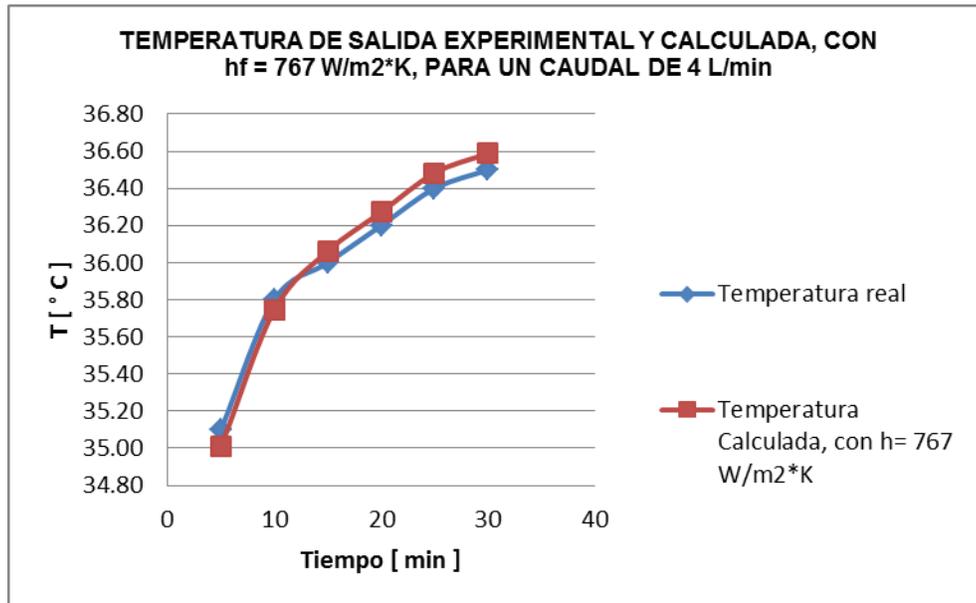


Figura 3.9 Gráfica de Temperatura de salida experimental y teórica con la propuesta de $h_f = 767 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ para un caudal de 4 L/min

De lo anterior se puede observar que conforme aumenta el caudal del fluido en el medio poroso, el coeficiente de convección térmica disminuye, por lo que la

ganancia de temperatura del fluido de trabajo es menor al aumentar el caudal. Como se puede apreciar en la figura 3.10, que se muestra a continuacion.

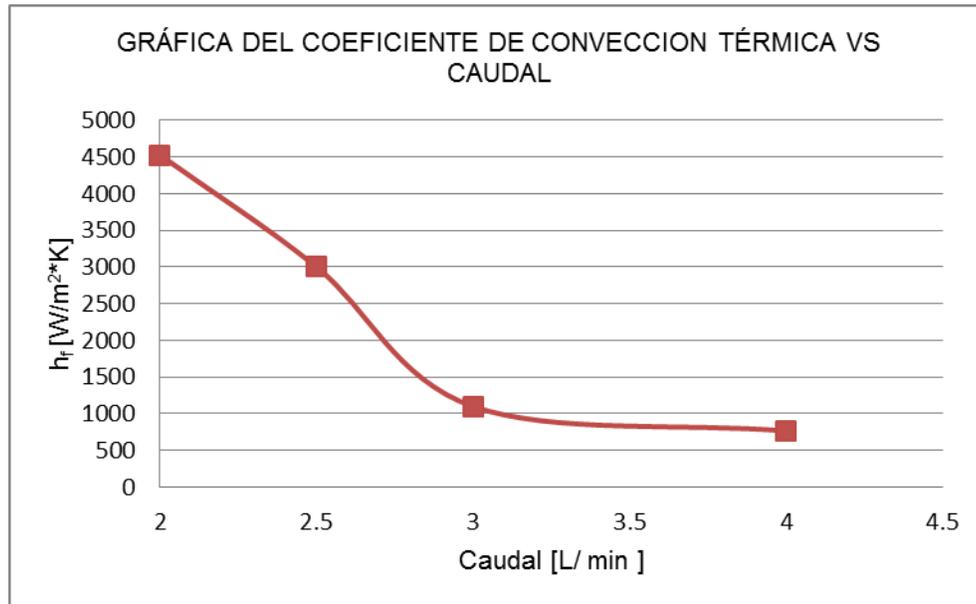


Figura 3.10 Gráfica del coeficiente de convección térmica en relación con el caudal utilizado.

El comportamiento del descenso del valor del coeficiente de convección térmica es casi de manera exponencial decreciente, al aumentar el caudal de trabajo.

A continuacion en la Tabla No 3.5 , se muestran valores de temperatura de entrada y salida , de este ultima se presenta el valor obtenido de la medicion y el estimado con el calculo derivado de la ecuacion propuesta

Tabla 3.5 . Resultados numéricos de la comparativa de la temperatura experimental a la salida del medio con la temperatura propuesta a la salida del medio.

Comparativa de temperatura de entrada y salida experimental y teórica.							
	Diferencia experimental, de las temperaturas de entra y salida del medio[K]	Diferencia Teórica, de las temperaturas de entra y salida del medio.[K]	Error	Temperatura estimada en la salida del medio de prueba.[K]	Temperatura experimental a la entrada del medio de prueba. [K]	Temperatura experimental a la salida del medio de prueba. [K]	Coficiente convectivo propuesto. [W/m ² *K]
2 [L/ min]	6.3	279.7597558	4.91675853	306.6597558	300.05	306.35	4526
	6.3	6.609755788	4.91675853	306.6597558	300.05	306.35	
	6.4	6.609755788	3.27743418	306.6597558	300.05	306.45	
	6.6	6.609755788	0.14781496	306.6597558	300.05	306.65	
	6.8	6.777091377	0.33689151	307.0270914	300.25	307.05	

CAPITULO III RESULTADOS

	7	6.275084608	10.3559342	305.9250846	299.65	306.65	
2.5 [L/min]	4.2	4.102095217	2.33106625	306.9520952	302.85	307.05	3000
	3.9	3.603709817	7.59718417	305.1537098	301.55	305.45	
	4.5	4.102095217	8.8423285	306.9520952	302.85	307.35	
	4.2	4.408793925	4.97128394	308.0587939	303.65	307.85	
	4.1	4.600480618	12.2068443	308.7504806	304.15	308.25	
	3.7	4.753829972	28.4818911	309.30383	304.55	308.25	
3 [L/min]	1.5	1.507432526	0.49550174	308.2574325	306.75	308.25	1100
	1.6	1.507432526	5.78546712	308.2574325	306.75	308.35	
	1.6	1.517757406	5.1401621	308.3677574	306.85	308.45	
	1.6	1.528082287	4.49485708	308.4780823	306.95	308.55	
	1.4	1.497107646	6.93626041	308.1471076	306.65	308.05	
	1.6	1.517757406	5.1401621	308.3677574	306.85	308.45	
4 [L/min]	0.9	0.809013107	10.1096548	308.1590131	307.35	308.25	767
	0.9	0.846270289	5.96996787	308.8962703	308.05	308.95	
	0.8	0.862237653	7.77970664	309.2122377	308.35	309.15	
	0.8	0.872882562	9.1103203	309.4228826	308.55	309.35	
	0.8	0.883527472	10.440934	309.6335275	308.75	309.55	
	0.8	0.888849926	11.1062408	309.7388499	308.85	309.65	

Por otro lado, el número de Nusselt es un numero que nos muestra la forma en que se lleva acabo la transferencia de calor por el fluido al entorno del mismo(Medio poroso y Tubo), y que puede ser con convección o por conducción térmica.

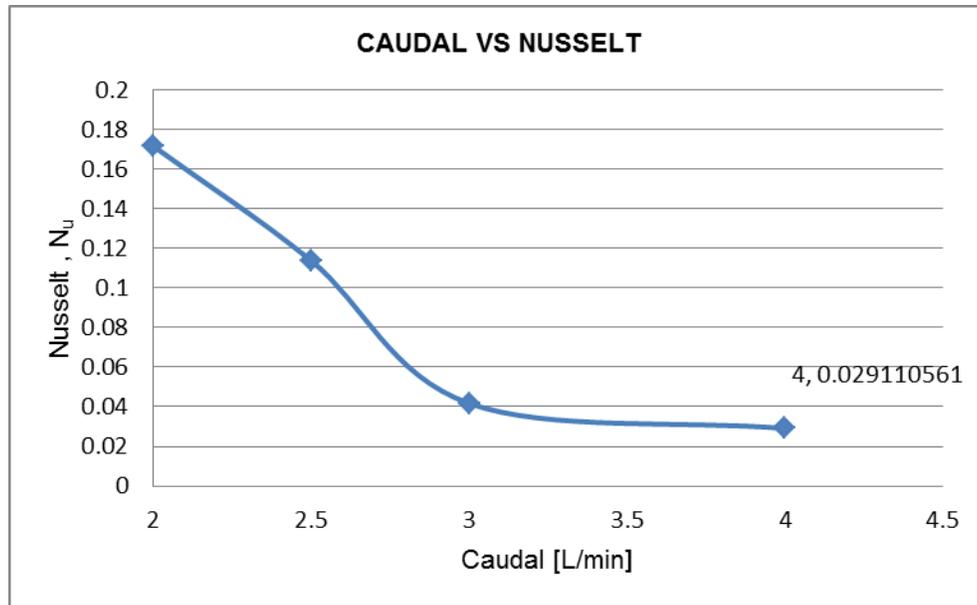


Figura 3.11 Gráfica de Caudal Vs el numero de Nusselt

Se observa que el número de Nusselt tiene la tendencia de disminuir al aumenta el caudal, esto indica que aumenta la transferencia de calor por conducción en el fluido, ya que la tranferencia de calor por conduccción, es inversamente proporcional al número de Nusselt. Lo anterior en conjunto con el comportamiento del coeficiente de conveccción térmica que se muestra en la figura 3.10, indica que al aumentar el caudal de fluidos aumenta el fenómeno de transferencia de calor por conducción en el mismo.

El interés más importante de esta tesis es el cálculo del perfil de temperaturas sobre las superficies del tubo de vidrio tipo borosilicato, que fue modelado en el capítulo II, y mostrado en las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5, sin embargo dicho modelo no se podía evaluar por falta de valores de coeficientes de conveccion del fluido externo e interno del tubo, pero ahora ya se conocen esos valores y se pueden conocer también los perfiles deseados, sin excluir las propiedades geométricas y de estructura atómica de materiales utilizado, así como las condiciones climatologicas al momento de las pruebas, cuales se tienen en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 . Propiedades y valores iniciales para el cálculo del perfil de temperaturas.

VALORES INICIALES		
$\Delta r =$	0.003000	.m
$r_2 =$	0.026000	.m
$r_1 =$	0.023000	.m
$\Delta\phi =$	0.392699	rad
$h_a =$	14.600000	$W/m^2 \cdot K$
$k_v =$	1.400000	$W/m \cdot K$
$\varepsilon_{sup} =$	0.100000	s/d
$\sigma_{sup} =$	0.000000	$W/m^2 \cdot K^4$
$T_{sup} =$	317.150000	K
$T_a =$	296.150000	K
$G_s =$	800.000000	W/m^2
$G_{atm} =$	436.144105	W/m^2
$\alpha_s =$	0.310000	
$\alpha_{atm} =$	0.800000	
$h_f =$	Dependiendo del caudal utilizado.	$W/m^2 \cdot K$
$T_{mf} =$	310.150000	K

Los valores de h_f cambian en los diferentes caudales usados , de acuerdo a la tabla 3.7 que se muestra a continuación.

