



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE  
ENTROPÍA EN UN MEDIO POROSO  
ACOPLADO A UN COLECTOR SOLAR**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**P R E S E N T A:**

**FEDERICO GUTIÉRREZ CORIA**



**DIRECTOR DE TESIS  
DR. FEDERICO MENDEZ LAVIELLE**

**CD. UNIVERSITARIA**

**2004**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

# Agradecimientos

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: FEDERICO GUTIERREZ  
CORIA

FECHA: 2 DE AGOSTO DE 2004

FIRMA: [Firma]

**A mis padres y a mi hermano,**

**Por su paciencia y apoyo en cualquier momento.**

**A mis maestros y asesor,**

**Por mi formación y superación.**

**... y todos mis amigos por su amistad e inspiración.**

**... que al fin y al cabo sólo es una tesis ...**

# Índice general

<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>8</b>
1.1. Sistemas pasivos de aplicación solar . . . . .	8
1.1.1. Ventajas e inconvenientes de los sistemas solares pasivos . . . . .	9
1.1.2. Ejemplos de sistemas pasivos de aplicación solar . . . . .	9
1.2. Energía solar: Colectores solares . . . . .	11
1.2.1. Descripción de un colector solar plano . . . . .	11
1.3. Bombeo Capilar . . . . .	12
1.4. Objetivos . . . . .	17
1.5. Alcances . . . . .	19
<b>2. MODELO MATEMÁTICO</b>	<b>20</b>
2.1. Planteamiento . . . . .	20
2.2. Desarrollo . . . . .	21
2.3. Optimización . . . . .	29
<b>3. PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	<b>30</b>
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>43</b>

# Nomenclatura

$A_f$	Área de flujo
$C_p$	Calor específico del fluido
$D_h$	Diámetro hidráulico
$\dot{E}_x$	Energía de entrada
$\dot{E}_{x+\Delta x}$	Energía de salida
$Gz^*$	Número de Graetz
$H$	Espesor del canal
$h$	Entalpía
$h_x$	Entalpía de entrada
$h_{x+\Delta x}$	Entalpía de salida
$K$	Permeabilidad
$K_c$	Conductividad combinada
$K_f$	Conductividad del fluido
$K_s$	Conductividad de la matriz porosa (sólido)
$L$	Longitud del colector
$\dot{m}_x$	Flujo másico de entrada
$\dot{m}_{x+\Delta x}$	Flujo másico de salida
$P$	Presión
$Pr$	Número de Prandtl
$\dot{Q}$	Calor neto recibido
$\dot{q}''$	Energía neta recibida por unidad de área
$\dot{q}$	Energía neta recibida por unidad de longitud
$Re$	Número de Reynolds
$\dot{S}_{gen}$	Generación de entropía
$\dot{S}_R$	Entropía de referencia
$s$	Entropía
$s_x$	Entropía de entrada

$s_{x+\Delta x}$	Entropía de salida
$T$	Temperatura
$\Delta T$	Incremento de temperatura
$u$	Velocidad del flujo
$u^*$	Energía interna
$v$	Ancho del canal
$v^*$	Volumen específico

### Símbolos Griegos

$\alpha$	Parámetro adimensional
$\beta$	Parámetro adimensional
$\zeta$	Espesor adimensionalizado
$\eta$	Variable adimensional en dirección y sentido del flujo
$\mu$	Viscosidad del fluido
$\rho$	Densidad del fluido
$\phi$	Porosidad
$\chi$	Variable adimensional paralela al flujo
$\psi$	Permeabilidad adimensionalizada
$\Delta$	Incremento
$\Phi$	Generación de entropía adimensional

### Subíndices

<i>cap</i>	Presión capilar
<i>con</i>	Caída de presión en la línea a la salida del condensador
<i>eva</i>	Caída de presión en la línea a la salida del evaporador
<i>bmb</i>	Caída de presión debida al bombeo capilar
<i>g</i>	Caída de presión debida a la gravedad
0	Condiciones de punto muerto

# INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo, se estudia la generación de entropía que se presenta en un fluido que circula a través de un medio poroso que recibe permanentemente energía por medio de un colector solar. El sistema se visualiza como un medio poroso confinado entre dos placas paralelas, donde por una de ellas se recibe un flujo constante de energía solar mientras que la otra se encuentra aislada. La figura 0-1 muestra un esquema del captador propuesto para el presente estudio. Partiendo de esta configuración se llevó a cabo un análisis que permitió establecer un criterio con el cual se pueden identificar las mejores condiciones de operación para la permeabilidad y el espesor de la matriz porosa, desde el punto de vista de la mínima generación de entropía.

El capítulo 1, dedicado a la introducción, presenta un breve repaso de los aspectos teóricos sobre los cuales se fundamenta esta investigación. Está compuesto por las siguientes secciones: sistemas pasivos de aplicación solar, colectores solares, bombas capilares, objetivos y alcances. La elección de estos temas fue debido a que cada uno de ellos explica distintos aspectos de lo que se puede esperar de una bomba capilar de aplicación solar como la planteada en esta investigación. En la sección dedicada a colectores solares, se explican los aspectos básicos sobre colectores solares planos y las razones y características que proporcionan un mejor rendimiento de este tipo de sistemas. En la sección sistemas pasivos de aplicación solar, se presentan varios ejemplos de como la energía solar puede ser aprovechada evitando utilizar fuentes externas de energía, con las ventajas económicas y ecológicas que esto conlleva. En la sección de bombas capilares, se revisan los trabajos de distintos autores enfocados al desarrollo de sistemas de bombeo que utilizan el efecto capilar como principio de operación; este tipo de sistemas tienen la ventaja de no requerir de una bomba para su operación, o bien se reduce a sólo un sistema de apoyo.



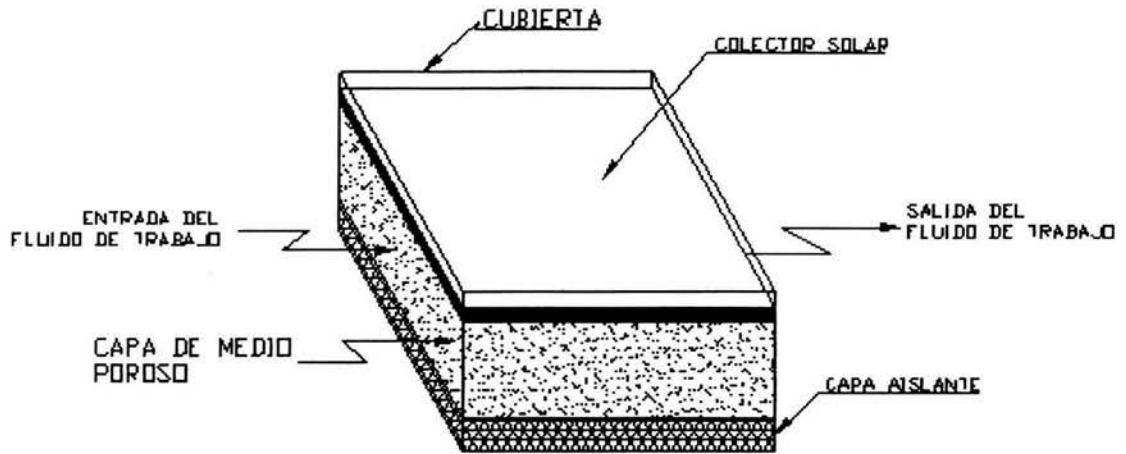


Figura 0-1: Esquema del calentador.

Bajo esos tres aspectos principales, la siguiente investigación se desarrolló para conocer la generación de entropía en un sistema que recibe un flujo uniforme de energía solar, que tiene la capacidad de mover el fluido de trabajo sin la necesidad de recurrir a una fuente motriz externa, ya que utiliza el efecto capilar que proporciona el medio poroso. En las secciones objetivos y alcances, se presentan los principales lineamientos y expectativas bajo los cuales se desarrolla el presente estudio.

En el capítulo 2, Modelo matemático, se muestra el planteamiento teórico utilizado para conocer la función de generación de entropía. Así mismo, se deducen las funciones de optimización para las distintas variables de las que depende el sistema.

En el capítulo 3, Pruebas y resultados, se exhibe una serie de gráficas en las que se presenta el comportamiento de la función de generación de entropía y las funciones de optimización, utilizando para ello las propiedades de distintos materiales que pueden encontrarse tanto en colectores solares como en sistemas de bombeo capilar.

Por último se muestran las conclusiones de la presente investigación, en las cuales se describen los efectos de los parámetros y variables involucrados en la generación de entropía del sistema, lo que ayuda a formar un criterio con el que se pueden distinguir las condiciones con las que se logra el mejor desempeño del sistema.

# Capítulo 1

## ANTECEDENTES

### 1.1. Sistemas pasivos de aplicación solar

Los sistemas físicos se clasifican en dos tipos; los activos y los pasivos. Los sistemas activos se caracterizan por estar constituidos por elementos que son capaces de entregar energía externa a un sistema, como por ejemplo rotores de motores en sistemas mecánicos y fuentes de corriente y voltaje en sistemas eléctricos. Los sistemas pasivos, en contra parte a los activos, se encuentran conformados solamente por componentes que destacan por tener la capacidad de almacenar energía, para posteriormente ser utilizada por el sistema, estos elementos no son productores de energía. Ejemplos de elementos pasivos son los resortes, masas o inercias en sistemas mecánicos y capacitores y solenoides en sistemas eléctricos.

Las técnicas pasivas de aplicación solar emplean como elementos fundamentales: captadores planos o de concentración de la energía solar, un equipo de almacenamiento de la energía ganada y sistemas de conexión entre ellos. El principio de operación consiste básicamente en utilizar un fluido de trabajo, por ejemplo agua o aire, este es transportado a través del captador solar donde absorbe calor y es llevado a un depósito térmico. Después, mediante un sistema mecánico de distribución, el fluido se extrae del depósito y es llevado al lugar donde se necesite la energía almacenada en él.

Actualmente existe una gran cantidad de literatura especializada en la que se puede encontrar información acerca de los procesos solares pasivos. Por ejemplo, la Sociedad Americana de Energía Solar “*American Solar Energy Society*” publica *Passive Solar Journal* y se encarga

de organizar conferencias sobre el uso de la energía solar. Otra importante fuente de información es la publicación *Solar Energy*, donde se encuentran estudios sobre procesos, arquitectura, disponibilidad de radiación, transferencia de calor y otros aspectos relativos al tema.

### **1.1.1. Ventajas e inconvenientes de los sistemas solares pasivos**

El mayor interés que presentan los sistemas pasivos es el hecho de que además de procurar importantes ahorros de energía para calefacción, presentan bajos costos de construcción y operación, Mazria [7]. Las ventajas pueden distinguirse en tres clases: las económicas, las arquitectónicas y las de comodidad e higiene. Quizá la ventaja principal de un sistema pasivo es la simplicidad de su concepción, funcionamiento y mantenimiento. Un sistema pasivo normalmente lo pueden instalar, regular y mantener cualquier persona. Los costos o inversiones asociadas a la construcción de un sistema de calentamiento pasivo son los requeridos por los implementos necesarios para que la edificación pueda aprovechar la energía solar. De acuerdo a Beckman y Duffie [5] el punto óptimo térmico rara vez es el mismo que el punto óptimo económico.

### **1.1.2. Ejemplos de sistemas pasivos de aplicación solar**

Existe una gran cantidad de dispositivos que emplean la energía solar para resolver alguna necesidad, utilizando para ello elementos pasivos. Algunos de los usos más difundidos de las técnicas pasivas de aplicación solar, son las utilizadas en la construcción de colectores solares y el acondicionamiento de edificios.

Se encuentran varios ejemplos que ilustran la utilidad y las bondades de los colectores solares que emplean elementos pasivos en su construcción. Uno de ellos es el presentado por Cruz et al. [4]. Los autores presentan un colector solar acoplado a un depósito térmico "*energy store*". El dispositivo tiene la ventaja de que ambos sistemas están integrados dentro de una estructura trapezoidal, con ello la caída de presión debida al movimiento del fluido de un sistema a otro es mínima. La forma trapezoidal induce la formación de celdas convectivas, concentrando el agua de mayor temperatura en la parte alta del dispositivo. Esta simple geometría proporciona un sistema pasivo capaz de entregar energía y almacenar la sustancia de trabajo dentro de una misma estructura. Por último, la misma convección natural es empleada para transportar el fluido del generador de calor (colector solar) al depósito térmico.

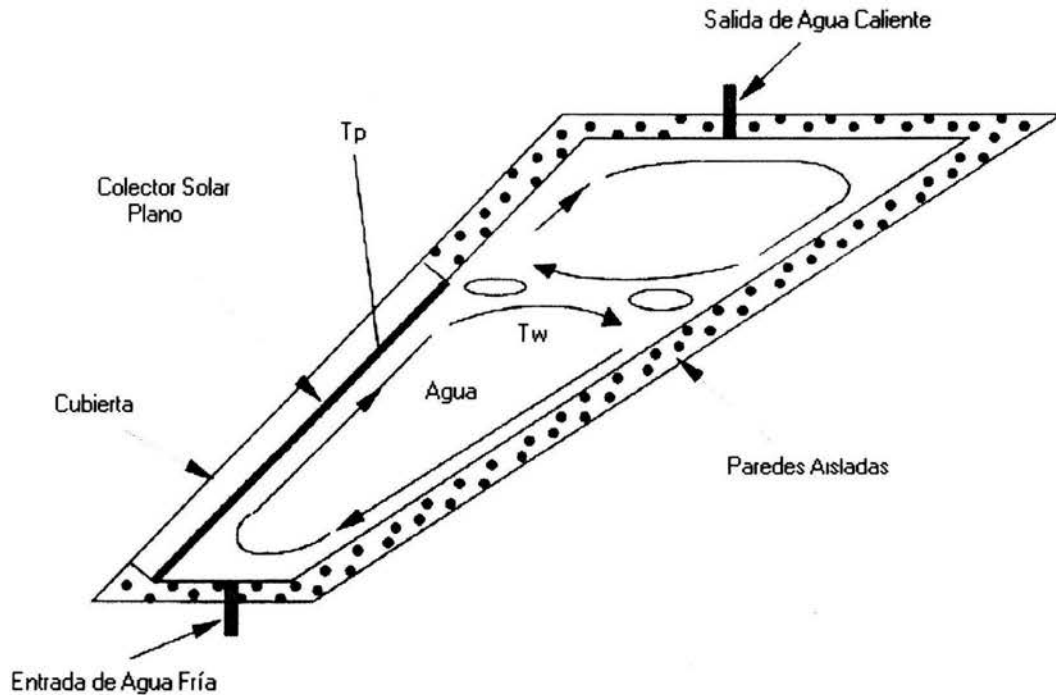


Figura 1-1: Colector solar de sección trapezoidal (Tomado de Cruz et al. [4])

Una de las aplicaciones más populares de las técnicas pasivas solares, es el acondicionamiento de edificios. Los principales enfoques para la calefacción solar en edificios son; activo y pasivo. Los sistemas activos emplean sistemas auxiliares de energía para mover dispositivos mecánicos para captar y transportar calor. La definición más común de un sistema pasivo de calefacción o de refrigeración solar, es aquella donde en un sistema, los flujos térmicos de energía son transportados por medios naturales como la radiación, la conducción y la convección natural. La diferencia más contundente respecto a los activos, es que los sistemas pasivos funcionan con la energía aprovechable de su entorno más inmediato, mientras que los sistemas activos utilizan energía elaborada, como la electricidad, para alimentar dispositivos como bombas o ventiladores sin los cuales el sistema no funcionaría.