Tabla 3.7 . Valores del coeficiente de convección térmica en el medio poroso, para los diferente caudales.

Caudal (L/ min)	h_f ($W/m^2 \cdot K$)
2	4526
2.5	3000
3	1100
4	767

A continuación se presentan los resultados del perfil de temperatura en las superficies interna y externa del tubo, considerando los valores de las variables antes mostrados en las tablas 3.5 y 3.6 ,para cada uno de los caudales 2 L/ min , 2.5 L/ min, 3 L/ min y 4 L/ min, de acuerdo a la red nodal propuesta para esta tesis, que se muestra en la figura 2.2 del capítulo II.

3.3 Análisis para un caudal de 2 L/min

A continuación se presentan los resultados experimentales y teóricos para los perfiles de temperaturas en las superficies interna y externa del tubo de vidrio tipo borosilicato con un medio poroso formado con esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm de diámetro, con un caudal de 2 L/ min.

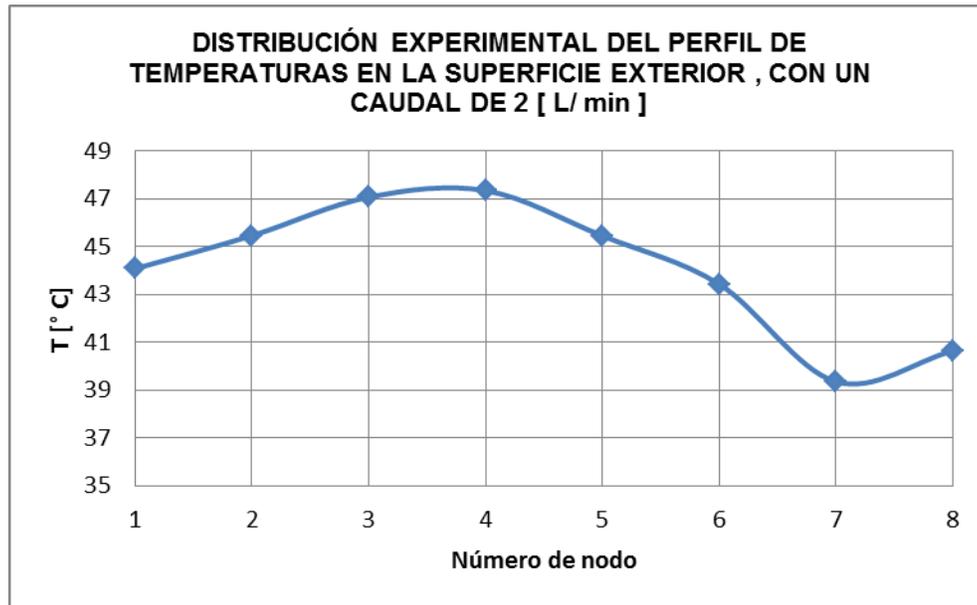


Figura 3.12 Gráfica del perfil de temperaturas experimental, para un caudal de 2L/ min

La figura 3.12, muestra el perfil de temperaturas experimental representativo, para la superficie exterior del tubo, en donde se observa que los nodos en la zona inferior del tubo presentan mayor valor en la temperatura, ya que es la zona con mayor incidencia de radiación solar concentrada.

A continuación se presentan los resultados de los perfiles de temperaturas calculados para la superficie externa e interna del tubo, con los modelos propuestos, teniendo como valores de referencia para los fluidos y para las propiedades de materiales, los presentados en la tabla 3.1, 3.2 , 3.3 y 3.5.

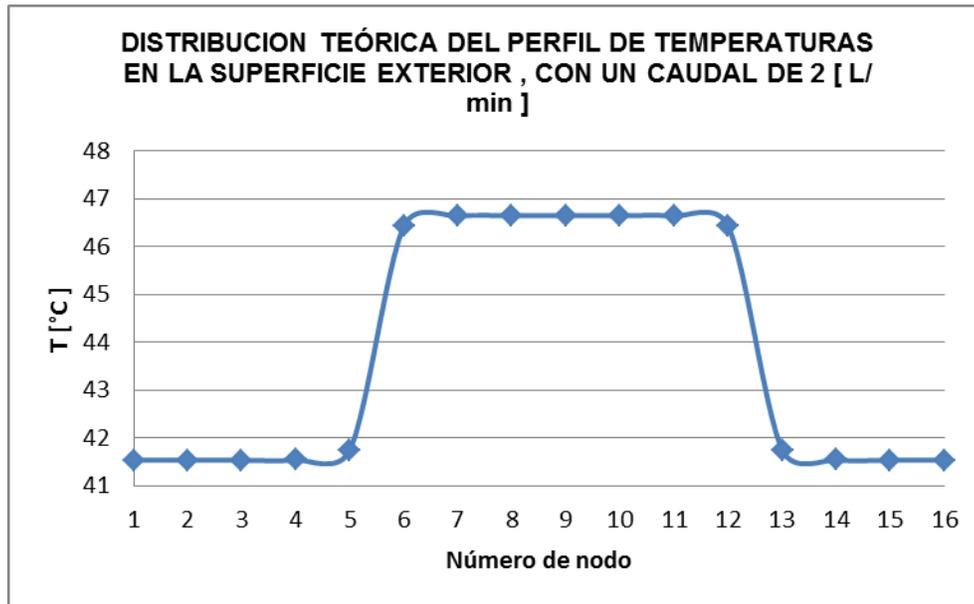


Figura 3.13 Grafica Ditrribución teórica del perfil de temperaturas en la superficie exterior del tubo de vidrio tipo borosilicato, con un caudal de 2 [L/ min]

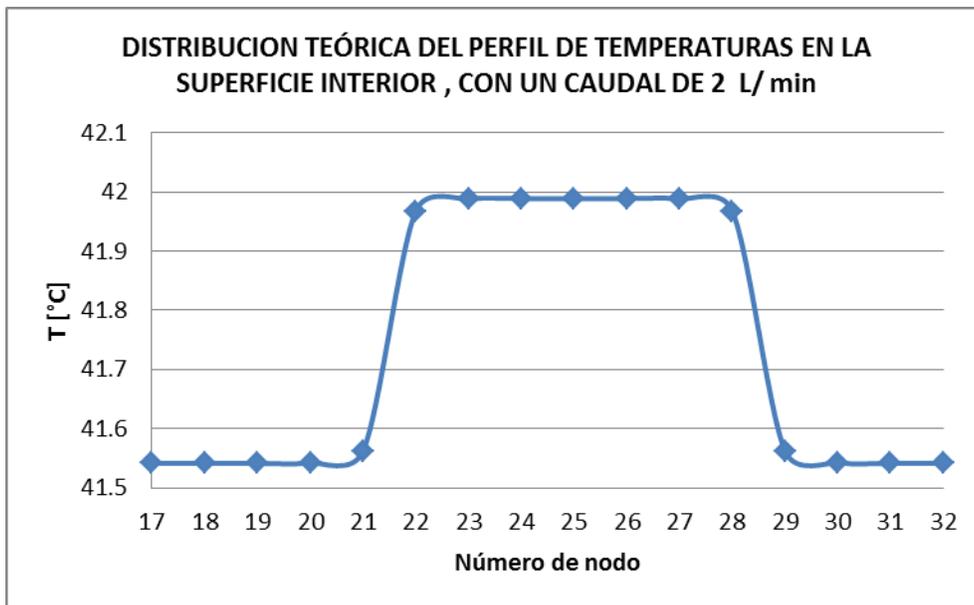


Figura 3.14 Gráfica de la ditribución teórica del perfil de temperaturas en la superficie interior , con un caudal de 2 L/min

Las figuras 3.13 y 3.14 muestran las gráficas de los perfiles de temperaturas teóricas para la superficie exterior e interior del tubo de vidrio tipo borosilicato respectivamente, con un caudal de 2 L/min, observándose un comportamiento ideal homogéneo y simétrico para ambos lados del tubo. Se aprecia que existe una diferencia de temperatura entre los nodos internos y los nodos externos, y además se observa que en los nodos zona superior e inferior, existe un gradiente de temperatura de casi 1 °C, por lo que no es posible generar un esfuerzo térmico dentro del tubo, capaz de producir ruptura o deformación. Para esta cantidad de flujo la ganancia de calor en el material es poca.

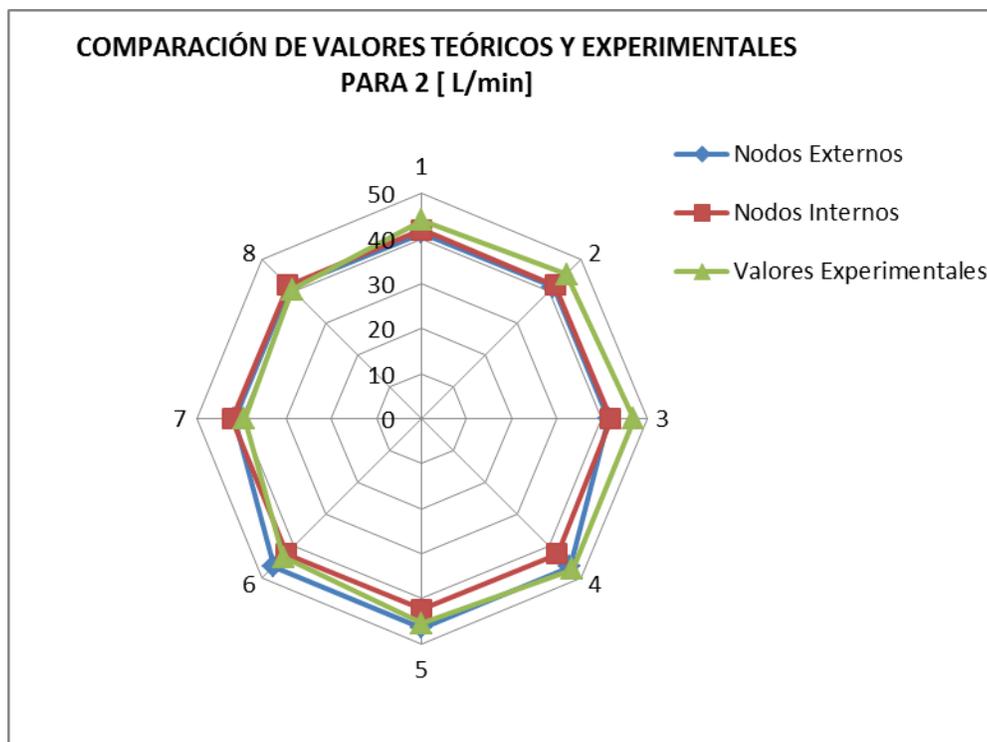


Figura 3.15 Gráfica de la distribución de temperatura teóricas, y experimentales, con 2 L/min.

En la figura 3.15, se muestra el perfil de temperaturas para la superficie externa, obtenido con el modelo propuesto teóricamente, que es muy similar al comportamiento experimental, por lo tanto el perfil calculado para las temperaturas en la superficie interna es aceptable.

Existe una temperatura máxima que alcanza el vidrio tipo borosilicato en la superficie externa, donde se podría generar una expansión en el material en múltiples direcciones ya que es un material amorfo, pudiendo generar ruptura dependiendo de la intensidad de la temperatura, misma que podríamos cuantificar en cada una de las pruebas experimentales para los diferentes caudales.

Por otro lado, las temperaturas de la superficie externa son diferentes a las temperaturas en la superficie interna existiendo un gradiente de temperatura en el espesor del tubo, siendo vulnerable a un esfuerzo térmico. Por esa razón es importante conocer dicha diferencia la cual se observa en la figura 3.16.

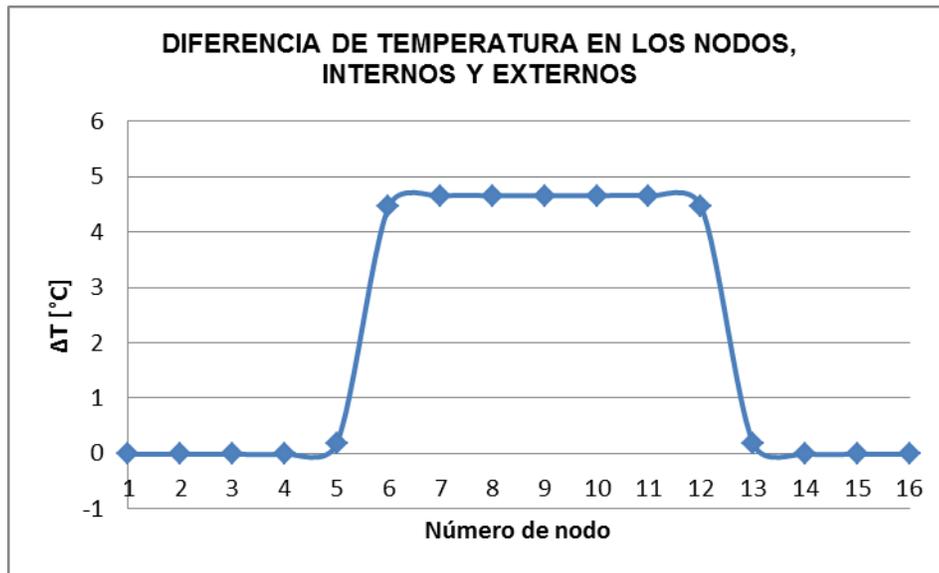


Figura 3.16 Diferencia de temperatura entre los nodos externo e internos.

Como se puede observar en la figura 3.16, en la parte inferior del tubo se podría generar expansión térmica del tubo de vidrio tipo borosilicato, debido a que el gradiente es mayor en esa zona, siendo una zona vulnerable a esta deformación ocasionada por el aumento en su temperatura. Sin embargo, para la experimentación con un caudal de 2 [L/min], la diferencia máxima de temperatura entre las superficies, ubicada en la zona inferior encuentra en un intervalo de entre 4.5 y 5 [°C] y de acuerdo al valor del coeficiente de expansión térmica del material, que se aprecia en la tabla 3.3 es muy pequeño, y dicha diferencia no genera ninguna deformación considerable para la estructura del tubo.

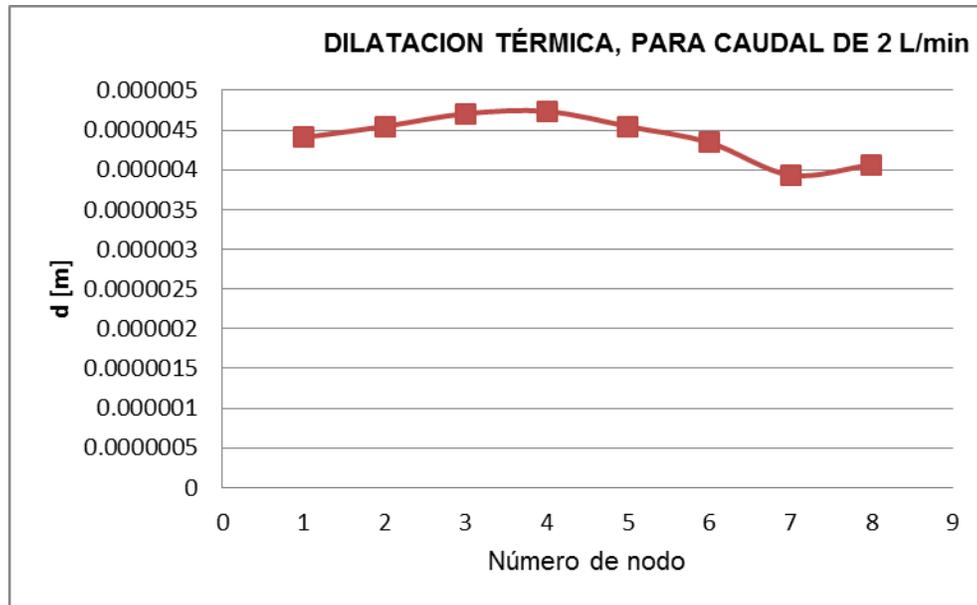


Figura 3.17. Gráfica de dilatación térmica del tubo de vidrio tipo borosilicato, con las temperaturas de la superficie exterior, para un caudal de 2 L/min.

La dilatación o expansión de origen térmica alcanzada con la mayor temperatura presentada en la superficie exterior del tubo, no genera deformación considerable como se puede apreciar en la figura 3.17, en donde la dilatación alcanza fracciones del orden de micras según los valores de la tabla 3.3, que de acuerdo a las dimensiones del tubo, no genera deformación considerable.

3.4 Análisis para un caudal de 2.5 L/min

A continuación se presentan los resultados experimentales y teóricos para los perfiles de temperaturas en las superficies interna y externa del tubo de vidrio tipo borosilicato con un medio poroso formado con esferas de vidrio sódico-cálcico de 10 mm de diámetro, con un caudal de 2.5 L/min.

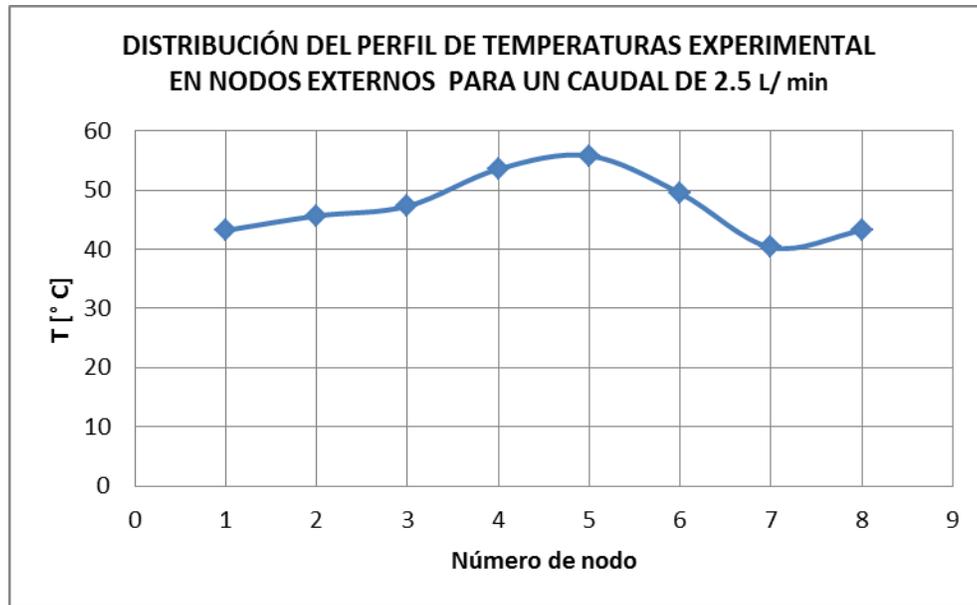


Figura 3.18 Gráfica de distribución experimental del perfil de temperaturas, para nodos externos, con un caudal de 2.5 L/ min

La figura 3.18 muestra el perfil de temperaturas en la superficie externa del tubo, obtenidos experimentalmente para un caudal de 2.5 L/min, en donde se observa mayor temperatura en la zona inferior debido a que es una zona con mayor energía concentrada.

En la figura 3.19 se muestra el perfil teórico de temperaturas, con un caudal de 2.5 L/min, considerando las variables de convección del aire y del fluido de trabajo, que se calcularon con anterioridad, en donde se puede apreciar que existe una diferencia de temperatura en la superficie externa superior y la superficie externa inferior, generando un gradiente de temperatura en la parte interna del tubo.

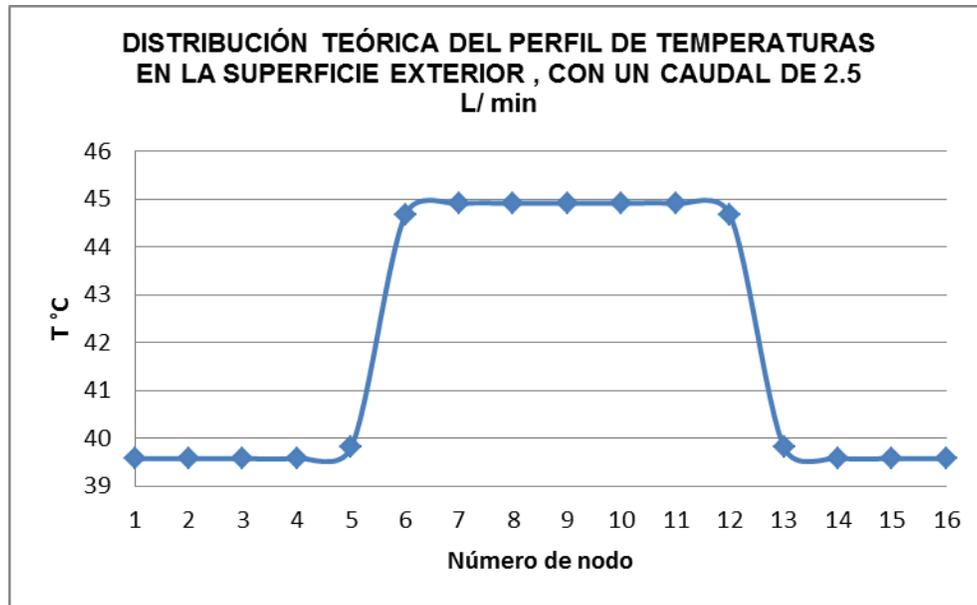


Figura 3.19 Gráfica del perfil de temperaturas teórico en la superficie exterior, para un caudal de 2.5 L/min

Las temperaturas aumentan en los nodos irradiados (nodos del 6 al 13, para la superficie exterior), por la concentración solar, de igual manera que en el perfil con un caudal de 2 L/min

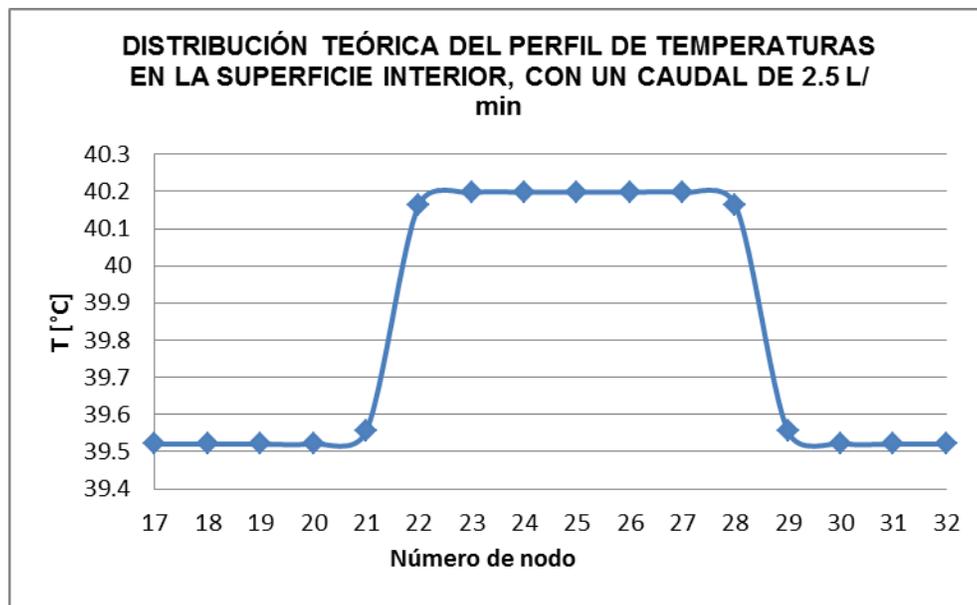


Figura 3.20. Gráfica del perfil de temperaturas teórico en la superficie interna, para un caudal de 2.5 L/min

En la figura 3.20 se aprecia una diferencia de temperatura en la superficie interior inferior y superior, de aproximadamente $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual no genera un gradiente de temperatura considerable en el material del tubo.