Las técnicas pasivas más utilizadas en el acondicionamiento de edificios se clasifican básicamente en tres tipos, los de ganancia directa, ganancia indirecta y ganancia independiente de energía. Por ejemplo, muchos de estos sistemas suelen ser instalados en casas o escuelas. Se han reportado las características y ajustes hechos en la operación de tales dispositivos a fin

de observar y aprender de las innovaciones aportadas por cada idea. En las referencias escritas por Beckman y Duffie [5], Almanza y Muñoz [6] o Mazria [7] se muestran algunos ejemplos de dichos equipos.

## **1.2. Energía solar: Colectores solares**

Existen muchas formas para utilizar la energía solar, la más sencilla es captarla con un colector o captador plano. Los colectores solares son una clase especial de intercambiador de calor, que tiene la capacidad de transformar la energía solar en energía térmica. La energía es transferida desde una fuente lejana de energía radiante al fluido. El flujo de energía incidente es del orden de 1100 hasta 1300 W/m<sup>2</sup> de acuerdo con Beckman y Duffie [5] y Almanza y Muñoz [6]. Los colectores pueden ser diseñados para aplicaciones que requieren desde de una pequeña diferencia de temperatura hasta diferencias de 100 °C por arriba de la temperatura ambiente. La optimización del aprovechamiento de la radiación solar requiere de conocer las características de la radiación y de la superficie que la capta. Una de las aplicaciones más usadas de los colectores solares planos son los calentadores de agua. Dada su sencillez y flexibilidad de operación los colectores solares planos también pueden ser utilizados en aplicaciones de aire acondicionado a nivel residencial y comercial.

### **1.2.1. Descripción de un colector solar plano**

Los colectores solares planos han tenido un amplio desarrollo debido a su impacto a nivel residencial y comercial. La forma típica de un colector solar plano para calentar agua, se muestra en la figura 1-2. En el esquema mencionado se puede observar que el colector es la placa que funciona como un cuerpo negro para la radiación solar, es decir, un cuerpo capaz de absorber la mayor cantidad de radiación, con la finalidad de transferirla al fluido. Se recomienda crear un vacío en el espacio entre las cubiertas y el espacio entre la cubierta interna y el colector para reducir las pérdidas por convección, [5] y [7]. Por abajo del colector y los canales del fluido, se encuentra un aislamiento que evita las pérdidas por conducción y convección. Finalmente el dispositivo se encuentra dentro de una caja que sirve como protección del sistema.

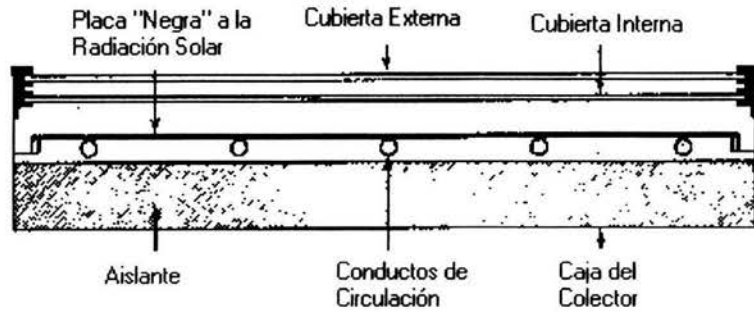


Figura 1-2: Esquema de un colector solar plano (Tomado de Almanza y Muñoz [6])

### 1.3. Bombeo Capilar

Los sistemas de bombeo capilar son dispositivos que han tenido un continuo desarrollo debido a las distintas aplicaciones que se les ha dado. El control térmico de satélites y microprocesadores son algunos ejemplos de las aplicaciones que tiene el bombeo capilar. Su popularidad se debe a que requieren de muy poca o nula energía elaborada por el hombre para su funcionamiento [3]. Por su flexibilidad pueden ser utilizados como equipos de refrigeración o calefacción. Esta ventaja, permite considerar al bombeo capilar de aplicación solar como una opción para ayudar a cubrir los requerimientos de energía térmica, como por ejemplo el calentamiento de agua o aire.

El bombeo capilar "*capillary pumped loop*" al igual que los sistemas de circulación con caloriductos "*loop heat pipe*" son excelentes dispositivos de transferencia de calor debido a su alta capacidad de trasladar calor de un lugar a otro comparados con los métodos convencionales de convección y conducción, Cervantes [17]. Estos equipos tienen un origen común en los caloriductos o "*heat pipes*" ambos surgieron como respuesta a la necesidad de transportar el calor en ambientes con poca gravedad o a mayores distancias que su contraparte original. Las principales limitaciones de todos ellos se encuentran relacionadas con la capacidad del bombeo capilar, las condiciones de evaporación del fluido de trabajo en el medio capilar y el gradiente de la tensión superficial con la temperatura que presenta dicho fluido, Zhang [8].

Su principio de operación consiste en llevar un fluido desde un depósito térmico de baja temperatura a otro de alta a través de un circuito, sin necesidad de una bomba mecánica para

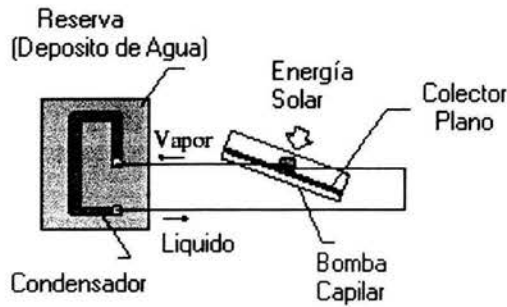


Figura 1-3: Sistema de bombeo capilar de aplicación solar (Tomado de Bazzo y Nogoseke [1])

impulsar el fluido de trabajo. Dependiendo de cual de los dos depósitos es el más importante para resolver una necesidad se determina si el sistema es utilizado para refrigeración o calefacción.

El trabajo más importante desde el punto de vista de esta investigación, es el proyecto propuesto por Bazzo y Nogoseke [1] en el proponen un bomba capilar de aplicación solar con fines de calefacción a nivel residencial y comercial. El esquema básico del equipo se ilustra en la figura 1-3.

Ellos utilizan el efecto capilar producido por un medio capilar dentro del evaporador para impulsar el fluido de trabajo a lo largo del circuito. La presión generada por el medio debe ser lo suficientemente alta como para vencer las pérdidas producidas a lo largo del circuito. Las principales pérdidas que debe vencer la presión capilar son las asociadas a las líneas a la salida del condensador ( $\Delta P_{con}$ ) y del evaporador ( $\Delta P_{eva}$ ), también las debidas a la circulación del líquido a través del medio poroso ( $\Delta P_{bmb}$ ) y la gravedad ( $\Delta P_g$ ). Es decir:

$$P_{cap} \geq \Delta P_{con} + \Delta P_{eva} + \Delta P_{bmb} + \Delta P_g$$

El ciclo de operación es el siguiente. Dentro del evaporador el fluido se calienta por el calor aportado por el colector solar adherido a él. El diseño del evaporador propuesto por los autores permite que el fluido de trabajo cambie de fase. El gradiente de volumen debido a la evaporación da una propulsión extra al fluido. A continuación el vapor es llevado a un condensador donde disipa la energía adquirida en el evaporador. Finalmente el fluido de trabajo retorna al evaporador repitiéndose el ciclo.

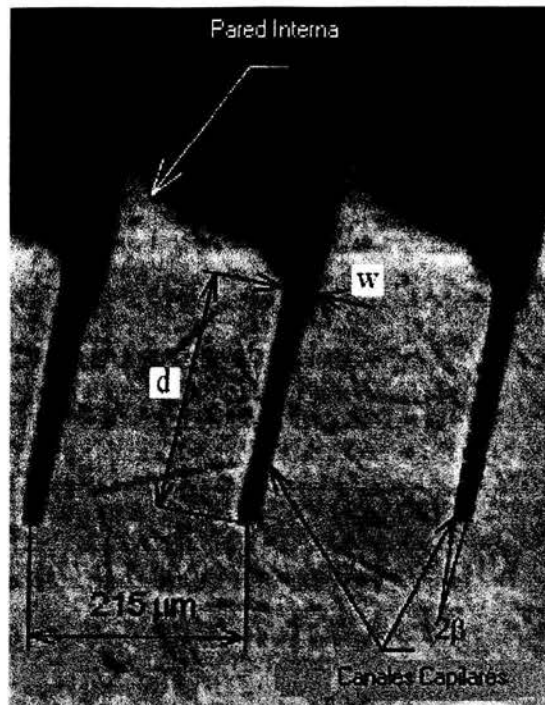


Figura 1-4: Microfotografía de los canales capilares elaborados por Bazzo y Nogoseke [1].

El evaporador tiene la doble función de entregar energía al fluido de trabajo y además impulsarlo para que circule a través del circuito. En general, el origen de la energía que entrega el evaporador al fluido va a determinar la denominación, forma y análisis del evaporador. Por ejemplo, si la energía utilizada es la brindada por la radiación solar, se requiere de adaptar al intercambiador un colector solar. Por ello, cuando el bombeo capilar es acoplado a un colector solar se denomina “*sistemas de bombeo capilar de calentamiento solar*”. Actualmente se han desarrollado varios trabajos sobre este tipo de dispositivos como por ejemplo los elaborados por Bazzo [1] y [2], que proponen una alternativa como sistemas de calefacción a nivel residencial y comercial.

Beckman y Duffie [5] ó Almanza y Muñoz [6] recomiendan que la placa colectora sea de un material con una alta conductividad termica, como por ejemplo el aluminio y el cobre. Para la matriz capilar o porosa no existe un material o forma estandarizada que se recomiende para ser utilizada en el evaporador, sin embargo los materiales más comunes son metales sinterizados, matrices plásticas o fibras naturales.



Proyectos como los de Chen y Bazzo, muestran distintas configuraciones de calentadores que emplean una matriz porosa para su funcionamiento. En los trabajos de Bazzo [1] y [2] se ejemplifica el uso del bombeo capilar con fines de calefacción. En el estudio elaborado con Nogoseke [1], ellos proponen un evaporador en el que ocurre un cambio de fase. A diferencia del sistema de bombeo capilar de Chen y Lin [3], donde emplean una matriz porosa como medio capilar, en este sistema, los autores provocan el efecto capilar cuando a la superficie interna de un tubo de aluminio le maquinan pequeños canales, del orden de micras, de tal forma que se forma una “*superficie capilar*” debido a dichos micro-canales. La figura 1-4 muestra una microfotografía de la superficie maquinada, en ella se puede observar la magnitud de dichos canales capilares.

Esta configuración tiene la ventaja de tener pocos problemas para iniciar el movimiento del fluido, sin embargo, las dificultades en la manufactura han limitado la presión que puede alcanzarse con este tipo de sistema; las presiones que se han logrado son del orden de 2 kPa, mientras que los dispositivos que emplean una matriz porosa varían desde los 3 hasta los 20 kPa. Esta matriz capilar se encuentra unida térmicamente a una placa de cobre que funciona como colector y se encarga de transmitir la energía solar al fluido de trabajo. El fluido de trabajo empleado fue acetona de alto grado y fue elegido por sus propiedades físicas, su viabilidad comercial y la temperatura de operación a la presión de atmosférica. Se provoca un vacío de cuando menos  $8 \times 10^{-5}$  torr previo a la inyección del fluido. Estos autores reportaron que teóricamente su proyecto puede alcanzar una presión de descarga de 1300 Pa, sin embargo, las imperfecciones debidas a la manufactura de la superficie interna del tubo y un inserto dentro del evaporador utilizado para separar la fase líquida del vapor, hacen que en la práctica esa presión disminuya hasta 400 Pa.

En otro trabajo de Bazzo [2], el autor propone un sistema distinto para producir el bombeo capilar. La bomba está colocada horizontalmente con la finalidad de disminuir los efectos de la gravedad. La matriz capilar está hecha de polietileno de ultra-alto peso molecular. En ese estudio se probaron dos fluidos de trabajo: acetona y anhídrido de amonía, “*acetone*” y “*anhydrous ammonia*”. Previo a la inyección de cualquiera de los fluidos de trabajo se provocó un vacío de al menos  $5 \times 10^{-6}$  torr. Las pérdidas de presión se calcularon por debajo de los 150 Pa, mientras que las presiones de descarga que se presentaron fueron de 2250 y 1950 Pa para el anhídrido de

amonía y la acetona, respectivamente. Como fuente de calor, los investigadores utilizaron dos calentadores eléctricos de corriente directa (CD) regulados manualmente, uno en contacto con la reserva de sustancia de trabajo del circuito y otro sujeto al exterior del evaporador de 9 y 10 W respectivamente, por ello este proyecto tiene la ventaja de poder regular la carga térmica. Un baño frío de una mezcla de agua y “*ethilene-glycol*” a 258 K es utilizado para remover el calor en el condensador, el cual se encuentra en contacto térmico con una placa fría.

Por otro lado, Chen y Lin [3] utilizan un evaporador de matriz porosa con la finalidad de mantener la estabilidad térmica de un microprocesador, el fluido de trabajo es FC-72, un refrigerante inerte derivado del fluor, mientras que la matriz es de polietileno; previo a la inyección del fluido, se provoca un vacío de  $10 \times 10^{-5}$  torr. En este evaporador el fluido entra por la parte superior en forma de líquido y es bombeado a la parte inferior por el efecto capilar producido por la matriz, en la parte inferior se encuentra el procesador que es la fuente de calor de este sistema. El fluido conforme se acerca a la placa comienza a cambiar de fase y sale a través de los canales, que se encargan de coleccionar los vapores que salen de la matriz. El cambio de fase es aprovechado por el sistema como un mecanismo extra de bombeo, ya que la expansión empuja al fluido que se encuentra en el colector y con ello se mantiene el circuito en movimiento.

## Fluidos de trabajo

Existe una gran cantidad de fluidos de trabajo que pueden ser empleados en la operación de las bombas capilares, sin embargo, se recomienda que los fluidos que se utilicen tengan una gran tensión superficial. El agua es uno de los fluidos de trabajo con mayor tensión superficial ya que supera los 70 dyn/cm a los 20 °C; sin embargo esa tensión disminuye con la temperatura.

Como se muestra en la figura 1-5, la tensión superficial en el agua disminuye cuando la temperatura aumenta, lo cual representa una desventaja en aplicaciones como el bombeo capilar de aplicación solar. En respuesta a ésta desventaja, Zhang [8] propone utilizar fluidos con un gradiente de tensión superficial positivo al cambio de temperatura, este tipo de comportamiento se presenta en soluciones acuosas diluidas en alcoholes de cadena larga.