En la figura 3.21 Se presenta una comparación gráfica del perfil de temperaturas teórico y experimental sobre la superficie exterior, con un caudal de 2.5 L/min .

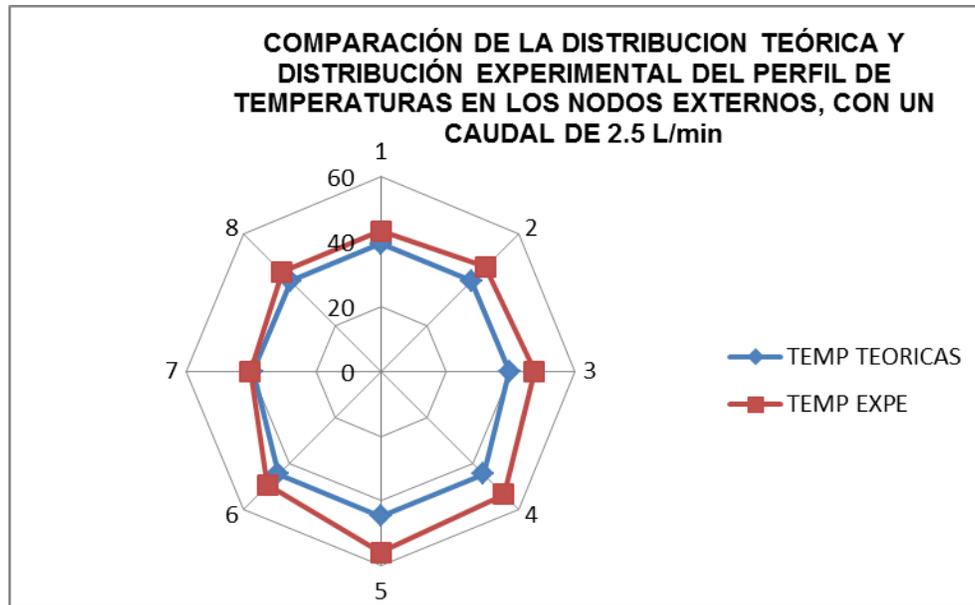


Figura 3.21 Gráfica de la comparación de temperaturas, modelo teórico y modelo experimental.

Tomando este comportamiento muy cercano al real se presenta la diferencia de temperatura entre los diferentes nodos, esta diferencia es de suma importancia para localizar posibles esfuerzos de origen térmico entre las paredes del tubo que podrían ocasionar ruptura en el material.

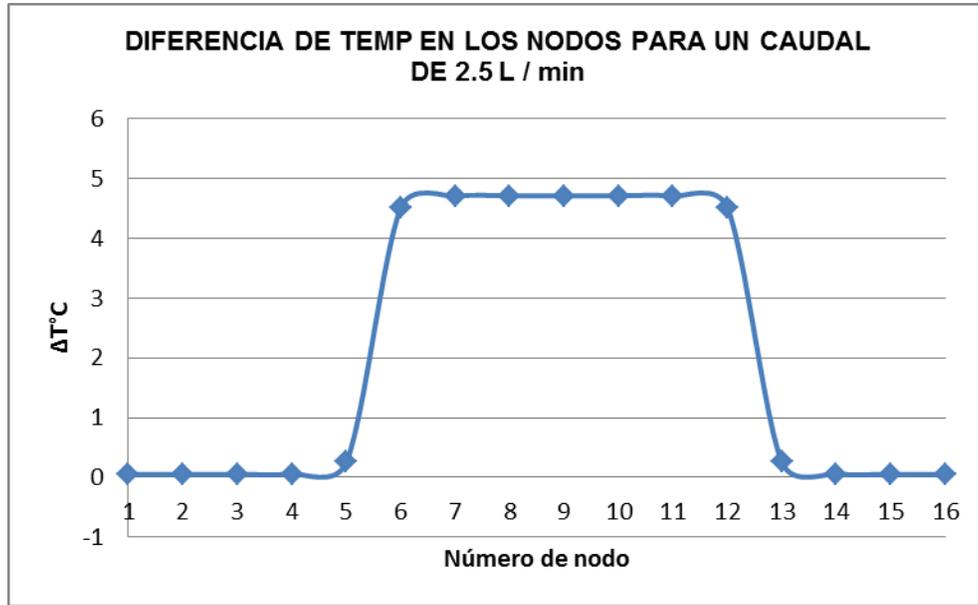


Figura 3.22 Gráfica de la diferencia teórica de temperaturas entre los nodos de las superficies externa e interna.

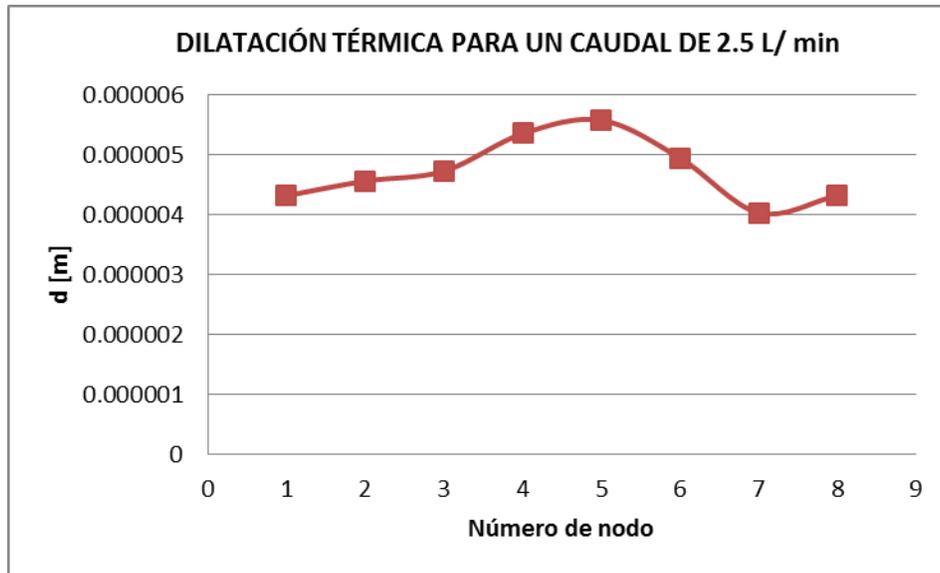


Figura 3.23, Gráfica de la dilatación térmica que presentó el tubo de vidrio tipo borosilicato a la mayor temperatura alcanzada.

Para un flujo de 2.5 L/min, disminuye un poco la ganancia de energía en el fluido de trabajo, derivado de la convección o la radiación, ya que el tiempo de residencia es menor. De igual manera la dilatación térmica es mayor que en las pruebas

realizadas con un caudal de 2 L/min, y se observa que en los sensores del 4 al 6, la energía almacenada en el material del tubo es mayor.

3.5 Análisis para un caudal de 3 L/min

Utilizando el mismo modelo y los parámetros ya mencionados, se presentan a continuación los resultados de los perfiles de temperaturas experimentales y teóricas en las superficies del tubo, con un caudal de 3 L/min.

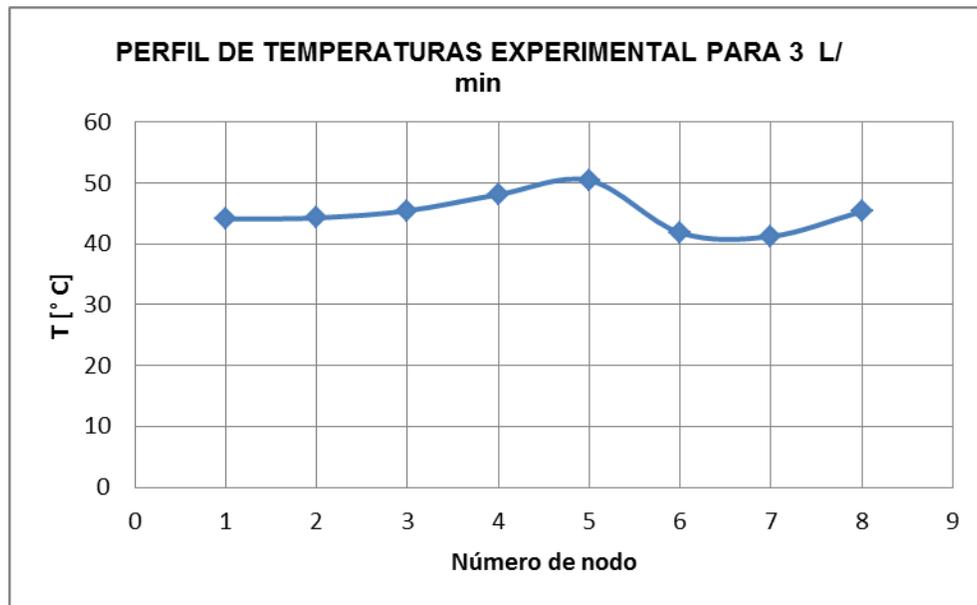


Figura 3.24 Gráfica del perfil de temperatura teórico en los nodos exteriores, para un caudal de 3 L/min

El perfil de temperaturas externas experimentales para un caudal de 3 L/min, tiene la misma tendencia que los observados con los caudales anteriores de 2 y 2.5 L/min.

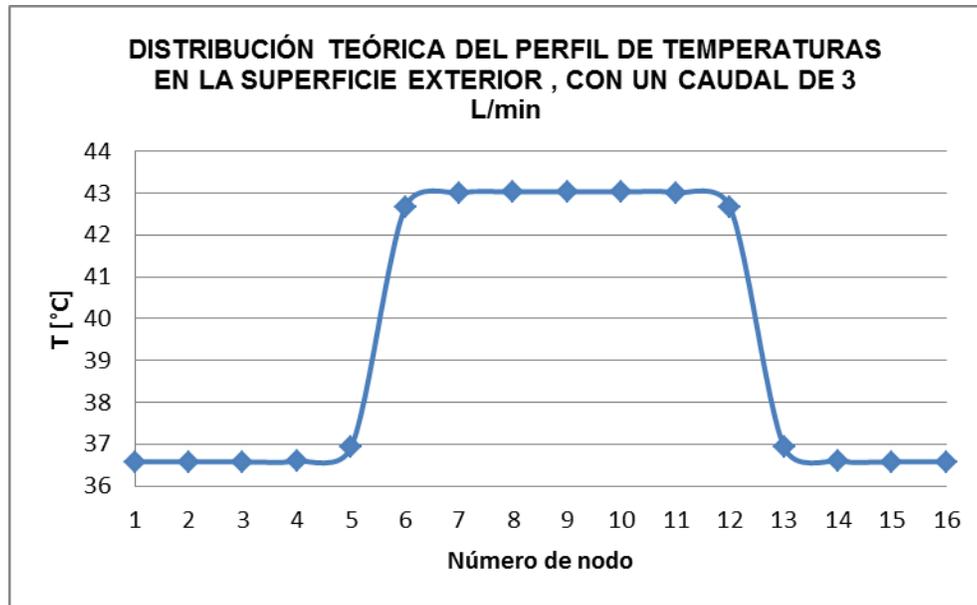


Figura 3.25 Gráfica del perfil de temperatura teórico en la superficie exterior del tubo de vidrio.

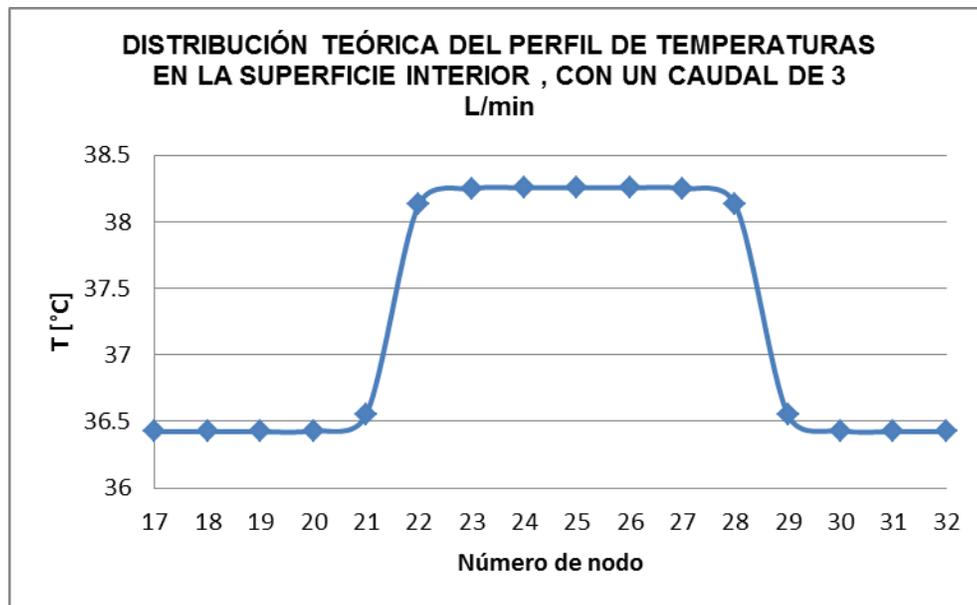


Figura 3.26. Gráfica del perfil de temperatura teórico en la superficie interior.

Las figuras 3.25 y 3.26 muestran los perfiles teóricos externos e internos respectivamente, para un caudal de 3 L/min, observándose la misma tendencia que los perfiles encontrados en pruebas con caudales de 2 y 2.5 L/min, no mostrando tampoco un incremento considerable de temperaturas en las superficies.

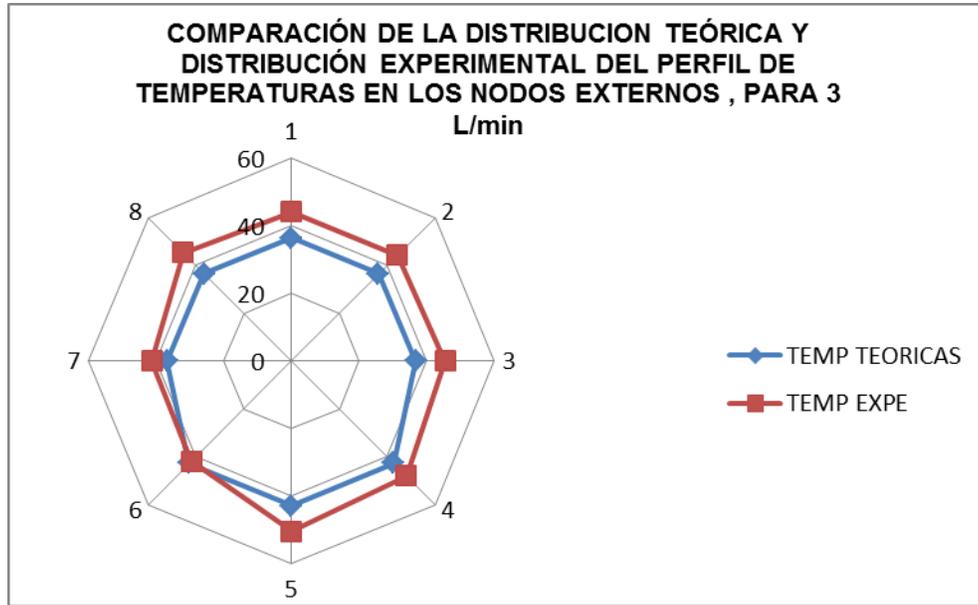


Figura 3.27 Gráfica de la Comparación del perfil de temperatura teórico y el perfil de temperatura experimental en la superficie exterior, para un caudal de 3 L/min.

En la figura 3.27, se muestra la comparación del modelo teórico con los resultados experimentales del perfil de temperaturas en la superficie exterior del tubo de vidrio tipo borosilicato, observándose una buena similitud, por lo tanto el modelo utilizado es adecuado y aceptable.

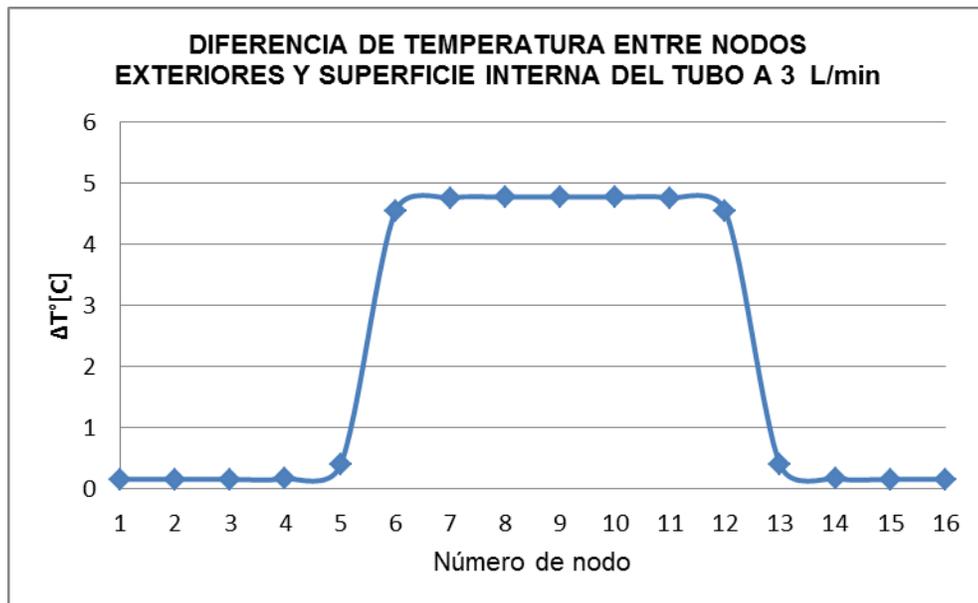


Figura 3.28 Gráfica de la diferencia de temperatura de superficie interna y superficie externa

La diferencia de temperatura entre las superficies interna y externa del tubo, en cada uno de los nodos, para observar posibles gradientes de temperaturas que afecten la estructura del material, por energía almacenada en el espesor del mismo para un caudal de 3 L/min, fue de aproximadamente 4.5 °C y se presenta en la parte inferior del tubo, como se muestra en la figura 3.28. Lo cual no genera una deformación considerable para el material derivada del aumento de su temperatura, como se muestra en la figura 3.29 , la dilatación del material es del orden de micras, y no genera deformación considerable-.

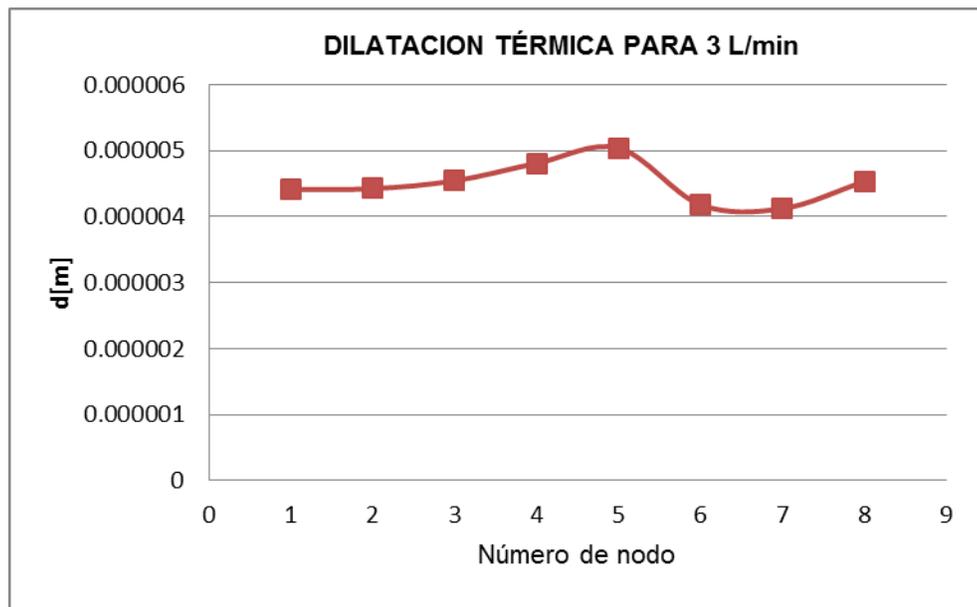


Figura 3.29. Gráfica de dilatación térmica en las diferentes regiones del tubo de vidrio , tipo borosilicato.

De lo anterior se puede apreciar en la figura 3.29 que la dilatación térmica es mayor que en la prueba realizada con un caudal de 2 L/min, pero solo de aproximadamente 0.1 micras. Lo cual sigue sin generar daño alguno en la estructura del vidrio.

3.6 Análisis para un caudal de 4 L/min

Finalmente se analizan los gradientes de temperatura en las superficies del tubo y las diferencias de temperaturas de las superficies interna y externa. Así comola expansión térmica alcanzada en el material, para un caudal de 4 L/min.