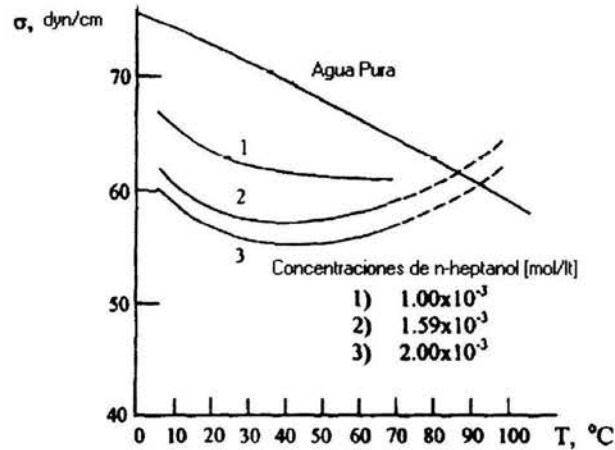


Figura 1-5: Cambio de la tensión superficial con la temperatura (Tomado de [8])

Por ejemplo, en la figura se observa el comportamiento de una solución acuosa del n-heptanol para distintas concentraciones, que alcanzan un gradiente positivo después de los 40 °C. El autor menciona que el amoníaco puede ser reemplazado por fluidos del grupo amino, los cuales se obtienen adicionando iones al amoníaco.

#### 1.4. Objetivos

Como se ha mostrado en las secciones anteriores la aplicación de la energía solar tiene una gran importancia, debido a que representa una fuente de energía limpia, renovable y de bajo costo. Existe una amplia variedad de usos en la energía solar, uno de los más interesantes son los *sistemas de bombeo capilar de calentamiento solar*. El interés sobre este tipo de dispositivos se debe a que son capaces de transportar un fluido de manera pasiva a lo largo de un circuito, es decir, sin necesidad de una bomba mecánica que requiere energía externa. El bombeo capilar de aplicación solar tiene la capacidad de entregar energía térmica y motriz a un fluido de trabajo; además tiene un bajo costo de operación, el desgaste es prácticamente nulo porque no cuenta con partes móviles y al ser de aplicación solar tienen la ventaja de que su fuente de energía no representa un costo para el usuario, sino al contrario, ayudan a reducir el consumo de energía comercial con los respectivos costos asociados, como el económico y el ambiental.

Bazzo y Nogoseke [1] proponen el uso de un sistema de bombeo capilar de aplicación solar para generar un fluido de alta temperatura que posteriormente puede ser utilizado para calentar una habitación o bien cubrir los requerimientos de agua caliente. Sin duda el elemento central de su sistema es el evaporador, ya que este componente aporta la energía térmica y la presión necesaria para mover el fluido de trabajo a lo largo del circuito. El evaporador está constituido por un tubo de aluminio con la superficie interna acanalada a fin de proporcionar una superficie capilar. Los autores mencionan que el evaporador puede ser construido utilizando una estructura capilar o bien una matriz porosa para generar la presión de descarga necesaria para el funcionamiento de la bomba.

De acuerdo a Bazzo [1], [2] y Zhang [8], los fluidos de trabajo empleados comúnmente en las bombas capilares y otros dispositivos similares son elegidos principalmente por su alta tensión superficial y entre los fluidos recomendados por los autores se tienen al agua, la acetona y el amoníaco. Para la elección del material de la matriz porosa, así como el espesor que debe tener esta, no existe un parámetro que indique cual es el mejor material a utilizar o bien el espesor ideal para la configuración del evaporador que se propuso.

Existen diversos criterios para elegir los valores de tales parámetros, como por ejemplo el económico, el térmico, la disponibilidad de los materiales o bien por decisión del diseñador. Cada uno de estos criterios tiene sus propias consideraciones, que determinan cuales son los materiales apropiados para el evaporador así como las dimensiones de éste. De todos estos criterios, en el presente trabajo se empleará el criterio térmico para determinar las condiciones bajo las cuales se obtiene el mejor desempeño del evaporador.

Como lo mencionan Bejan [9] y Howell y Buckius [12] una de las herramientas más útiles que existe para determinar la mayor cantidad de energía útil que puede producir un sistema es el análisis de Segunda Ley. Este tipo de análisis proporciona los medios para conocer la calidad de la energía, establece criterios para determinar el funcionamiento ideal de los equipos, indica la dirección de los procesos y establece los estados de equilibrio final para los procesos espontáneos.

El objetivo central del presente trabajo es determinar la generación de entropía, del sistema correspondiente a la figura 2-1, tomando en cuenta parámetros tales como el espesor del canal, la permeabilidad y porosidad del medio poroso, las propiedades de la sustancia de trabajo (viscosidad, conductividad, densidad, etc.), el flujo de energía solar y dimensiones del colector.

## 1.5. Alcances

El objetivo del presente trabajo es llegar a una expresión matemática para la generación de entropía que permita calcular una primera aproximación del comportamiento de ésta en un colector solar como el planteado. La ventaja de conocer la generación de entropía es que se cuenta con una herramienta que permite conocer de antemano la generación de energía no aprovechable para las condiciones de operación que se plantean.

El alcance general del proyecto es aportar una herramienta, con la cual se pueda conocer el espesor y permeabilidad adecuados que permitan que el sistema cuente con la mayor cantidad de energía útil posible, a partir del conocimiento del comportamiento de la entropía en un medio poroso.

Aunado a esto y por las características del volumen de control seleccionado (mostrado en la siguiente sección) el análisis de generación de entropía, debido a la circulación de un fluido a través de un medio poroso, que recibe un flujo constante de energía, puede ser extendido a otros sistemas, teniendo en consideración que se encuentren sometidos a condiciones similares a las mencionadas en el planteamiento del sistema.

## Capítulo 2

# MODELO MATEMÁTICO

### 2.1. Planteamiento

A partir del sistema de bombeo capilar de aplicación solar (ver figura 1-3) propuesto por Bazzo y Nogoseke [1] y reconociendo al evaporador como la parte central del sistema, en el presente estudio se muestra una variante del evaporador empleado en su proyecto. Donde el efecto capilar será producido mediante una matriz porosa. El calentador propuesto está basado en la estructura de un colector solar plano, figura 1-2, donde los tubos empleados para la circulación del fluido se sustituyen por una matriz porosa que se encuentra en el espacio entre el colector y el aislamiento posterior, dando como resultado una estructura como la planteada en la figura 2-1.

En ella se muestra la configuración básica de un evaporador que emplea una matriz porosa para generar la presión de descarga. Se tienen las siguientes consideraciones:

El flujo es unidireccional y en estado permanente; se desprecian los efectos de entrada; el sistema recibe un flujo de calor constante por medio del colector; en la parte inferior se encuentra aislado por lo que no existe un flujo de calor por esa cara; no hay cambio de fase y no se consideran los efectos gravitatorios. Existe equilibrio térmico entre el fluido y la matriz porosa. El sistema opera bajo la ley de Darcy para flujos en medios porosos. Con estas consideraciones, algunas de las preguntas más interesantes que surgen de la adición de la matriz porosa en el calentador son entorno al fluido de trabajo a emplear, el material de la matriz porosa y el espesor ideal de ésta.

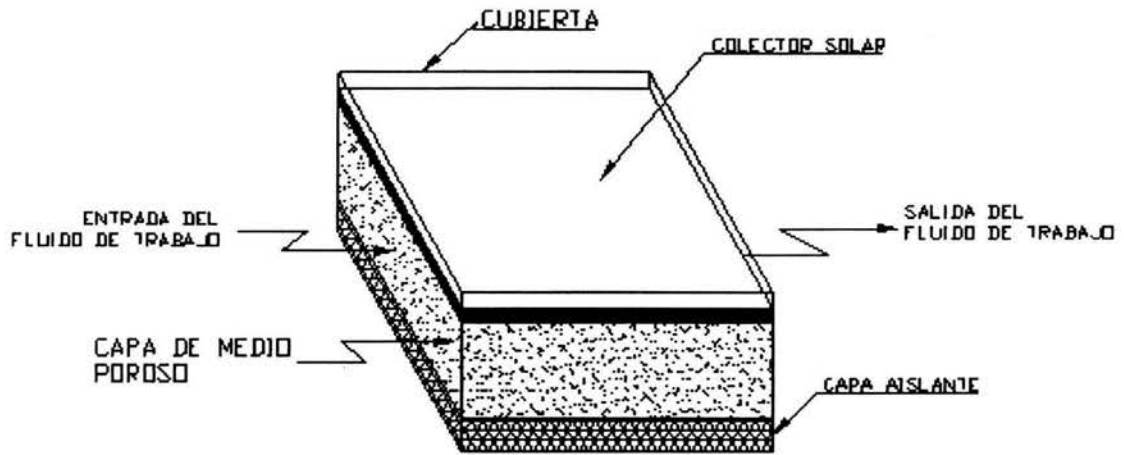


Figura 2-1: Esquema del calentador

## 2.2. Desarrollo

En esta primera fase del problema es indispensable definir el sistema que se va a analizar y las condiciones bajo las cuales va a operar. El presente estudio propone una variante del calentador propuesto por Bazzo y Nogoseke [1]. El dispositivo consiste de una capa de medio poroso por la cual circula un líquido en una sola dirección. Por la cara superior de la capa porosa el sistema recibe un flujo de calor constante y por la cara opuesta se encuentra aislada. En la figura 2-2 se muestra un esquema del volumen de control considerado, tomando en cuenta los flujos térmicos y másicos que ocurren en el sistema.

En esta sección se presenta un análisis basado en el principio de conservación de masa, en el principio de conservación de la energía (primera ley) y en la segunda ley de la termodinámica, para determinar la generación de entropía para un sistema como el planteado en el volumen de control de la figura 2-2.

Aplicando el principio de conservación de masa al volumen de control, se tiene:

$$\dot{m}_{x+\Delta x} = \dot{m}_x \quad (2.1)$$

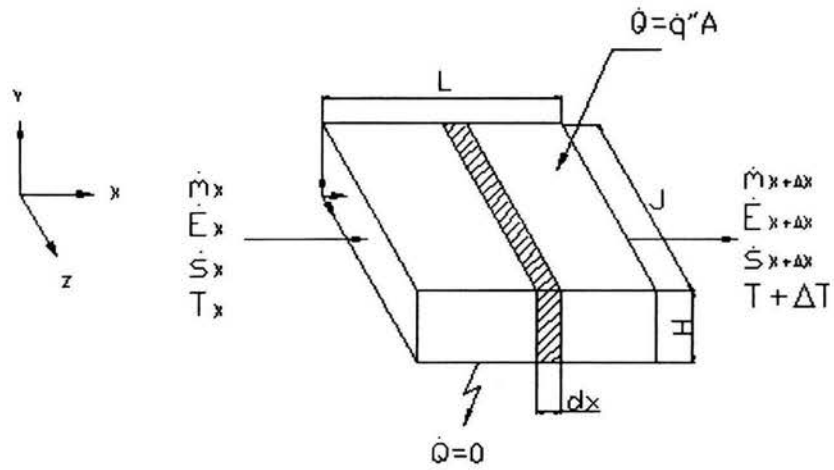


Figura 2-2: Modelo del volumen de control

El gasto puede ser expresado en términos de la velocidad a través de la ec. 2.2, el área de flujo de acuerdo a la geometría del sistema propuesto es  $A = JH$ .

$$\dot{m}_x = \rho JHu \quad (2.2)$$

Del principio de conservación de la energía aplicado al volumen de control, despreciando efectos cinéticos y potenciales, se tiene:

$$\delta \dot{Q} = \dot{m}_x (h_{x+\Delta x} - h_x) \quad (2.3)$$

Expandiendo en serie de Taylor el término  $h_{x+\Delta x}$ , y tomando sólo los dos primeros terminos de la serie, se define:

$$h_{x+\Delta x} = h_x + \frac{dh_x}{dx} dx \quad (2.4)$$

Sustituyendo la ec. 2.4 en 2.3, se obtiene:

$$\delta \dot{Q} = \dot{m}_x dh_x \quad (2.5)$$



Aplicando la segunda ley de la termodinámica al volumen de control, se tiene:

$$d\dot{S}_{gen} = \dot{m}_x (s_{x+\Delta x} - s_x) - \frac{\delta\dot{Q}}{T + \Delta T} \quad (2.6)$$

Expandiendo en serie de Taylor el término  $s_{x+\Delta x}$  y tomando sólo los dos primeros terminos de la serie, se tiene:

$$s_{x+\Delta x} = s_x + \frac{ds_x}{dx} dx \quad (2.7)$$

Sustituyendo la ec. 2.7 en 2.6, se obtiene:

$$d\dot{S}_{gen} = \dot{m}_x ds_x - \frac{\delta\dot{Q}}{T + \Delta T} \quad (2.8)$$

Despejando  $ds_x$  de la ecuación anterior, se llega a la siguiente expresión:

$$ds_x = \frac{1}{\dot{m}_x} \left[ d\dot{S}_{gen} + \frac{\delta\dot{Q}}{T + \Delta T} \right] \quad (2.9)$$

Por otro lado, de la definición de entalpía:

$$dh = du^* + Pdv^* + v^*dP \quad (2.10)$$

Donde,  $u^*$  es la energía interna y  $v^*$  es el volumen específico. Y de la primera ecuación de  $Tds$  o ecuación de Gibbs, que establece:

$$du^* = Tds - Pdv^* \quad (2.11)$$

Combinando ambas ecuaciones (2.10 y 2.11) se puede deducir la siguiente expresión:

$$\frac{dh}{dx} = T \frac{ds}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} \quad (2.12)$$

Sustituyendo las ecs. 2.5 y 2.9 en la expresión 2.12 (considerando  $dh_x = dh$  y  $ds_x = ds$ ) resulta:

$$\frac{d\dot{S}_{gen}}{dx} = \frac{\Delta T}{T(T + \Delta T)} \frac{\delta\dot{Q}}{dx} - \frac{\dot{m}_x}{\rho T} \frac{dP}{dx} \quad (2.13)$$

La función anterior puede ser expresada en términos de la velocidad o el gasto empleado para ello la Ley de Darcy, que relaciona la velocidad promedio de un flujo a través de un medio poroso con la caída de presión de la siguiente forma:

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.14)$$

Por medio de las ecs. 2.2 y 2.14 aplicadas a la función 2.13 se tiene la ecuación de generación de entropía en términos del gasto  $\dot{m}_x$  de la siguiente forma:

$$\frac{d\dot{S}_{gen}}{dx} = \frac{\Delta T}{T^2 \left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right)} \frac{\delta\dot{Q}}{dx} + \frac{\mu}{K} \frac{\dot{m}_x^2}{\rho^2 JH T} \quad (2.15)$$

o bien expresando el gasto en terminos de la velocidad por medio de la ec. 2.2, se tiene la ecuación de generación de entropía en términos de la velocidad  $u$  como:

$$\frac{d\dot{S}_{gen}}{dx} = \frac{\Delta T}{T^2 \left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right)} \frac{\delta\dot{Q}}{dx} + JH \frac{\mu}{K} \frac{u^2}{T} \quad (2.16)$$

Para el presente análisis se considera que el flujo de calor  $\dot{Q}$  que recibe el sistema es el neto, es decir, el flujo de calor que recibe todo el colector debe contemplar las posibles pérdidas que se puedan presentar. Por ejemplo, existen perdidas debidas a la cubierta, radiación, convección o polvo. Para ello se tomarán en cuenta las experiencias de Bazzo y Nogoseke [1] sobre bombeo capilar al momento de evaluar el flujo de calor que recibe el sistema. Conforme aumenta la longitud del colector, aumenta la cantidad de calor absorbida por el sistema, suponiendo que éste efecto se produce de forma lineal con respecto  $x$ , permite estimar la cantidad de calor absorbida longitudinalmente  $\dot{q}_x$  es:

$$\dot{q}_x = \frac{\dot{Q}}{L} x \quad (2.17)$$

Donde el factor  $\frac{\dot{Q}}{L}$  es la razón de cambio del flujo de calor con respecto a  $x$ , es decir:

$$\frac{\delta\dot{Q}}{dx} = \frac{\dot{Q}}{L} \quad (2.18)$$

De acuerdo a las experiencias de Bazzo [1] en su proyecto o Cruz et al. [4] en su colector trapezoidal, la temperatura de entrada en estos sistemas es alrededor de los 25°C (298 K) y

la diferencia de temperaturas producida es cercana a los 30°C (30 K) por ello la razón  $\frac{\Delta T}{T}$  se puede considerar pequeña respecto a 1, entonces las expresiones 2.15 y 2.16 pueden ser reescritas como:

$$\frac{d\dot{S}_{gen}}{dx} = \frac{\Delta T}{T^2} \frac{\dot{Q}}{L} + \frac{\mu}{K} \frac{\dot{m}_x^2}{\rho^2 JH T} \quad (2.19)$$

o bien en terminos de la velocidad:

$$\frac{d\dot{S}_{gen}}{dx} = \frac{\Delta T}{T^2} \frac{\dot{Q}}{L} + JH \frac{\mu}{K} \frac{u^2}{T} \quad (2.20)$$

Otro de los parámetros que falta por definir para conocer el comportamiento de la generación de entropía (ecs. 2.19 ó 2.20) es la distribución de temperaturas. El manual de medios porosos [14] menciona que para conocer la distribución de temperaturas de un flujo a través de un medio poroso confinado entre placas paralelas, pueden emplearse las soluciones de Graetz para flujos tapón “*slug flow*”, que se explican a continuación. Bejan [11], menciona que se puede explicar la transferencia de calor en un medio poroso confinado entre placas paralelas de forma análoga a lo que sucede en un flujo tapón en condiciones similares, debido a que en ambas situaciones se supone una velocidad uniforme y promedio longitudinalmente.