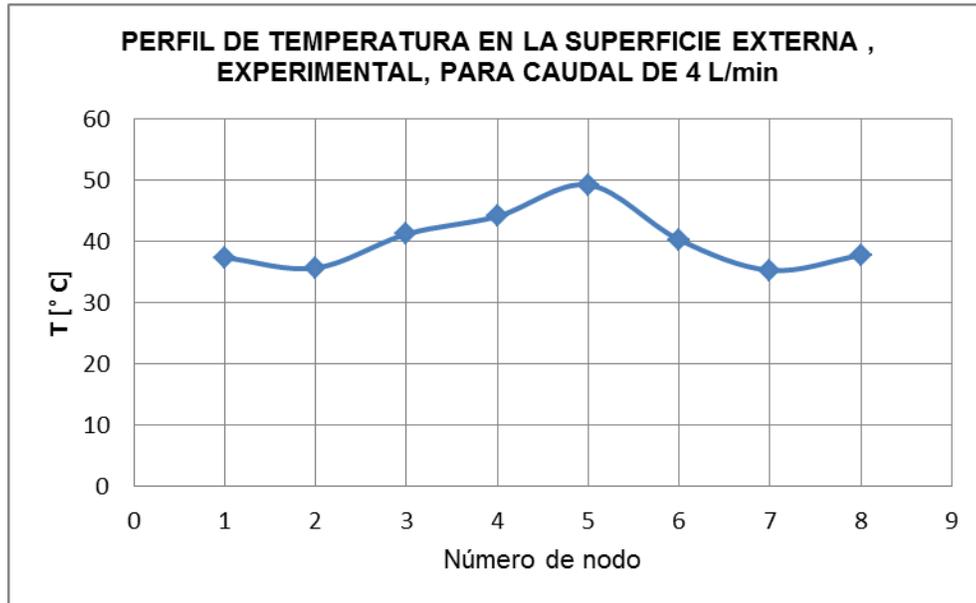


Figura 3.30 . Gráfica de perfil de temperatura experimental para 4 L/min.

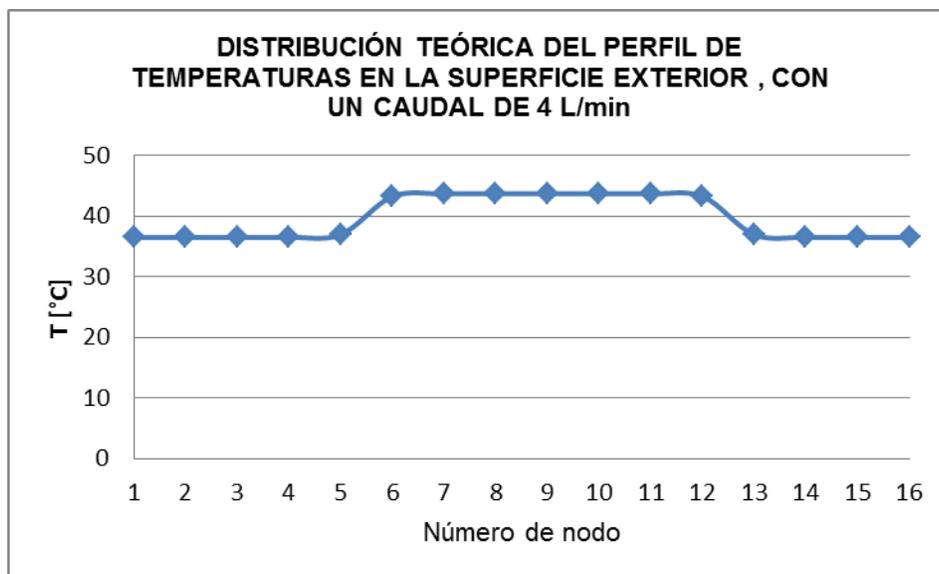


Figura 3.31 Gráfica de perfil de temperatura teórica para la superficie exterior a 4 L/min.

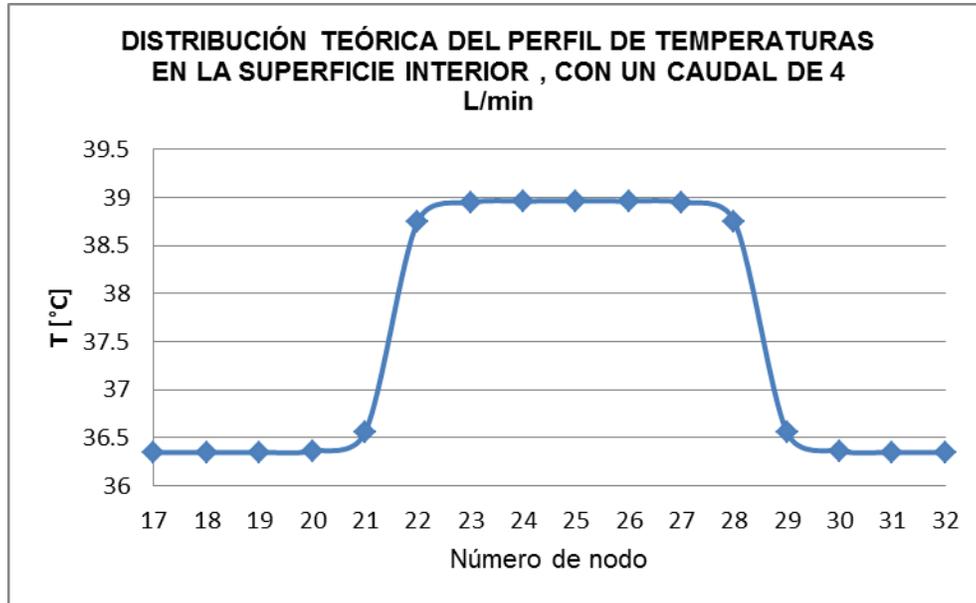


Figura 3.32 Gráfica de perfil de temperatura teórico para la superficie interior a 4 L/min.

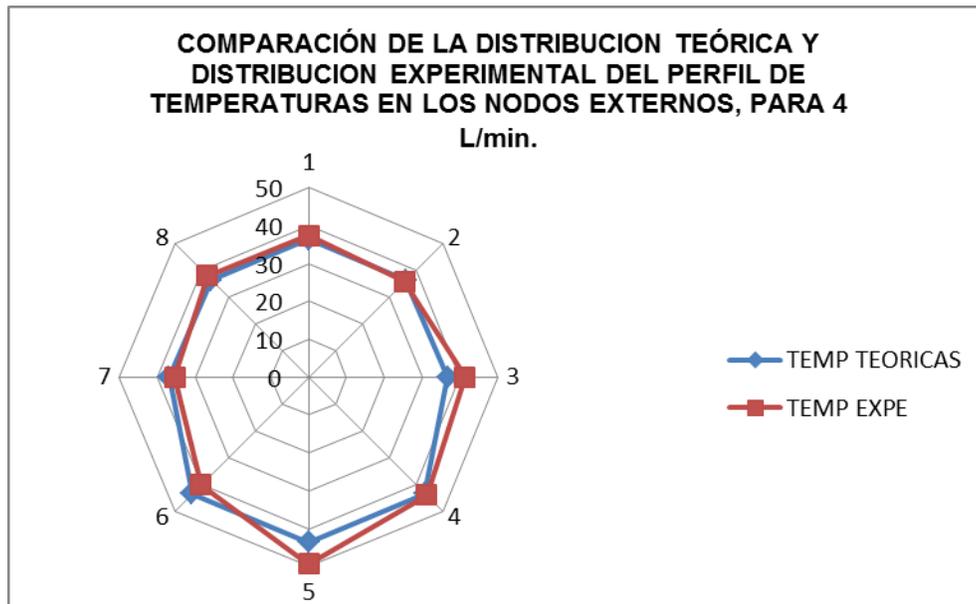


Figura 3.33 Gráfica de la compración de perfil de temperatura teórico para la superficie exterior y perfil de temperatura experimental para la superficie exterior, a 4 L/min.

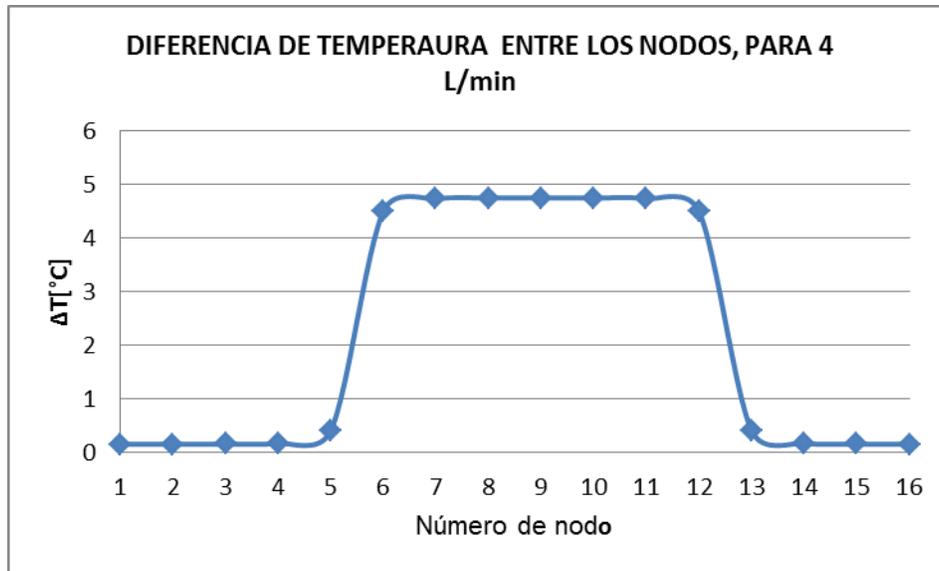


Figura 3.34 Gráfica de diferencia de temperatura para los diferentes nodos a un caudal de 4 [L/min]

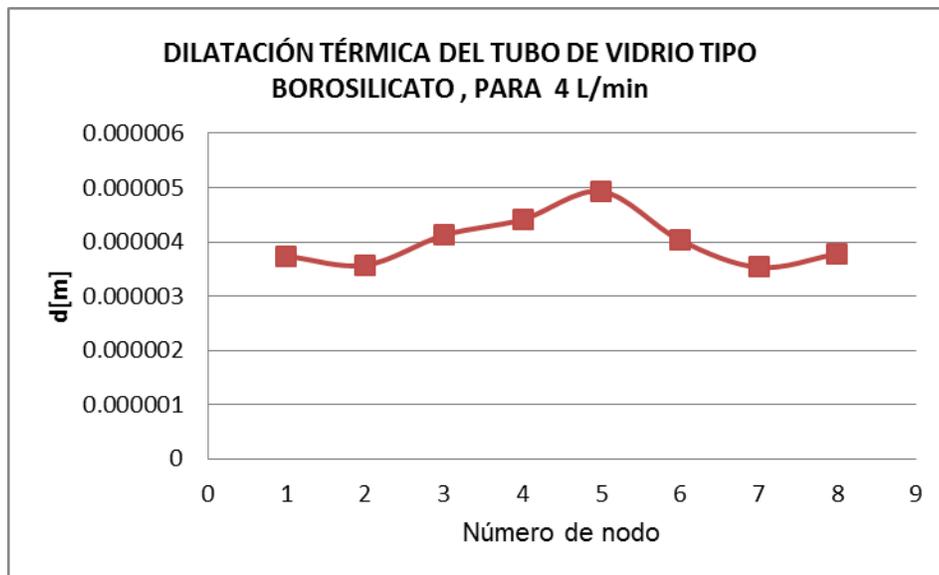


Figura 3.35 Gráfica de la dilatación para el tubo de vidrio tipo borosilicato , a 4 [L/min]

Finalmente se puede apreciar para el caudal de 4 L/min se tiene lo siguiente:

La diferencia de temperatura entre las superficies del tubo disminuye en la zona interior (figura 3.34), en donde la diferencia es de aproximadamente 4.3 °C, la cual es menor comparada con la de un caudal de 2 L/min, pero no mucho a diferencia de un caudal de 3 L/min, esto se puede observar debido a la rapidez con la que circula el fluido a través del medio poroso.