Para resolver el análisis de transferencia de calor requerido, por medio de las soluciones de Graetz, es conveniente suponer que el fluido se encuentra hidrodinámicamente desarrollado, el flujo es laminar en estado permanente, las propiedades son constantes, existe equilibrio térmico local (se tiene la misma temperatura en el fluido y el medio poroso para un punto) la dispersión térmica es despreciable y la temperatura de entrada es conocida. Las soluciones de flujo tapón pueden ser consultadas en distintas fuentes, Burmeister [13]. El autor menciona que en este tipo de flujos se puede esperar que  $Pr \ll 1$ . La distribución de temperaturas que presenta Burmeister para un sistema muy parecido al del presente trabajo es:

$$\frac{T - T_o}{q_w a/k} = 16Gz^{-1} + \frac{3\acute{x}^2 - 1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(\frac{-16n^2\pi^2}{Gz}\right) \cos(n\pi\acute{x}) \quad (2.21)$$

Donde  $\acute{x}$ , es una forma adimensional de la distancia perpendicular al movimiento del flujo, definido como  $\acute{x} = \frac{x}{a}$ .  $T_o$  es la temperatura de entrada del fluido,  $k$  es la conductividad y  $Gz$

es el número de Graetz, en el anexo se muestra el sistema para el cual se dedujo la distribución anterior. La temperatura del flujo dentro del canal ( $T_m$ ) y la diferencia entre ésta y la temperatura de la pared ( $\Delta T$ ) puede escribirse como:

$$T_m = T_o + \frac{\dot{Q}}{K_c J} \frac{16\chi}{Gz^*} \quad ; \quad \Delta T = \frac{1}{3} \frac{\dot{Q}}{K_c J} \quad (2.22)$$

Donde  $T_m$  es la temperatura del flujo y la temperatura en la pared es  $T_w = T_m + \Delta T$ . En el anexo se muestra el volumen de control para el cual el autor deduce la distribución de temperaturas anterior (ec. 2.21) y los ajustes utilizados para adaptar la solución al volumen de control del presente estudio y la deducción de  $T_m$  y  $\Delta T$ . Cabe mencionar que  $K_c$  es la conductividad combinada de la matriz porosa y el fluido de trabajo. Esta conductividad puede ser calculada de acuerdo con Bejan [10] y [11] por medio de la siguiente expresión:

$$K_c = \phi K_f + (1 - \phi) K_s \quad (2.23)$$

Está ecuación es un promedio ponderado entre las conductividades del medio poroso ( $K_s$ ) y la conductividad del fluido de trabajo ( $K_f$ ) donde la porosidad del medio ( $\phi$ ) es empleada como factor ponderante, ya que es una medida del espacio que ocupa cada uno de los materiales en el volumen de control. Definiendo la variable adimensional  $\chi$  como:

$$\chi = \frac{x}{L} \quad (2.24)$$

Sustituyendo las definiciones de  $T$  y  $\Delta T$  (ec. 2.22) y la variable anterior 2.24, en la ecuación de generación de entropía en terminos del gasto mostrada en la ec. 2.19, se tiene:

$$\frac{d\dot{S}_{gen}}{d\chi} = \frac{\dot{Q}^2}{3K_c J} \frac{1}{\left(T_o + \frac{\dot{Q}}{K_c J} \frac{16\chi}{Gz^*}\right)^2} + \frac{\mu}{K} \frac{\dot{m}_x^2}{\rho^2 J H} \frac{L}{T_o + \frac{\dot{Q}}{K_c J} \frac{16\chi}{Gz^*}} \quad (2.25)$$

La expresión anterior (ec. 2.25) permite conocer la generación de entropía en forma diferencial a lo largo del canal por medio de la variable  $\chi$ , que es una relación de la distancia a lo largo del canal que por su definición oscila desde 0 hasta 1. Si la expresión anterior es integrada con respecto a  $\chi$  desde 0 hasta 1, se conocerá la generación de entropía producida en todo el canal, de ello se obtiene:

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\dot{Q}Gz^*}{48T_o} \left[ \frac{1}{1 + \frac{K_c J}{\dot{Q}} \frac{Gz^*}{16} T_o} \right] + \frac{\mu}{K} \frac{K_c L \dot{m}_x^2}{\rho^2 H \dot{Q}} \frac{Gz^*}{16} \ln \left[ 1 + \frac{\dot{Q}}{K_c J} \frac{16}{Gz^*} \frac{1}{T_o} \right] \quad (2.26)$$

Para mostrar todas las variables involucradas en la ecuación anterior se hace uso de los siguientes parámetros:

$$Gz^* = \frac{Dh \text{ Re Pr}}{L}; Dh = 2H; \text{Re} = \frac{\rho u Dh}{\mu}; \text{Pr} = \frac{\mu C_p}{K_c}; u = -\frac{K \Delta P}{\mu L} \quad (2.27)$$

Donde el Graetz también puede ser expresado, a partir de lo anterior, como:

$$Gz^* = -\frac{4\rho C_p \Delta P}{\mu K_c L^2} H^2 K \quad (2.28)$$

### Adimensionalización

Con la finalidad de mostrar de una manera más clara el comportamiento de la generación de entropía, y a su vez tratar de expresar la función con la menor cantidad de parámetros posibles se propone adimensionalizar las principales variables del sistema. Otra ventaja que se tiene al emplear parámetros adimensionales es que al variar estos parámetros no se requiere de realizar pruebas a cada una de las variables involucradas en dichos parámetros para conocer sus efectos sobre la función. Simplemente al variar el grupo, se conoce la variación sobre las variables, donde cada variable puede cambiar libremente siempre y cuando su combinación corresponda al valor del parámetro adimensional.

El proceso de adimensionalización también permite descartar variables que no tienen un gran efecto sobre el fenómeno físico que se quiere explicar. Por último una de las ventajas conocidas del empleo de grupos adimensionales es que hacen posible el uso de las leyes de escala, éstas permiten emplear los resultados obtenidos en un modelo, en un prototipo de tamaño real, reduciendo así los costos de realizar una gran cantidad de pruebas.

Las principales variables del presente estudio son la permeabilidad  $K$ , el espesor del canal  $H$  y la entropía generada  $\dot{S}_{gen}$ . En base a estas variables se proponen las siguientes adimensionalizaciones:

$$\Phi = \frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{S}_R}; \psi = \frac{K}{L^2}; \zeta = \frac{H}{L} \quad (2.29)$$

Donde  $\dot{S}_R$  es la entropía de referencia. Teniendo en cuenta las ventajas de manejar variables adimensionales, es conveniente expresar el número de Graetz en términos de tales variables (ecs. 2.29), con ello los cambios conducen a la siguiente expresión:

$$Gz^* = -\frac{4\rho C_p \Delta P L^2}{\mu K_c} \psi \zeta^2 \quad (2.30)$$

Como podemos ver en la ec. 2.26, el Graetz no es el único parámetro que está basado en alguna de las variables de interés de este análisis, sino además el gasto. Este parámetro puede ser expresado en términos de las variables adimensionales de la siguiente manera:

$$\dot{m}_x^2 = \frac{\rho^2 J^2 L^4 \Delta P^2}{\mu^2} \zeta^2 \psi^2 \quad (2.31)$$

Al sustituir tanto el Graetz (ec. 2.30), así como el gasto (ec. 2.31) en términos de las variables adimensionales y reemplazando la permeabilidad, el espesor del canal y la generación de entropía que aparecen en la función de generación de entropía (ec. 2.26) por sus formas adimensionales (ecs. 2.29) dicha función toma el siguiente aspecto:

$$\begin{aligned} \Phi \dot{S}_R = & \left( -\frac{\rho C_p L^2 \Delta P \dot{Q}}{12 \mu K_c T_o} \right) \psi \zeta^2 \left[ \frac{1}{1 - \frac{\rho C_p \Delta P L^2 J T_o}{4 \mu \dot{Q} K_c} \psi \zeta^2} \right] \\ & - \left( \frac{\rho C_p J^2 L^4 \Delta P^3}{4 \mu^2 \dot{Q}} \right) \psi^2 \zeta^3 \ln \left[ 1 - \frac{4 \mu \dot{Q} K_c}{\rho C_p J L^2 \Delta P T_o} \left( \frac{1}{\psi \zeta^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.32)$$

Definiendo el parámetro  $\alpha$  y la entropía de referencia  $\dot{S}_R$  de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{\rho C_p \Delta P L^2 J T_o}{4 \mu \dot{Q} K_c}; \dot{S}_R = -\frac{\rho C_p L^2 \Delta P \dot{Q}}{12 \mu K_c T_o} \quad (2.33)$$

Dividiendo entre  $\dot{S}_R$  la expresión de generación de entropía ec. 2.32, sustituyendo las definiciones mencionadas en la ec. 2.33 y simplificando:

$$\Phi = \psi\zeta^2 \left[ \frac{1}{1 - \alpha\psi\zeta^2} \right] + \left( \frac{3K_c T_o J^2 L^2 \Delta P^2}{\mu \dot{Q}^2} \right) \psi^2 \zeta^3 \ln \left[ 1 - \frac{1}{\alpha\psi\zeta^2} \right] \quad (2.34)$$

Definiendo el parámetro  $\beta$  como:

$$\beta = \frac{3K_c T_o J^2 L^2 \Delta P^2}{\mu \dot{Q}^2} \quad (2.35)$$

Se tiene finalmente la función de generación de entropía en forma adimensional:

$$\Phi = \psi\zeta^2 \left[ \frac{1}{1 - \alpha\psi\zeta^2} \right] + \beta\psi^2 \zeta^3 \ln \left[ 1 - \frac{1}{\alpha\psi\zeta^2} \right] \quad (2.36)$$

### 2.3. Optimización

La expresión 2.36 es la ecuación de generación de entropía escrita en forma adimensional, la cual depende principalmente de variables como la permeabilidad adimensional y el espesor adimensional. Tal expresión es una herramienta útil que permite cuantificar la generación de entropía en el sistema planteado. Al llevar a cabo un análisis de minimización a la función 2.36 con respecto a las variables mencionadas, se cuenta con un criterio a través del cual se puede encontrar los valores óptimos tanto para  $\psi$  como para  $\zeta$ . Dichos valores pueden ser encontrados por medio de las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \psi} = 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} = 0 \quad (2.37)$$

Donde al ser aplicadas las derivadas parciales a la función de generación de entropía, ec. 2.36, se tiene:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \psi} = 1 + 2\beta\psi\zeta (1 - \alpha\psi\zeta^2)^2 \ln \left[ 1 - \frac{1}{\alpha\psi\zeta^2} \right] - \beta\psi\zeta (1 - \alpha\psi\zeta^2) \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} = 1 + \frac{3}{2}\beta\psi\zeta (1 - \alpha\psi\zeta^2)^2 \ln \left[ 1 - \frac{1}{\alpha\psi\zeta^2} \right] - \beta\psi\zeta (1 - \alpha\psi\zeta^2) \quad (2.39)$$

## Capítulo 3

# PRUEBAS Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados en forma de gráficas y tablas que permitan observar el comportamiento de la función de generación de entropía de forma adimensional, ec. 2.36 y las funciones de optimización, 2.38 y 2.39. Esta información tiene la finalidad de brindar una perspectiva más clara del comportamiento de la entropía.

La información de las gráficas fue elaborada empleando dos tipos de materiales en el colector, el primero es el aluminio y el segundo es cobre. Cada uno de estos materiales fueron probados para tres distintos fluidos de trabajo y a su vez cada fluido fue ensayado con tres distintas porosidades. La información de cada gráfica se brinda de la siguiente manera. En el eje de las abscisas se encuentra la permeabilidad en su forma adimensional  $\psi$  y en el eje de las ordenadas la entropía adimensional  $\Phi$ , ambas en escalas logarítmicas, las curvas muestran el comportamiento de la entropía para distintos espesores  $\zeta$ 's, desde 0.1 hasta 1.

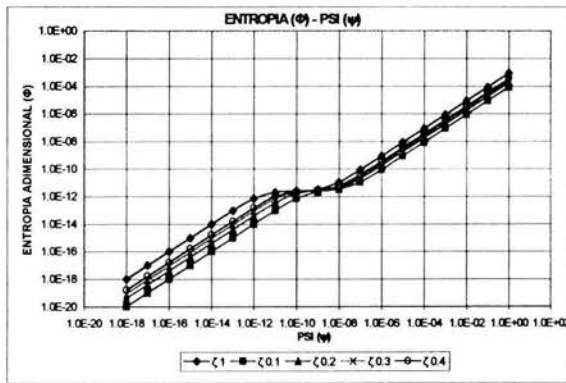
Las propiedades de los fluidos de trabajo, así como de los materiales de los colectores fueron tomados de la fuente "The CRC handbook of thermal engineering" [15], la información de las permeabilidades fueron tomadas de Kaviany [16], los valores de la caída de presión, el calor recibido y de la temperatura de entrada fueron tomados de las experiencias de Bazzo y Nogoseke en su bomba capilar [1], finalmente el ancho L y el largo J, se consideran unitarios.

A continuación se muestran las curvas generadas empleando la función de generación de entropía y las funciones de optimización. En estos resultados se muestra el comportamiento de las funciones para distintos fluidos de trabajo y distintos colectores, para una porosidad del 50%, una caída de presión de 500 Pa, un flujo de calor de 500 W y una temperatura de entrada

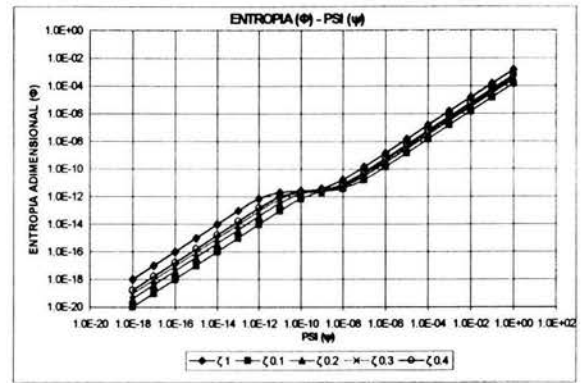


del fluido de trabajo de 293 K, dichas gráficas son las siguientes G1, G4, G7, G10, G13 Y G16. Seguido de la información de la generación de entropía se muestra el comportamiento de las ecuaciones de optimización. Primero se muestra la función de optimización con respecto a  $\psi$ , ec. 2.38 el comportamiento de ésta se muestra en las curvas G2, G5, G8, G11, G14 y G17. Después se muestra el comportamiento de la función de optimización con respecto a  $\zeta$  ec. 2.39 en las imágenes G3, G6, G9, G12, G15 y G18; al pie de cada una se señalan los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  empleados. Dichos arreglos se muestran a partir de la siguiente página.

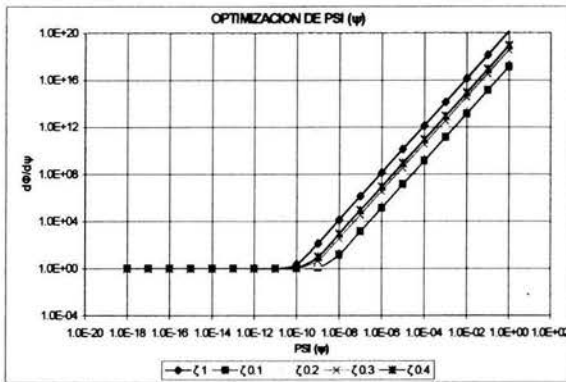
Fluido Acetona  
Aluminio Cobre



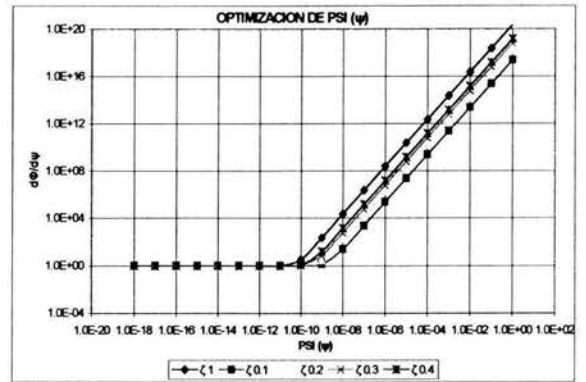
G1:  $\alpha = -3.9103E+11$   $\beta = 3.430E+08$



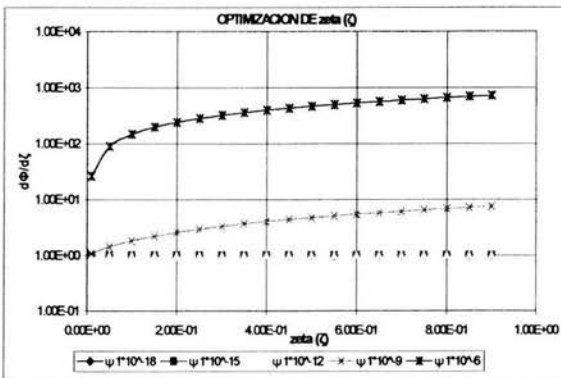
G4:  $\alpha = -3.9103E+11$   $\beta = 5.788E+08$



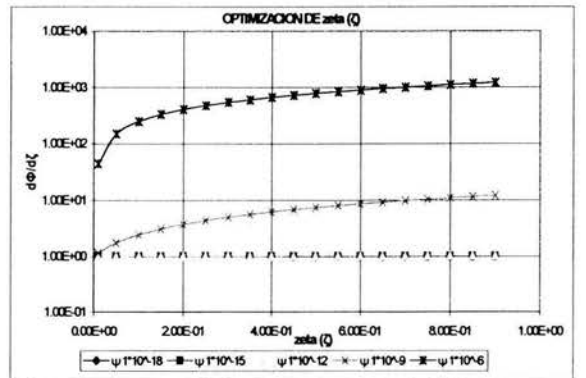
G2:  $\alpha = -3.9103E+11$   $\beta = 3.430E+08$



G5:  $\alpha = -3.9103E+11$   $\beta = 5.788E+08$

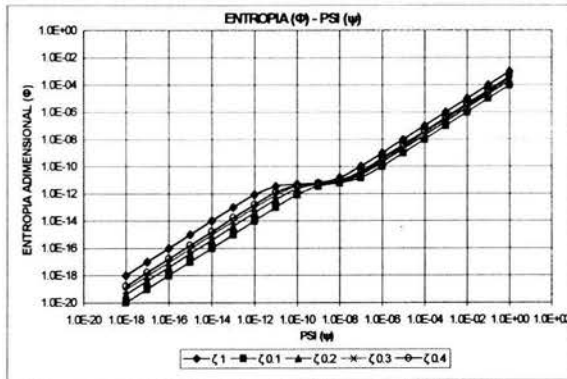


G3:  $\alpha = -3.9103E+11$   $\beta = 3.430E+08$

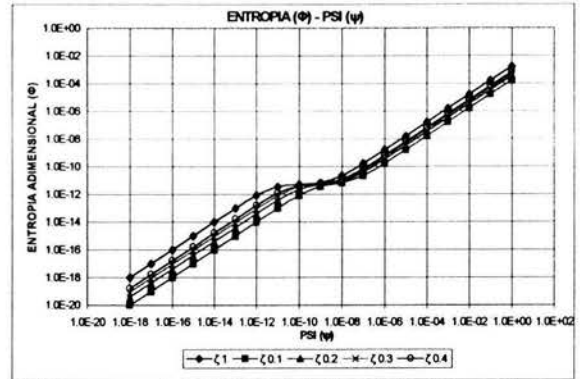


G6:  $\alpha = -3.9103E+11$   $\beta = 5.788E+08$

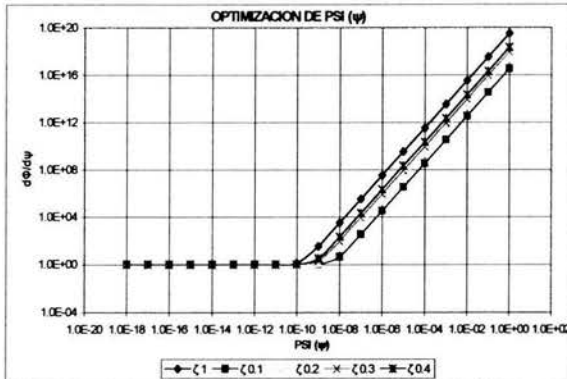
Fluido Benceno  
Aluminio Cobre



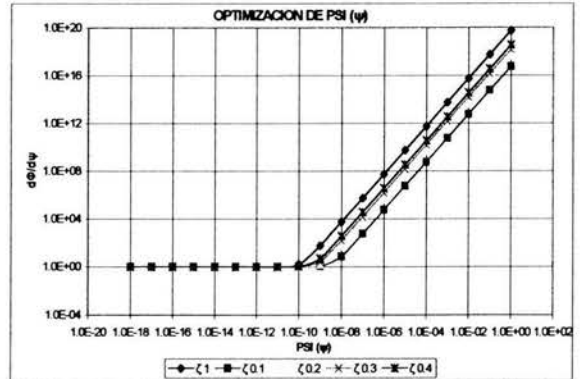
G7:  $\alpha = -1.8424E+11$   $\beta = 1.803E+08$



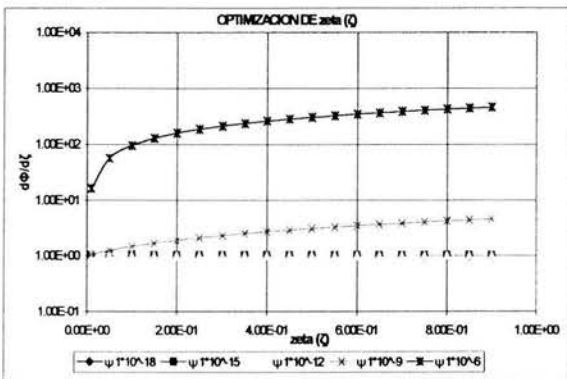
G10:  $\alpha = -1.8424E+11$   $\beta = 3.043E+08$



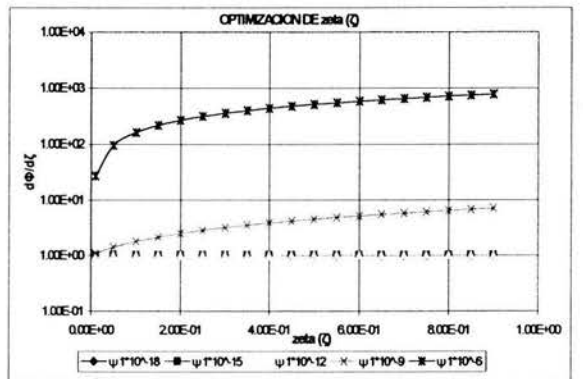
G8:  $\alpha = -1.8424E+11$   $\beta = 1.803E+08$



G11:  $\alpha = -1.8424E+11$   $\beta = 3.043E+08$

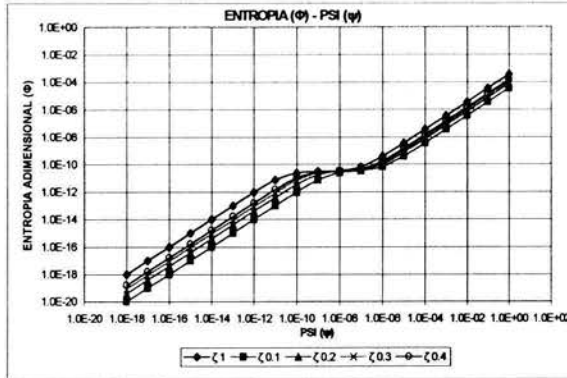


G9:  $\alpha = -1.8424E+11$   $\beta = 1.803E+08$

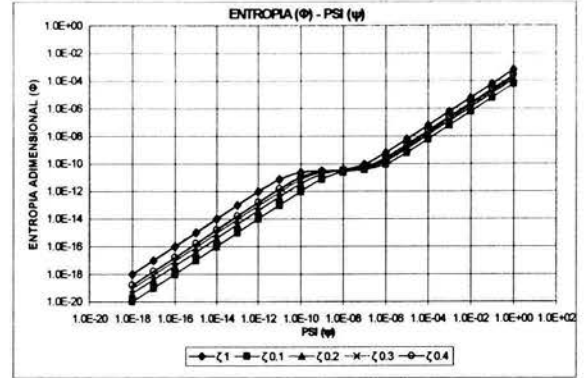


G12:  $\alpha = -1.8424E+11$   $\beta = 3.043E+08$

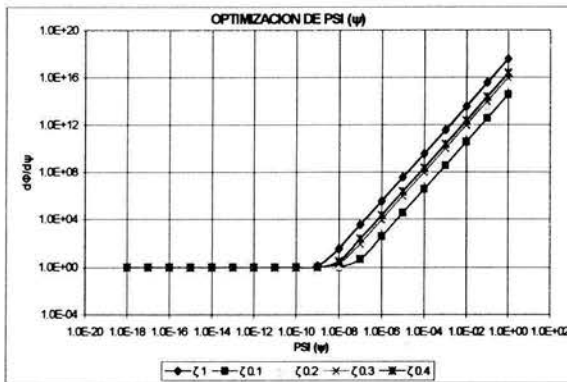
Fluido Agua  
Aluminio Cobre



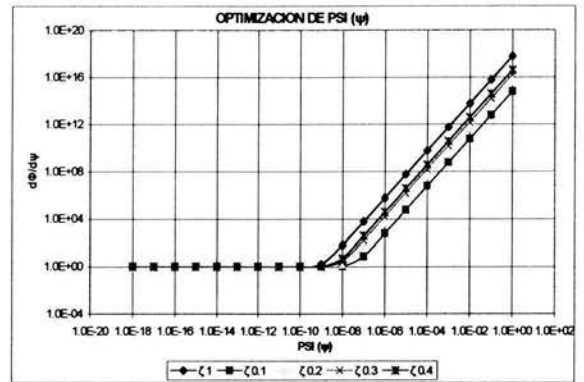
G13:  $\alpha = -3.1358E+10$   $\beta = 1.112E+07$



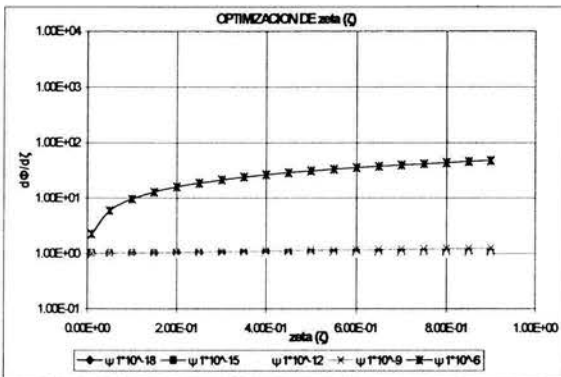
G16:  $\alpha = -3.1358E+10$   $\beta = 1.874E+07$



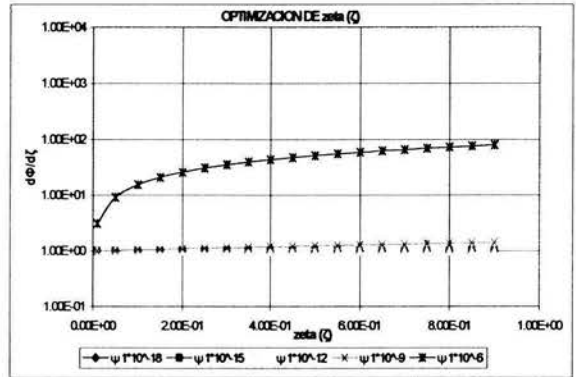
G14:  $\alpha = -3.1358E+10$   $\beta = 1.112E+07$



G17:  $\alpha = -3.1358E+10$   $\beta = 1.874E+07$



G15:  $\alpha = -3.1358E+10$   $\beta = 1.112E+07$



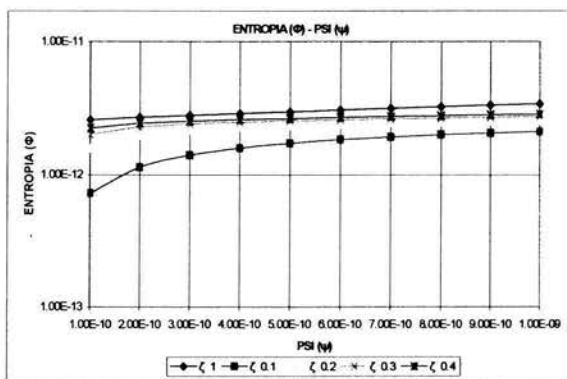
G18:  $\alpha = -3.1358E+10$   $\beta = 1.874E+07$

Los arreglos de gráficas anteriores muestran el comportamiento del colector planteado bajo las condiciones de operación determinadas por  $\alpha$  y  $\beta$ . Vistos como columnas se observa que de tres en tres renglones se mantienen las disposiciones mencionadas, lo que permite ver el panorama completo desde como se comporta la función de generación de entropía, ec. 2.36 hasta las funciones de optimización 2.38 y 2.39.