Como se puede observar en la Figura 3.36 la diferencia de temperatura de la superficie interna y la externa en el tubo de vidrio tipo borosilicato, no cambia mucho con los caudales usados en este trabajo, por lo cual se puede generalizar que no hay para este rango de caudales, una posible ruptura por expansión térmica o por los gradientes de temperatura en el interior.

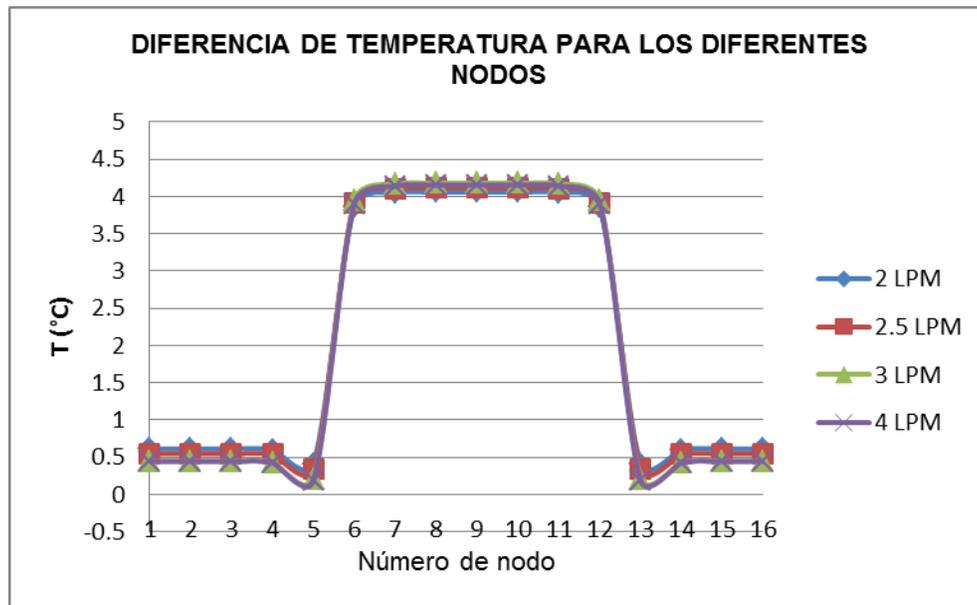


Figura 3.36. Gráfica de la diferencia de temperatura en los nodos, para los diferentes caudales utilizados.

Los resultados para un caudal de 4 L/min, tienen una tendencia de comportamiento similares a los obtenidos con los caudales de 2 , 2.5 y 3 L/min, mostrando sólo cambios que no son significativos en el gradiente de temperatura en el interior del tubo y las diferencias de temperaturas de las superficies interna y externa.

De la figura 3.36 se puede concluir que al aumentar el caudal del fluido de trabajo, la diferencia de temperatura entre los nodos internos y externos aumenta ligeramente y más significativa en la zona inferior del tubo, es decir, que si aumentamos el caudal de una manera desmesurada la diferencia de temperatura entre los nodos internos y externos en la zona de riesgo podría llegar a ser considerable.

CAPITULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio del comportamiento mecánico-térmico de un tubo absorbedor de vidrio tipo Borosilicato posicionado en un concentrador de canal parabólico simple, es muy complejo debido a las condiciones de trabajo y la forma en que se resuelve y evalúa la ecuación de difusión de calor en dos dimensiones, ya que intervienen muchas variables de las cuales no se tiene el control, principalmente variables naturales. Sin embargo el experimento propuesto para esta tesis y la expresión propuesta como solución de la ecuación de difusión térmica relacionan un comportamiento ideal y un comportamiento real, validando resultados teóricos y también los experimentales comprobando que el método utilizado es funcional y aceptable así como las consideraciones hechas.

Sin embargo, existieron algunas complicaciones climatológicas en la experimentación, mismas que imposibilitaron hacer una prueba con un periodo de días consecutivos, pero las restricciones hechas permiten realizar pruebas en días no consecutivos con la misma validez.

Por otro lado, las limitantes experimentales fueron resueltas en la construcción del sistema de pruebas, ya que solo fueron defectos físicos estructurales fáciles de corregir.

Todos los resultados expresados en el capítulo III , mostraron un panorama de los efectos térmicos dentro y fuera del tubo, llegando a observar que en ningún momento el material es propenso de ruptura para las condiciones de trabajo de este experimento , y que se puede utilizar el modelo y la metodología para experimentar con flujos diferentes según sea la conveniencia.

A continuación se explicaran los alcances que se tuvieron vistos desde la teoría y también vistos desde la experimentación o fenómeno real, posteriormente se explicarán los alcances obtenidos en conjunto y las recomendaciones para usar un sistema similar con fenómenos catalíticos.

4.1 Parte Teórica.

La parte teórica en este experimento ha concluido con un modelo matemático para el perfil de temperatura en la superficie interna y otro para la superficie externa del tubo, derivado de la resolución de la ecuación de difusión usando el método de diferencias finitas, balance de energía y de cantidad de movimiento. Así mismo para la evaluación se requirió el valor del coeficiente de convección térmica en el interior, siendo éste también un buen aporte de la tesis para el cual se utilizó un método que relaciona los valores reales de la temperatura de entrada y la temperatura de salida del fluido a través del medio con esferas (analizado como medio poroso). De lo anterior se encontró un comportamiento que refleja una disminución del valor numérico del coeficiente de convección térmica en el interior del tubo al aumentar el caudal de trabajo, eso quiere decir, que no hay mucha ganancia de energía por parte del fluido si aumentamos el caudal.

Los resultado numérico del coeficiente de convección térmico, son mostrados en las figuras de la 3.6 a la 3.10, observando que el método comparativo es funcional, por la similitud de los resultados, debido a que las curvas del comportamiento teórico y experimental son casi iguales. Siendo un método confiable a pesar de que es un método cuyo valor se obtienen de una seria de iteraciones de un valor propuesto ajustando al comportamiento real de la temperatura del fluido a la salida del medio, por tal motivo el estudio de este último fenómeno también es uno de los logros importantes

Los modelos teóricos propuestos para el experimento, tanto para la temperatura en los nodos de la superficie interna y superficie externa del tubo, como para la convección externa e interna del mismo, son aplicables a experimentos de mayor o menor dimensión, tomando precauciones pertinentes y ajustando los valores iniciales o estables de las variables naturales, así como los valores de las dimensiones geométricas, también es relevante mencionar que este experimento fue analizado como un sistema en estado transitorio pero estable, por tal razón iniciar la toma de datos siempre se debe estabilizar el sistema, dejándolo trabajar hasta que no haya variaciones visibles en el fluido de trabajo (burbujas de aire o inestabilidad en la velocidad del mismo), para que las condiciones de flujo interno sean estables.

4.2 Parte Experimental.

El experimento desarrollado en la planta solar del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con la finalidad de aportar el conocimiento necesario sobre el comportamiento mecánico térmico de un tubo absorbedor de vidrio tipo borosilicato, se llevó a cabo con una serie de restricciones para controlar algunas de las muchas variables naturales que existen alrededor del sistema de prueba, por ejemplo: Velocidad del aire, humedad, nubosidad, contaminación adicional derivada de algún fenómeno natural (polvo, ceniza, etc. Partículas). En realidad las variantes que intervienen en el experimento son muchas, por ello se tiene que utilizar el sistema a ciertas condiciones de trabajo, que en este caso particular, se delimitó trabajar a 800 [W/m²] de irradiancia, más o menos una diferencia del 5%, lo cual garantizó un suministro de energía igual en todas las pruebas. Se trabajó aproximadamente al medio día solar buscando una irradiación homogénea en el tubo. Todas las restricciones fueron hechas tomando como valores patrones los adquiridos de la estación meteorológica ubicada en la planta solar del II, UNAM.

Los resultados experimentales, fueron así mismo resultado de muchos filtros para agrupar resultados confiables. Estos filtros sirvieron para quitar valores “disparados” de la moda y la media de los demás, es decir, con los que tuvieran una desviación estándar elevada, esto sucede por diferentes causas que pueden ser naturales o técnicas, las primeras debido a efectos naturales corrientes de aire, lluvia etc. y las segundas por un mal enfoque, ya que a pesar de calibrar y limpiar diariamente el módulo de concentración la precisión podría variar por efectos de desgastes estructurales totalmente naturales.

4.3 Conclusiones

Una aportación del experimento realizado y analizado en esta tesis fue encontrar el máximo gradiente de temperatura presentado en el interior del medio poroso cuyo valor fue de 5 [°C] para un flujo de 4 [L/min], dicho valor cambia muy ligeramente con los caudales utilizados, con un caudal de 2 [L/min] el gradiente fue aproximadamente a 4.6 [°C], así mismo las temperaturas alcanzadas fueron del rango de 35 [°C] y hasta 55 [°C] para la superficie externa, dependiendo del caudal

utilizado, con lo cual no se genera ningún cambio considerable en la estructura del material. Por otro lado, el mayor gradiente de temperatura en el espesor del tubo, se ubicó en la parte inferior, cuyo valor fue de 1.4 °C con un caudal de 4 L/min y disminuía al disminuir el caudal del fluido de trabajo, lo cual es incapaz de generar deformación o causar daño alguno en la estructura del tubo, con los caudales utilizados.

Se observó que al aumentar el caudal de alimentación, el comportamiento dinámico del fluido es tendiente a producir fenómenos de ligero desgaste en los materiales utilizados, según sea la magnitud del caudal ya que a mayor caudal mayor turbulencia. Otra aportación de esta tesis fue que al aumentar el caudal de trabajo el medio poroso tiende a aumentar su temperatura, por lo que en la selección del material utilizado para dicho medio debe de considerar este efecto térmico. Así como una posible inercia térmica en la zona.

El modelo teórico propuesto para el cálculo de los perfiles de temperaturas en las superficies mostró buenos resultados en comparación con los valores experimentales obtenidos en el campo de concentradores de canal parabólico simple. Se tuvo una diferencia máxima del 15 % y una mínima de 1 %, con respecto a los valores experimentales (tabla 3.5). Esto significa que los modelos propuestos son aceptables para el estudio teórico de sistemas semejantes, pudiendo aproximar valores del comportamiento mecánico térmico de un tubo absorbedor de vidrio con dimensiones o condiciones de trabajo diferente, sin embargo es de gran importancia considerar la fuente energética que en este caso fue la concentrada en un concentrador de canal parabólico simple, porque de utilizar otro tipo de concentrador con dimensiones diferentes tanto la zona irradiada del tubo como la intensidad y densidad de energía cambiarán esperando otro tipo de comportamiento térmico del tubo, por lo tanto, a pesar de que los modelos son aplicables con otro tipo de concentradores se debe de tener precaución, ya que se pueden tener otra intensidad de gradientes térmicos que sí pudieran afectar la estructura.