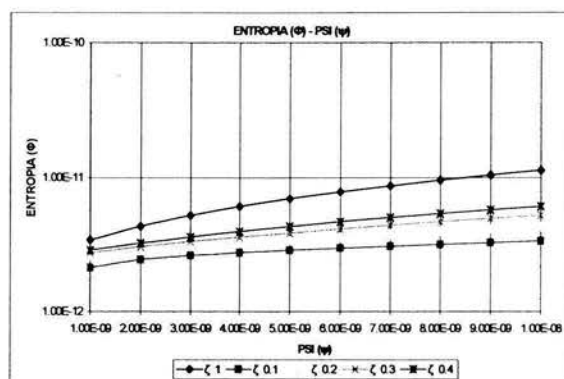
En general se puede observar que las curvas de generación de entropía se comportan casi como una recta (tomando en cuenta las escalas) salvo en la parte media, en la cual se observa un pequeño “escalón”. Las siguientes curvas (OPTIMIZACION DE PSI) muestran la optimización con respecto a  $\psi$  (ver ec. 2.38) para valores de fijos de zeta que son 1, 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4, de estas destaca que hasta prácticamente la mitad de la imagen, la curva se mantiene constante a un valor del gradiente de  $\psi$  igual a 1 y después se dispara. Por último, se encuentran las curvas que muestran el comportamiento de la optimización con respecto a  $\zeta$  (OPTIMIZACION DE ZETA) ver ec. 2.39, para  $\psi$ 's de  $1 \cdot 10^{-18}$ ,  $1 \cdot 10^{-15}$ ,  $1 \cdot 10^{-12}$ ,  $1 \cdot 10^{-9}$  y  $1 \cdot 10^{-6}$ , en dichas curvas se observa que para valores pequeños de  $\psi$  el gradiente es casi constante a 1, mientras que a valores mayores ( $1 \cdot 10^{-9}$  y  $1 \cdot 10^{-6}$ ) se comporta de una forma similar a una parábola. En las conclusiones se comenta más ampliamente lo observado en las gráficas anteriores.

En el siguiente arreglo de gráficas se muestra un acercamiento a la región escalonada o de estabilización que se observó en las gráficas G1, G4, G7, G10, G13 ó G16, los siguientes acercamientos sólo presentan el comportamiento utilizando un colector de aluminio, debido a que en el colector de cobre se presenta un comportamiento muy parecido.

### Fluido: Acetona

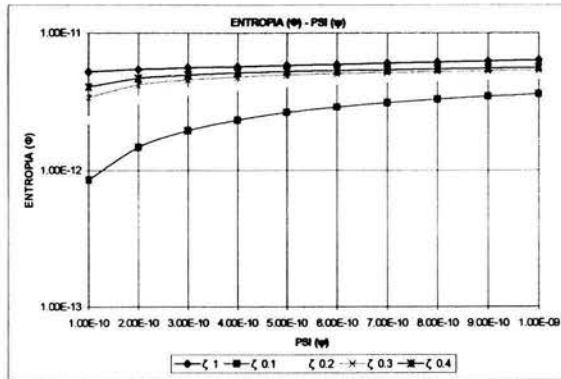


G19:  $\alpha = -3.9103E+11$   $\beta = 3.430E+08$

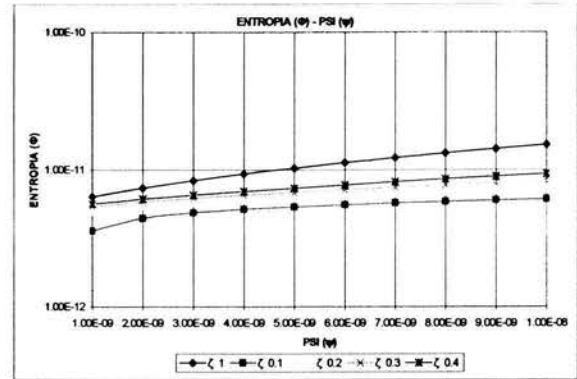


G20:  $\alpha = -3.9103E+11$   $\beta = 3.430E+08$

## Fluido: Benceno

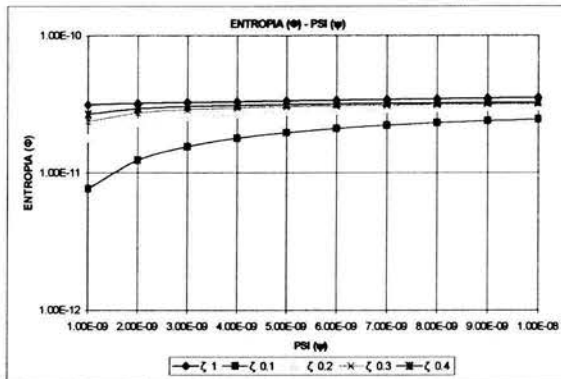


**G21:**  $\alpha = -1.8424E+11$   $\beta = 1.803E+08$

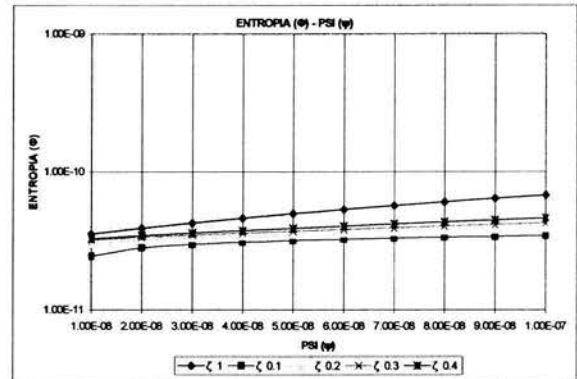


**G22:**  $\alpha = -1.8424E+11$   $\beta = 1.803E+08$

## Fluido: Agua



**G23:**  $\alpha = -3.1358E+10$   $\beta = 1.112E+07$



**G24:**  $\alpha = -3.1358E+10$   $\beta = 1.112E+07$

En las gráficas anteriores destaca que en lo que parecía un escalón, realmente se presenta un crecimiento continuo, aunque de una manera mucho más mesurada que otras regiones, en las conclusiones se hacen más comentarios respecto a estos acercamientos.

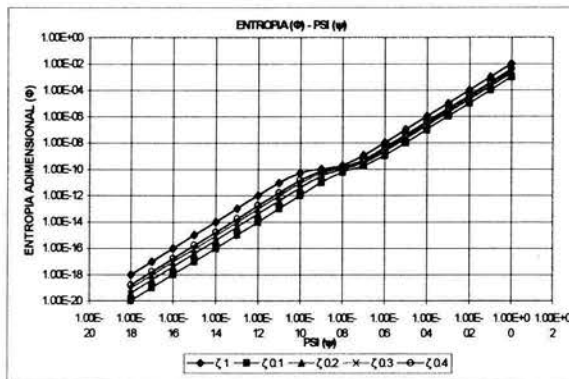
### Dependencia de $\alpha$ y $\beta$

Las gráficas anteriores permiten conocer el panorama de la generación de entropía en el sistema planteado, basándose en información y materiales que son recomendados por distintos autores (ver los citados al inicio de este capítulo), sin embargo, el cambio de los materiales utilizados no permite ver claramente cual es la influencia de cada uno de los parámetros involucrados en la generación de entropía.

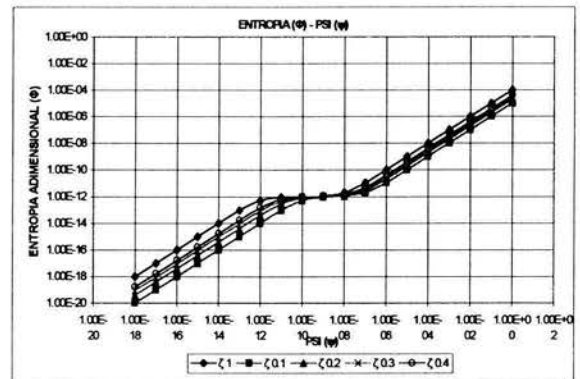
Con el propósito de tener una visión más clara de los efectos producidos por los parámetros involucrados ( $\alpha$  y  $\beta$ ) se incluye una serie de graficas en las que se realizan variaciones sobre uno de los parámetros mientras que el otro se mantiene fijo y viceversa. Tomando en cuenta la información generada por las anteriores gráficas, se puede reconocer cuales son los rangos de valores de dichos parámetros. Estos son:

Parámetro	Mínimo	Máximo
$\alpha$	$-3.13 \times 10^{10}$	$-3.91 \times 10^{11}$
$\beta$	$5.37 \times 10^6$	$7.79 \times 10^8$
$\psi$	$1 \times 10^{-18}$	1
$\zeta$	0.1	1

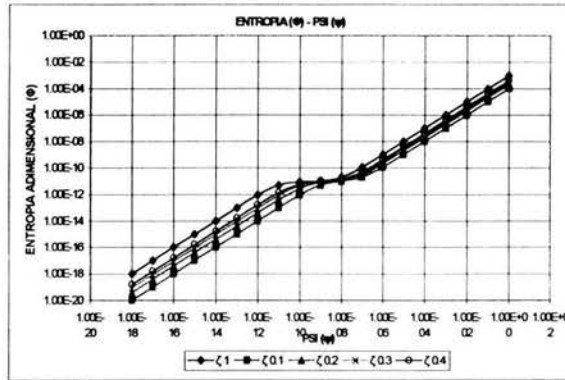
En base a esta información se elaboran cinco gráficas. Las primeras tres muestran la influencia de  $\alpha$  en un rango de  $-1 \times 10^{10}$  a  $-1 \times 10^{12}$ , utilizando un valor de  $\beta$  de  $1 \times 10^8$ . Las siguientes dos con apoyo de la segunda del grupo anterior muestran el comportamiento de  $\beta$  en un rango que va de  $1 \times 10^7$  hasta  $1 \times 10^9$  utilizando un  $\alpha$  de  $-1 \times 10^{11}$ . Las gráficas generadas con estas consideraciones son las siguientes.



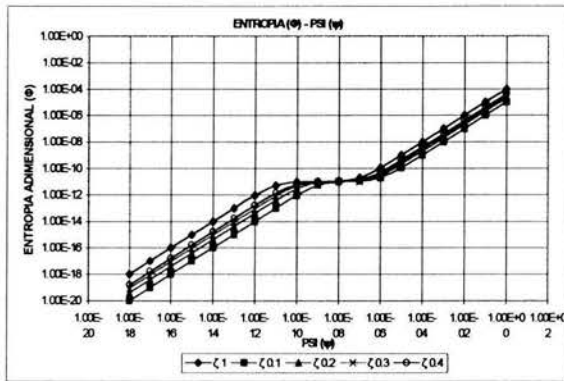
G25:  $\alpha = -1.00\text{E}+10$   $\beta = 1.00\text{E}+08$



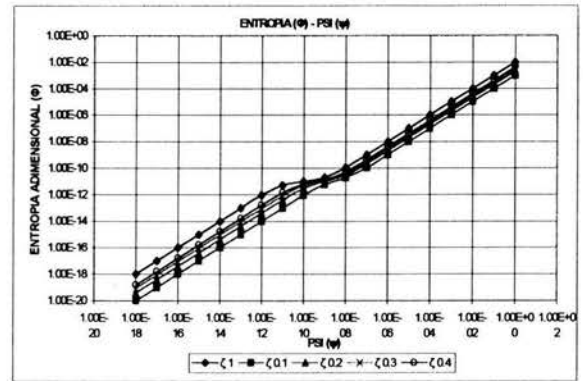
G26:  $\alpha = -1.00\text{E}+12$   $\beta = 1.00\text{E}+08$



**G27:**  $\alpha = -1.00E+11$   $\beta = 1.00E+08$



**G28:**  $\alpha = -1.00E+11$   $\beta = 1.00E+07$



**G29:**  $\alpha = -1.00E+11$   $\beta = 1.00E+09$

Las gráficas de la G25 a la G27, permiten observar el impacto de  $\alpha$  en la generación de entropía, ec. 2.36, dicho efecto se refleja como una disminución en el nivel de la zona del escalón, que concuerda con el inverso del valor de  $\alpha$  (en valor absoluto) ya que los valores van de  $-1 \cdot 10^{10}$  hasta  $-1 \cdot 10^{12}$ . Por otro lado, de la G27 a la G29 se muestran los cambios producidos por la variación de  $\beta$ , en contra parte a lo anterior, el aumento de  $\beta$  produce un aumento en la entropía principalmente en la región después del escalón (zona derecha de las imágenes), el nivel del escalón prácticamente no cambia.

### Curvas paramétricas de $\alpha$

En esta sección se presenta una variación de la función de generación de entropía ec. 2.36, con la que se puede reducir el número de parámetros involucrados, para dicha transformación se proponen los siguientes parámetros:



$$\Phi = \beta^a \bar{\Phi}; \psi = \beta^b \bar{\psi}; \zeta = \beta^c \bar{\zeta} \quad (3.1)$$

La generación de entropía puede escribirse como:

$$\bar{\Phi} = \beta^{b+2c-a} \bar{\psi} \bar{\zeta}^2 \left[ \frac{1}{1 - \alpha \beta^{b+2c} \bar{\psi} \bar{\zeta}^2} \right] + \beta^{1+2b+3c-a} \bar{\psi}^2 \bar{\zeta}^3 \ln \left[ 1 - \frac{1}{\alpha \beta^{b+2c} \bar{\psi} \bar{\zeta}^2} \right] \quad (3.2)$$

De los distintos exponentes de  $\beta$  se reconocen tres expresiones ( $b + 2c - a$ ,  $1 + 2b + 3c - a$  y  $b + 2c$ ); al igualar estas expresiones a cero se tiene la ventaja de que  $\beta$  no aparece en la función de generación de entropía, reflejándose en un cambio en el rango de valores de las variables  $\Phi$ ,  $\psi$  y  $\zeta$  determinado de acuerdo a los parámetros de transformación por potencias de  $\beta$ . El sistema de ecuaciones formado por los exponentes de  $\beta$  en la ec. 3.2 es el siguiente:

$$b + 2c - a = 0 \quad (3.3)$$

$$1 + 2b + 3c - a = 0 \quad (3.4)$$

$$b + 2c = 0 \quad (3.5)$$

Donde las soluciones del sistema son las siguientes:

$$a = 0; b = -2; c = 1 \quad (3.6)$$

Esto da como resultado, que los parámetros originales ( $\Phi, \psi, \zeta$ ) se ven influenciados por  $\beta$  de la siguiente manera:

$$\Phi = \bar{\Phi}; \psi = \beta^{-2} \bar{\psi}; \zeta = \beta \bar{\zeta} \quad (3.7)$$

Que en la ecuación 3.2 da como resultado:

$$\bar{\Phi} = \bar{\psi} \bar{\zeta}^2 \left[ \frac{1}{1 - \alpha \bar{\psi} \bar{\zeta}^2} \right] + \bar{\psi}^2 \bar{\zeta}^3 \ln \left[ 1 - \frac{1}{\alpha \bar{\psi} \bar{\zeta}^2} \right] \quad (3.8)$$

Esta función solo incluye como parámetro a  $\alpha$ , mientras que la influencia de  $\beta$  se ve reflejada como un cambio en el rango de operación de las variables  $\psi$  y  $\zeta$ . Para conocer el rango de operación de las variables transformadas ( $\bar{\psi}$ ,  $\bar{\zeta}$  y  $\bar{\Phi}$ ), se toma como referencia los mostrados por las variables sin modificar ( $\psi$ ,  $\zeta$  y  $\Phi$ ). Las gráficas anteriores (G1-G18) fueron elaboradas para una porosidad del 50 %, sin embargo para variaciones que van desde el 25 hasta 75 %, se observaron los siguientes rangos de valores para los parámetros involucrados. En el presente estudio sólo se reportaron los resultados para porosidades del 50 % debido a que la variación de este parámetro prácticamente no cambia la forma de la curva.

Parámetro	Mínimo	Máximo
$\alpha$	$-3.13 \times 10^{10}$	$-3.91 \times 10^{11}$
$\beta$	$5.4 \times 10^6$	$7.8 \times 10^8$
$\psi$	$1 \times 10^{-18}$	1
$\zeta$	0.1	1

A partir de la tabla anterior se proponen los siguientes valores:

Parámetro	Mínimo	Máximo
$\alpha$	$-3 \times 10^{10}$	$-4 \times 10^{11}$
$\beta$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^9$
$\psi$	$1 \times 10^{-20}$	$1 \times 10^{-5}$
$\zeta$	0.1	1

El rango de  $\psi$  fue reducido tomando en cuenta las permeabilidades reportadas por Kaviany [16] para distintos materiales. Los valores de psi modificada ( $\bar{\psi}$ ) se obtienen como el producto del cuadrado de Beta por Psi, de ello se tiene lo siguiente:

$$\begin{array}{lll}
 \psi * \beta^2 & \beta^2 : 1 \times 10^{12} & \beta^2 : 1 \times 10^{18} \\
 \psi : 1 \times 10^{-20} & 1 \times 10^{-8} & 1 \times 10^{-2} \\
 \psi : 1 \times 10^{-5} & 1 \times 10^7 & 1 \times 10^{13}
 \end{array}$$

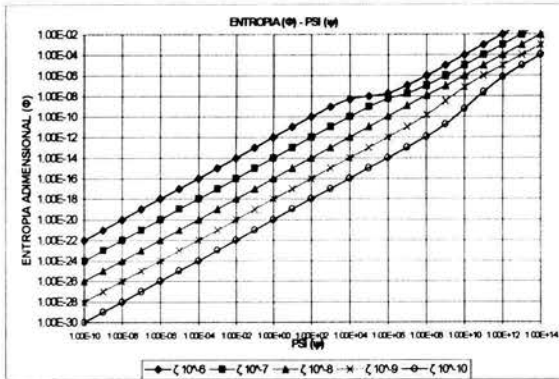
La tabla anterior muestra el producto  $\psi * \beta^2$ , con ello se obtiene el rango de valores que se pueden esperar de la psi modificada ( $\bar{\psi}$ ), de la tabla resaltan los valores  $1 \times 10^{-8}$  y  $1 \times 10^{13}$  como los extremos de tales productos. De igual forma para conocer los valores de la división de zeta entre beta, se tiene lo siguiente:

$\zeta / \beta$	$\beta : 1 \times 10^6$	$\beta : 1 \times 10^9$
$\zeta : 0.1$	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-10}$
$\zeta : 1$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-9}$

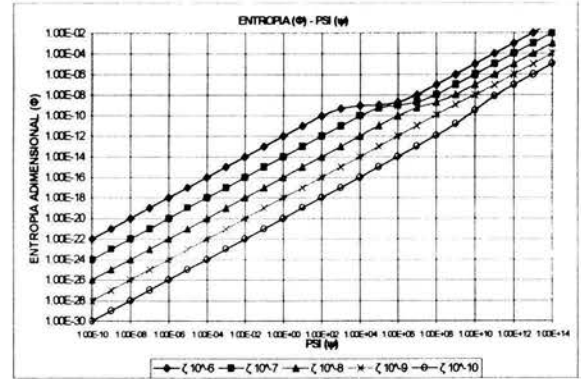
De esta tabla, el rango de valores para la zeta modificada ( $\bar{\zeta}$ ) va desde  $1 \times 10^{-6}$  hasta  $1 \times 10^{-10}$ . Como se mencionó,  $\alpha$  está comprendido entre  $-3 \times 10^{10}$  y  $-4 \times 10^{11}$ . Sin embargo, para tener un panorama más amplio del comportamiento de la función es conveniente aumentar un poco más dicho intervalo, por lo que se propone que este comprendido desde  $-5 \times 10^8$  hasta  $-1 \times 10^{13}$ . Finalmente, la ec. 3.8 se encuentra graficada para los siguientes rangos de valores:

Parámetro	Mínimo	Máximo
$\alpha$	$-1 \times 10^8$	$-1 \times 10^{13}$
$\bar{\psi}$	$1 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{13}$
$\bar{\zeta}$	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-6}$

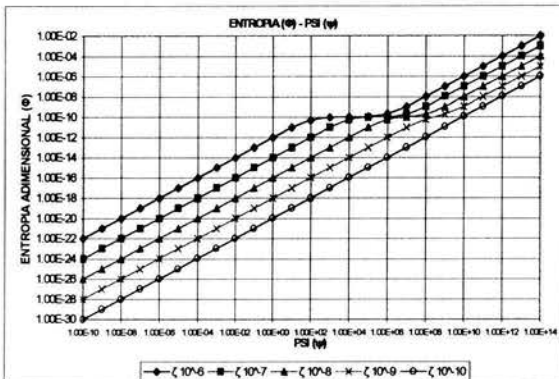
En la siguiente página se muestran las gráficas elaboradas a partir de la ec. 3.8:



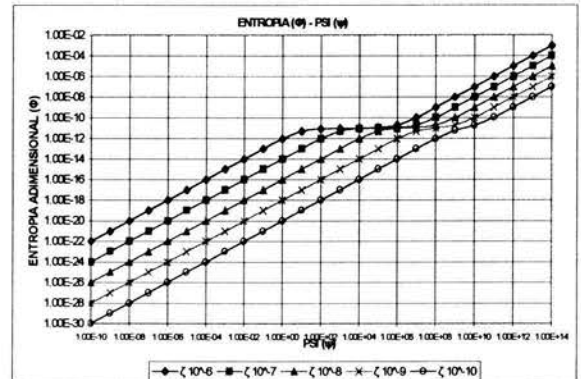
G30:  $\alpha = -1E8$



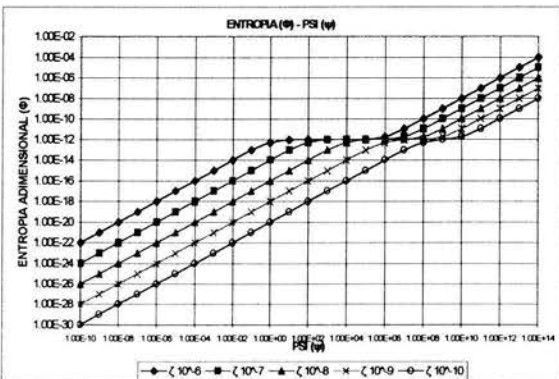
G31:  $\alpha = -1E9$



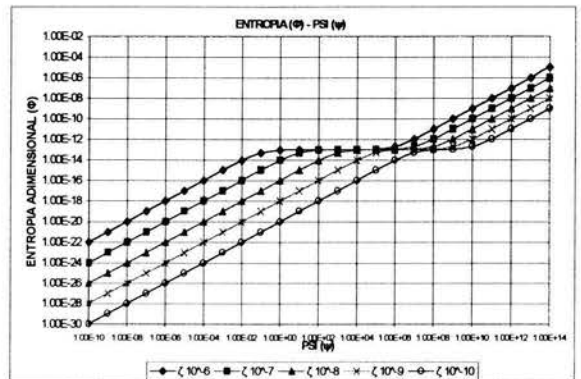
G32:  $\alpha = -1E10$



G33:  $\alpha = -1E11$



G34:  $\alpha = -1E12$



G35:  $\alpha = -1E13$

## Capítulo 4

# CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló un modelo de generación de entropía, ec. 2.36, que se caracteriza por constar de dos términos. El primer término explica la generación de entropía debida a la transferencia de calor proveniente del colector solar al sistema. Mientras que el segundo término explica la generación debida al movimiento del fluido a través de la matriz porosa. La importancia de cada uno de los términos en el comportamiento de la generación de entropía se ve influenciado por la permeabilidad adimensional  $\psi$ . Para permeabilidades menores a  $1 \times 10^{-10}$ , el término dominante es el debido a la transferencia de calor (primer término de la ec. 2.36). En el intervalo entre  $1 \times 10^{-10}$  y  $1 \times 10^{-8}$ , ambos términos son de un orden de magnitud similar, en este mismo lapso el término debido a la transferencia de calor alcanza un valor máximo que se mantiene sin un cambio significativo conforme aumenta la permeabilidad, esto se explica al calcular el límite cuando  $\psi$  tiende a infinito del primer término de la ec. 2.36 lo que da como resultado  $\frac{-1}{\alpha}$ . Esto es debido a que  $\alpha\psi\zeta^2 \gg 1$ , por lo que en el rango mencionado puede considerarse que se alcanzan las condiciones del límite, esto es:

$$\lim_{\psi \rightarrow \infty} \left( \psi\zeta^2 \left[ \frac{1}{1 - \alpha\psi\zeta^2} \right] \right) = \frac{-1}{\alpha} \quad (4.1)$$

Por otro lado, el segundo término comienza a crecer prácticamente de manera proporcional con la variable  $\psi$ . En permeabilidades mayores a  $1 \times 10^{-8}$  el término dominante es el debido al movimiento del fluido, como se mencionó, el crecimiento puede considerarse directamente proporcional a la permeabilidad.

El uso de un colector de aluminio o cobre no presenta una gran diferencia en el comportamiento de la entropía para permeabilidades donde la mayor aportación es debida a la transferencia de calor, cuando el termino debido al movimiento del fluido es el dominante (segundo termino de la ec. 2.36); se aprecia una generación de entropía ligeramente superior cuando se emplea un colector de cobre que cuando se emplea uno de aluminio.

Aunque no se reportaron gráficas para porosidades distintas del 50 %, se elaboraron cálculos para porosidades del 30 % y del 75 %, lo que permitió observar que se presenta una mayor generación de entropía en porosidades bajas (30 %) mientras que en porosidades altas (75 %) la generación disminuye.

Desde el punto de vista de los fluidos de trabajo, se aprecian las mayores diferencias, si bien la acetona y el benceno se comportan de la forma mencionada anteriormente, en el agua difiere un poco de ese comportamiento, ya que el rango de estabilización se encuentra defasado a permeabilidades adimensionales entre  $1 \times 10^{-9}$  y  $1 \times 10^{-7}$ , pero en esencia el comportamiento de la curva es igual al observado en los otros fluidos. Por debajo del rango, la principal influencia es la debida a la transferencia de calor, mientras que para valores superiores, la mayor aportación es debida al movimiento del fluido. Los efectos del colector y la porosidad utilizando agua son los mismos que los mencionados anteriormente.

### **Funciones de optimización**

La curva de optimización respecto a  $\psi$ , se comporta de manera constante entre los valores de  $1 \times 10^{-20}$  hasta  $1 \times 10^{-11}$ , fijando el valor del gradiente en 1. Para valores de  $\psi$  superiores la curva crece. Esta tendencia puede observarse en cualquiera de los fluidos, marcando como diferencia unicamente el punto en que inicia el crecimiento. Como ejemplo, el rango mencionado anteriormente fue observado en la acetona, mientras que para el agua el valor de  $\psi$  en que se dispara la curva, se encuentra en  $1 \times 10^{-9}$  y para el benceno en  $1 \times 10^{-10}$ .

Por otro lado, las curvas de optimización con respecto a  $\zeta$  muestran una serie de curvas con un comportamiento similar a una parábola, con el eje focal paralelo al eje de las  $\zeta$ 's. Se puede observar una disminución del crecimiento del gradiente de generación conforme aumenta la porosidad, siendo el fluido de trabajo de gran importancia en el comportamiento de los gradientes. En la acetona se presentan los mayores gradientes, intermedios en el benceno y los

menores en el agua. Esa tendencia se observa en cualquiera de los dos colectores empleados.

De las funciones de optimización, para cualquiera de las dos variables no se logró encontrar un punto de mínima generación de entropía, lo cual se refleja en las gráficas de los gradientes, ya que estas no cruzan por el eje de las abscisas, es decir, las primeras derivadas con respecto a  $\psi$  y  $\zeta$  de la ecuación de generación de entropía no llegan a un valor de cero, en base a las condiciones de operación que podrían esperarse en la bomba capilar planteada. Este comportamiento de las funciones de optimización nos indica que aún en la región de estabilización que se observó en las curvas de la generación de entropía (G1, G4, G7, G10, G13 y G16) el comportamiento de la entropía siempre es creciente descartando la posibilidad de un mínimo local en la región, lo cual también se observa en las curvas que detallan el comportamiento de la función. Las gráficas de las funciones de optimización muestran que el comportamiento de los gradientes siempre es positivo, creciente o en algunos casos constante.

### **Dependencia de $\alpha$ y $\beta$**

Las primeras 18 gráficas permiten identificar los efectos que produce el cambio de los materiales involucrados en el sistema. En las gráficas apartir de la G25 a la G29, se puede observar los efectos producidos por el cambio de  $\alpha$  y  $\beta$  en la función de generación de entropía ec. 2.36. Conocer de antemano los efectos producidos por estos parámetros permite definir de antemano las condiciones bajo las cuales se desea que opere el sistema.

Las primeras tres gráficas (G25-G27) presentadas en el arreglo de cinco, presentan el efecto de la variación de  $\alpha$  para un  $\beta$  dado,  $\alpha$  varía desde  $-1 \times 10^{-10}$  hasta  $-1 \times 10^{-12}$  utilizando un  $\beta$  de  $1 \times 10^8$ . Bajo estas condiciones se advierte que mientras la aportación principal sea debida a la transferencia de calor, la variación de  $\alpha$  no produce un cambio de consideración de una grafica a la otra. Sin embargo, la zona de estabilización varía dependiendo del valor de  $\alpha$ , para valores muy pequeños la zona tiende a desaparecer mientras que para valores muy altos la zona tiende a aumentar. La conclusión más importante en base al comportamiento de las gráficas es que conforme aumenta el valor de  $\alpha$  la generación de entropía disminuye, siendo la zona dominada por el termino que expresa el movimiento del fluido a través de la matriz la más sensible a este cambio.