El comportamiento dinámico del fluido de acuerdo a los cambios en los caudales utilizados muestra que el coeficiente de fricción disminuye y la caída de presión aumenta, así como el número de Reynold, si aumentamos el caudal de fluido a la entrada. Físicamente significa que al aumentar el caudal del fluido de trabajo la pérdida de presión aumenta, pero no por causas de fricción entre el fluido de trabajo y las esferas, sino por el nivel de turbulencia dentro del tubo, debido al “choque” del agua con las esferas, ya que al aumentar el caudal este “Choque” es mayor y genera mayor nivel de turbulencia. Esto aunque es un fenómeno muy tenue debe ser tomado en cuenta para trabajar con reacciones catalíticas ya que si el catalizador

se encuentra sujeto a la superficie de las esferas y además debido a la turbulencia se podría ver afectada la adherencia física del catalizador.

En la parte interna del tubo los gradientes de temperatura encontrados son principalmente resultado de la intensidad y condiciones del coeficiente de convección térmica a través del medio. Dicho coeficiente resulto con un valor mínimo de $767 \text{ W/m}^2\text{K}$ y uno máximo de $4526 \text{ W/m}^2\text{K}$, para 4 L/min y 2 L/min respectivamente, lo que demostró que al aumentar el caudal de alimentación la ganancia de energía en el fluido es menor.

Con el aumento en el caudal del fluido de trabajo la energía absorbida por el mismo disminuye, sin embargo la energía suministrada al sistema es considerada constante (aproximadamente 800 W/m^2), lo que provoca que la energía que no sea absorbida por el fluido de trabajo, debido al aumento en su velocidad sea repartida al medio poroso y al tubo de vidrio tipo borosilicato, pero no en parte iguales. El aumento de energía del tubo no cambia mucho debido a las propiedades del vidrio tipo borosilicato, pero el medio poroso puede llegar a absorber la mayor parte de la energía dependiendo del material utilizado y del empaquetamiento de las mismas, éste último puede ocasionar áreas con mayor concentración energética que otras, generando ahí mismo diferencia de calor adicionado a lo relacionado con el “choque” del agua en las esferas habrá porciones de agua que no recirculen a la misma velocidad que otras, concentrando el calor entre las esferas, entonces, el medio poroso puede llegar a tener gradientes de temperaturas, además por la iluminación de las partículas que lo forman, ya que no es homogénea, ni tampoco la transferencia de calor al fluido de trabajo.

Para el perfil de temperatura en la superficie externa, la mayor temperatura alcanzada fue en la zona inferior de 55°C y la mínima de 35°C . Dicho perfil en esa zona no cambia significativamente al aumentar el caudal, ya que la energía suministrada es constante. Para el perfil de temperaturas en la superficie interna se observó una máxima temperatura en la zona inferior de 53°C y una mínima de 34° . Lo que respecta a las zona superior los cambios no fueron tan significativos al cambiar el caudal, cuyo valor máximo en la parte exterior fue de 50°C y una mínima de 35°C y para la zona interior una máxima de 48°C y una mínima de 43°C . Los valores máximo en cual quiera de las zonas interna o externa se alcanzaron con un flujo de 4 L/min, mientras que los valores mínimos fueron con caudales mínimos de 2 L/min, esto debido a lo que se observa con el comportamiento de la convección en el interior del tubo. A mayor velocidad del fluido menor absorción de calor por lo tanto el tubo absorbe mayor energía aumentando su temperatura.

En general los resultados proporcionan información adecuada para poder decir que es posible trabajar con tubos de borosilicato posicionados como tubos absorbedores en concentradores solares, y que se podría utilizar con dimensiones diferentes, si el proceso así lo requiere.

La diferencia de temperatura entre la superficie interna y la externa del tubo (espesor), oscila entre 1°C y 2°C aproximadamente. Siendo factible probar con tubos de menor espesor, pero considerando que sea capaz de resistir la carga física (peso) del medio poroso y del volumen de fluido de trabajo.

Para la parte externa del tubo de vidrio tipo borosilicato, se observó que exclusivamente para los días de pruebas realizados no sufrió ningún tipo de enfriamiento excesivo derivado de algún cambio de la velocidad de aire, sin embargo, es una variable de suma importancia, ya que en un funcionamiento prolongado del sistema, se pueden alcanzar temperaturas considerables y un cambio brusco de la misma en la superficie puede causar un choque térmico, provocando una alteración en los enlaces atómicos del borosilicato y de esta manera provoca vulnerabilidad de fractura en estados térmicos que antes no eran de peligro, aunado a una fatiga térmica que el material podría ser “víctima”, de no considerar las condiciones externas del sistema.

Finalmente el comportamiento mecánico fue favorable, ya que no se mostró ningún tipo de daño, pero sí es de considerar que trabajar con esferas en el interior del tubo aumenta el peso y puede llegar a fracturar, aunque en nuestro caso no se presentó ningún tipo de vibración derivada del comportamiento térmico y de mecánica de fluidos, no es para descartar dicho fenómeno que podría afectar la estructura del tubo.

4.4 Recomendaciones.

Para el uso de un sistema similar físicamente pero con reacciones foto catalíticas, se pueden hacer las siguientes recomendaciones considerando que las superficies de las esferas que forman el medio poroso se encuentren recubiertas de foto catalizador:

- Se necesita considerar en primer lugar, una buena calibración del sistema para que funcione correctamente, para eso es necesario revisar que no tenga deformaciones el concentrador solar a utilizar, o que se encuentre mal colocado o sucios.

- Dependiendo del propósito y las dimensiones del tubo absorbedor, se debe fijar el caudal o caudales de trabajo, considerando un posible desgaste físico.
- Tomar en cuenta que a mayor caudal, la energía que gana el fluido de trabajo es menor, y que la distribución de la energía restante se concentra una parte al material del tubo absorbedor y la mayor parte al medio poroso en el interior del tubo, por lo cual se debe de conocer las temperaturas permisibles del adherente utilizado para fijar el foto catalizador en la superficie de las esferas, ya que podría verse afectado además de la turbulencia generada, por la acumulación de calor en esa misma región.
- Utilizar para el medio poroso un material con baja absorción, para evitar consecuencias de los efectos térmicos antes mencionados, así como materiales ligeros para evitar esfuerzos derivados del peso del medio poroso.
- Cuidar los caudales intensos que podrían dañar físicamente al sistema, generando vibraciones.
- Para la selección del espesor del tubo, además se debe considerar esfuerzos generados por el peso del medio poroso y la diferencia de temperatura en la zona inferior entre la parte interna y la parte externa del tubo usado.

En general, los resultados muestran diferencias de temperaturas muy pequeñas, trabajando con flujos pequeños, y demuestra que la deformación o la ruptura del tubo se presentarían con mucha más energía concentrada y con gradientes de temperatura más elevados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3 Daniels, F. (1982). *Uso Directo de la Energía Solar*. Madrid: Ediciones H. Blume.
- 4 Duffie, John A. & Beckman, William A. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes*. U.S.A: John Wiley & Sons Inc.
- 5 Secretaría de Energía. (2012). *Balance Nacional de Energía 2011*. México.
- 6 Martínez Cienfuegos, Iván Galileo. (2004). *Análisis teórico-experimental de flujo bifásico anular en tuberías horizontales para un sistema solar-geotérmico*. (Tesis inédita de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- 7 Pérez Rábago, Carlos Alberto. (2011). *Concentración solar*. Recuperado de www.cie.unam.mx
- 8 Blanco Gálvez Julián, Malato Rodríguez Sixto, Peral José, et. al. (s. f.). *Diseño de reactores para fotocatalisis: evaluación comparativa de las distintas opciones*.
- 9 Bandala, Erik R. & Estrada, Claudio. (s. f.). *Comparison of Solar Collection Geometries for Application to Photocatalytic Degradation of Organic Contaminants*. doi: 10.1115/1.2390986.
- 10 Patiño Carrillo, Luis. (2005). Convección de calor en el flujo de fluidos viscosos a través de un lecho de empaque metálico. *Interciencia*, pp. 81-86.
- 11 Malat, Sixto, Oller Isabel, et. al. (2009). La fotocatalisis solar y la reutilización de aguas: aplicación al tratamiento de contaminantes emergentes y desinfección en efluentes de EDAR. *Obras urbanas*. pp. 66-70.
- 12 Cassano, Alberto. E., Alfano, Orlando M. et. al. (s. f.). *Diseño de reactores para fotocatalisis: conceptos fundamentales*. pp. 201-241.
- 13 Cáceres Vazquez, Julia. (2002). *Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar*. (Tesis inédita de doctorado). Departamento de Hidrogeología y Química Analítica, Universidad de Almería.
- 14 Patiño, Luis & Figueroa, Rosmely. (2004). Convección de calor en el flujo de fluidos a través de un lecho de empaque de bauxita activada. *Revista Facultad de Ingeniería UTA Chile*. pp. 27-34.
- 15 Powell, P. A., Litter, M. *Desinfección solar de aguas por fotólisis y fotocatalisis: aplicación en tucumán, argentina*.

- 16 Papamija Marcela y Sarria Víctor. (2009). *Degradación fotocatalítica del ibuprofeno empleando dióxido de titanio*. Revista de ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá. Enero - Junio de 2010, pp. 47-53.
- 17 Torii, K., Kwak, K.M. y Nishino K. (2002). *Heat transfer enhancement accompanying pressure-loss reduction with winglet-type vortex generators for fin-tube heat exchangers*. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, pp. 3795–3801.
- 18 Martínez, Ivan y Almanza Rafael. *Experimental and theoretical analysis of annular two-phase flow regimen in direct steam generation for a low-power system*. *Solar Energy* 81, pp. 216-226.
- 19 Tolcachies, Alberto Jorge. Contaminación del agua.
- 20 Nield Donald A. y Bejan Adrian. (2006). *Convection in Porous Media*. United States of America. Springer. 654p.
- 21 Pilatowsky Figueroa, Isaac. (2007). *Metodología de diseño de instalaciones solares para el calentamiento de agua*. Centro de Investigación en Energía Temixco, Morelos. 62p.
- 22 Leónidas A. Pérez-Estrada. Et. al. (2002). *Degradación de desechos de laboratorio mediante fotocátalisis solar*. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. pp. 1-6.
- 23 L. Wojtan et al. (2005) *Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I— A new diabatic two-phase flow pattern map*. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 pp. 2955–2969.
- 24 Jorge Humberto Motato Ladino, et. al. (2007). *Metodología para el cálculo de la distribución de temperatura transitoria en un regenerador térmico de lecho poroso empacado*. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. N.o 41. pp. 66-83.
- 25 Sixto Malato, Isabel Oller, et. al. (2009). *La fotocátalisis solar y la reutilización de aguas: aplicación al tratamiento de contaminantes emergentes y desinfección en efluentes de EDAR*. CIEMAT. Pp. 66-70.
- 26 Bouras, N. (2009). *Thermal and mechanical characterization of borosilicate glass*. *Physics Procedia* 2, pp. 1135–1140.
- 27 Vázquez Cáceres Julia.(2002).Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en Planta piloto Solar, Almería, Pp. 1-91.

MESOGRAFÍA

- 1 Comisión Nacional del Agua, Sistema Nacional de Información del Agua , [página web en línea], México, CONAGUA, [citado 02/6/2013], disponible en internet: <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=60>
- 2 Secretaria de Energía, Balance Nacional de Energía, 2011 , [página web en línea], México, SENER, [citado 02/6/2013], disponible en internet: www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/BNE_2011.pdf