Por otro lado, las dos últimas gráficas (G28 y G29) con ayuda de la gráfica (G27), muestran

los efectos de mantener fijo el valor de  $\alpha$  y variar el valor de  $\beta$ . El valor fijado de  $\alpha$  es  $1 \times 10^{-11}$ , mientras que  $\beta$  fluctúa entre  $1 \times 10^7$  y  $1 \times 10^9$ . En estas condiciones de operación, al igual que en la variación de  $\alpha$ , la zona donde la generación es debida principalmente a la transferencia de calor, no se aprecian cambios importantes. La zona de estabilización tiende a desaparecer al aumentar el valor de  $\beta$ . Finalmente, a diferencia de  $\alpha$ , al aumentar el valor de  $\beta$  la generación de entropía aumenta, siendo el termino debido al movimiento del fluido (segundo término de la ec. 2.36) el más sensible a este cambio.

### Parámetricas

En los resultados se muestra una transformación de la generación de entropía, ec. 2.36, con la cual la función sólo depende de  $\alpha$ , reflejándose los efectos de  $\beta$  en un cambio en los rangos de operación de  $\psi$  y  $\zeta$ . En las seis gráficas finales (G30-G35) se muestra la información generada por tal conversión. En analogía con las primeras 18 gráficas, la región dominada por el primer término de dicha ecuación se mantiene prácticamente sin cambio de una gráfica a la otra. En esta serie de gráficas parámetricas (G30-G35) se muestra el comportamiento de la zona de estabilización no sólo para el rango de valores de  $\alpha$  observado en las primeras 18, sino que además se revisó el comportamiento de la función transformada para un rango más amplio de valores que va desde  $-1 \times 10^8$  hasta  $-1 \times 10^{13}$ , con ello se puede observar de una manera más amplia el desarrollo de tal zona. Destaca en las primeras gráficas (G30-G32), utilizando la generación de entropía transformada ec. 3.8, que la curva de generación prácticamente se torna una recta e incluso cuando se utiliza un valor de  $\bar{\zeta}$  de  $1 \times 10^{-10}$  la curva cambia su inflexión; el cambio de inflexión se debido a que el segundo término de la función comienza a tener una mayor magnitud que el primer término, en una región en la que éste aún no ha alcanzado las condiciones del limite cuando  $\bar{\psi}$  tiende a infinito.

La región de estabilización que se distingue como una línea horizontal en la parte media de las gráficas (G1, G4, G7, G10, G13 y G16) que también se presenta tanto en las generadas empleado materiales, así como en las que se utilizó la función transformada; este comportamiento es debido a que el primer termino alcanzó un orden de magnitud comparable a la aportación de entropía debida al segundo término.

Cabe destacar que los cambios en el segundo término son más pronunciados debido al



logarítmico; que si bien a permeabilidades bajas ( $1 \times 10^{-10}$  hasta 1) el primer término es mucho mayor que el segundo, pasando ese rango, el primer término llega a un punto máximo y el segundo no deja de crecer, por lo que superado ese intervalo el aporte de generación de entropía debido al primer término es muy pequeño en relación al segundo.

De estas últimas gráficas (G30-G35) se concluye que conforme aumenta el valor del parámetro  $\alpha$ , la zona dominada por la generación debida a la circulación del fluido (segundo término) tiende a disminuir. También en esta región, la variación de generación para distintas  $\zeta$ 's se reduce a una diferencia de cuatro ordenes de magnitud, siendo que en la región dominada por la transferencia se tiene una variación de hasta ocho ordenes. La zona de estabilización tiende a crecer cuando se presentan valores grandes de  $\zeta$  y valores grandes de  $\alpha$ .

## Comentarios

El análisis de generación de entropía permite tener una herramienta con la que se puede determinar la cantidad de energía perdida de acuerdo a las condiciones de operación del sistema; por ello al procurar la menor generación de entropía se reduce la cantidad de energía térmica no aprovechada.

La generación de entropía deducida en base al calentador propuesto, provee criterios con los cuales se pueden discernir las mejores condiciones con las que el sistema puede operar con la mayor cantidad de energía disponible. De expresiones de generación de entropía como las mostradas en las ecs. 2.15 ó 2.16, la generación en este sistema es debida fundamentalmente a dos contribuciones, la primera es la transferencia de calor de la placa al fluido de trabajo que se distingue por expresiones como  $\Delta T$  y  $\frac{\delta \dot{Q}}{dx}$  (primer término de las ecuaciones mencionadas) y la segunda es por el movimiento del fluido a través del canal caracterizado por parámetros como  $\mu$ ,  $K$ ,  $\dot{m}$  ó  $u$  (segundo término de las ecuaciones citadas)

El análisis de generación de entropía aplicado a la bomba capilar de aplicación solar del presente estudio, permitió definir una función adimensional (ec. 2.36) que sirvió como criterio para determinar cuales son las mejores condiciones de operación con que el colector puede operar generando la menor cantidad de entropía. Dichas condiciones resultan en que se logra una menor generación de entropía cuando la permeabilidad adimensional es pequeña ( $1 \times 10^{-18}$  a  $1 \times 10^{-10}$ ) cuando el parámetro  $\alpha$  es lo más grande posible o bien el parámetro  $\beta$  se reduce.

Por último, el análisis de segunda ley elaborado en este estudio, da pie para iniciar una posterior investigación para valorar el cambio de energía disponible o exergía en el sistema (b), que en el caso de sistemas abiertos se evalúa como:

$$b = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (4.2)$$

Donde, el subíndice cero indica el estado muerto, que para este proyecto puede ser las condiciones ambientales. La función de entropía (ec. 2.36) indica el cambio de ésta propiedad en el fluido de trabajo de la entrada del calentador a la salida de éste, es decir, al tener la diferencia de dicha propiedad se puede evaluar el cambio de la exergía de un estado al otro casi de manera directa, quedando pendiente definir la temperatura del punto muerto y la diferencia de entalpía del fluido, cabe mencionar que si se definen las características del fluido a la entrada del sistema, las propiedades del estado final se pueden determinar a partir de las anteriores con el cambio de entropía y la caída de presión, con ello el cambio de energía disponible se puede evaluar como:

$$b_{x+\Delta x} - b_x = [(h_{x+\Delta x} - h_0) - T_0 (s_{x+\Delta x} - s_0)] - [(h_x - h_0) - T_0 (s_x - s_0)] \quad (4.3)$$

Simplificando:

$$\Delta b = b_{x+\Delta x} - b_x = (h_{x+\Delta x} - h_x) - T_0 (s_{x+\Delta x} - s_x) \quad (4.4)$$

Escrito de otra forma:

$$\Delta b = (h_{x+\Delta x} - h_x) - T_0 \frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{m}_x} \quad (4.5)$$

Se distingue de la expresión 4.3, que el primer término del lado derecho es la exergía a la salida del sistema y el segundo es la correspondiente a la entrada. Como se mencionó la entalpía a la salida se puede determinar apoyandose en las condiciones a la entrada y los cambios de entropía y presión.

## ANEXO.

### VOLUMEN DE CONTROL EN UN FLUJO TAPON

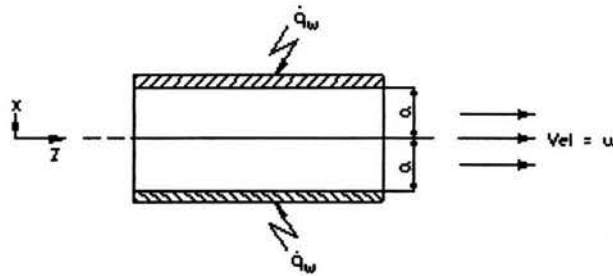


Figura 4-1: Adaptado de Burmeister, [13]

Las soluciones de flujo tapón pueden ser consultadas en distintas fuentes, una de ellas es el libro *"Convective Heat Transfer"* de Burmeister [13], para la solución de un flujo tapón entre placas paralelas el autor, plantea el siguiente volumen de control, ver figura 4-1. Donde la distribución de temperaturas para dicho sistema es:

$$\frac{T - T_o}{q_w a / k} = 16Gz^{-1} + \frac{3\acute{x}^2 - 1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(\frac{-16n^2\pi^2}{Gz}\right) \cos(n\pi\acute{x}) \quad (4.6)$$

Donde  $\acute{x}$ , es una forma adimensional de la distancia perpendicular al movimiento del flujo, definido de la siguiente forma:  $\acute{x} = \frac{x}{a}$ .  $T_o$  es la temperatura de entrada del fluido,  $k$  es la conductividad, que al ser adaptada al presente estudio, se utiliza la  $Kc$  que se define en la expresión 2.23 y  $Gz$  es el número de Graetz que se expresa como:

$$Gz = \frac{Dh}{x} \left( \frac{\rho u Dh}{\mu} \right) \left( \frac{\mu C_p}{Kc} \right) = \frac{Dh Re Pr}{x} \quad (4.7)$$

Donde, el diámetro hidráulico ( $D_h$ ) para un dúcto con una geometría como la propuesta es  $2H$ , [13]. El limite cuando  $Gz^{-1} \rightarrow \infty$  aplicado a la distribución de temperaturas, da como resultado:

$$\lim_{Gz^{-1} \rightarrow \infty} \frac{T - T_o}{q_w a / k} = 16Gz^{-1} + \frac{3\acute{x}^2 - 1}{6} \quad (4.8)$$

VOLUMEN DE CONTROL EN UN FLUJO TAPON  
AJUSTADO AL COLECTOR

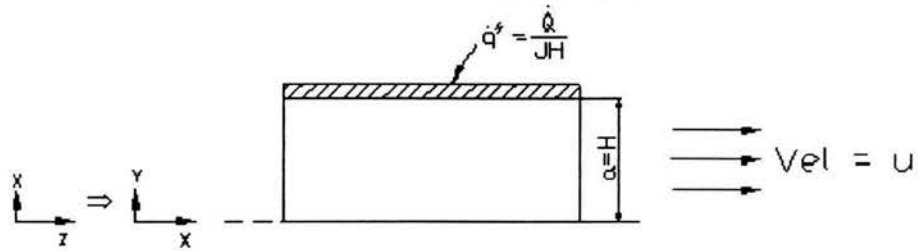


Figura 4-2:

$$\lim_{Gz^{-1} \rightarrow \infty} \frac{T_w - T_m}{q_w a / k} = \frac{1}{3} \quad (4.9)$$

Dado que existe simetría con respecto al eje Z del autor que coincide con el eje X del presente trabajo y que sobre Z no existe flujo de calor, entonces la geometría del problema se ajusta a la geometría del colector con las siguientes consideraciones, 4-2:

Reemplazando las variables empleadas por el autor por sus equivalentes en este trabajo. La variable  $\acute{x}$  se reemplaza por una equivalente en el presente trabajo definida como  $\eta = \frac{y}{H}$ ; por otro lado  $k$  que es la conductividad, al ser adaptada al presente estudio se utiliza como  $Kc$  que se define en la expresión 2.23, finalmente para conocer la distribución de temperaturas promedio en el área del canal, se tiene:

$$T_m = \frac{\int_0^v \int_0^1 \left[ T_o + \frac{\dot{Q}}{K_c J} \left[ \frac{16}{Gz} + \frac{3\eta^2 - 1}{6} \right] \right] H d\eta dz}{JH} \quad (4.10)$$

Lo que da como resultado:

$$T_m = T_o + \frac{\dot{Q}}{K_c J} \frac{16}{Gz} \quad (4.11)$$

Donde  $T_m$  es la temperatura en el canal y la temperatura en la pared es  $T_w = T_m + \Delta T$ , con ello,

$$\Delta T = \frac{1}{3} \frac{\dot{Q}}{K_c J} \quad (4.12)$$

Finalmente, multiplicando y dividiendo por  $L$  el número de  $Gz$  se tiene:

$$Gz = \frac{Dh}{x} \left( \frac{\rho u D_h}{\mu} \right) \left( \frac{\mu C_p}{K_c} \right) \left( \frac{L}{L} \right) \quad (4.13)$$

Donde se identifica la razón  $\frac{L}{x}$  que coincide con el inverso de la definición de  $\chi$  mostrada en la ec. 2.24, con ello el número de Graetz puede ser reescrito como:

$$Gz = \frac{Dh}{\chi} \left( \frac{\rho u D_h}{\mu} \right) \left( \frac{\mu C_p}{K_c} \right) \left( \frac{1}{L} \right) \quad (4.14)$$

Definiendo  $Gz^*$  de la siguiente forma:

$$Gz^* = \frac{Dh}{L} \left( \frac{\rho u D_h}{\mu} \right) \left( \frac{\mu C_p}{K_c} \right) \quad (4.15)$$

Permite que el número Graetz pueda ser sustituido por la expresión:

$$Gz = \frac{Gz^*}{\chi} \quad (4.16)$$

Donde, se tiene la ventaja de que  $Gz^*$  es independiente de  $x$ , o su forma adimensional  $\chi$ . Finalmente utilizando la ecuación anterior y expresando  $T_m$  como  $T$ , se llega a:

$$T = T_o + \frac{\dot{Q}}{K_c J} \frac{16\chi}{Gz^*} \quad ; \quad \Delta T = \frac{1}{3} \frac{\dot{Q}}{K_c J} \quad (4.17)$$

# Referencias

- [1] Bazzo, E., y Nogoøeke, M. "Capillary pumping systems for solar heating application", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 1153-1165 (2003).
- [2] Bazzo, E., y Rhiel, R.R. "Operation characteristics of a small-scale capillary pumped loop", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 687-705 (2003).
- [3] Chen, Pin-Chih y Lin, Wei-Keng "The application of capillary pumping loop for cooling of electronics components", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp. 1739-1754 (2003).
- [4] Cruz, J. M.S., Hammond, G. P. y Reis, A. J.P.S. "Thermal performance of a trapezoidal shaped solar collector/energy store", *Applied Energy*, Vol. 73, pp. 195-212 (2002).
- [5] Beckman, W. y Duffie J. "Solar engineering of thermal processes", 2nd ed. New York, Wiley 1991. Capítulo 14: Sistemas Pasivos, Capítulo 6: Colectores Solares.
- [6] Almanza, S. R. y Muñoz G. F. "Ingeniería de la energía solar", México, El Colegio Nacional 1994. Capítulo 3.
- [7] Mazria, E. "El libro de la energía solar pasiva", España, Ed. G. Gili 1978. Capítulo 3.
- [8] Zhang, N. "Innovative heat pipe systems using a new working fluid", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. Vol. 28, No. 8, pp. 1025-1033, (2001).
- [9] Bejan, A. "Entropy generation minimization", Florida, CRC Press LLC, 1996. Capítulo 2.
- [10] Bejan, A. "Convection heat transfer", New York, Wiley1982. Capítulo 12.
- [11] Bejan, A. y Nield, D.A. "Convection in porous media", US, Springer 1991. Capítulo 4.

- [12] Howell, J. R. y Buckius, R. O. "Principios de termodinámica para ingenieros", México, McGraw-Hill 1990. Capítulo 5.
- [13] Burmeister, L. C. "Convective heat transfer", 2nd. ed. New York, Wiley 1993. Capítulo 6.
- [14] Vafai, B. "Handbook of porous media", New York, Marcel Dekker 2000. Parte 3.
- [15] Kreith, F. "The CRC handbook of thermal engineering", US, CRC Press 2000.
- [16] Kaviany, M. "Principles of heat transfer in porous media", 2nd. ed. US, Springer 1991. Capítulos 1 y 2.
- [17] Cervantes de G., J. "El Caloriducto" Revista, Academia Nacional de Ingeniería. Vol. 2, No. 2. pp 117-144, (1983).