

47  
205



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

"ESTUDIO DE UN CONVERTOR SOLAR TIPO  
TERMOSIFON QUE TRABAJA CON FLUIDOS  
VISCOELASTICOS"

## T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N

ENRIQUE GUZMAN VALDES

GUSTAVO BECERRA MUÑOZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

INDICE GENERAL

pag

INTRODUCCION	1
1. CONCEPTOS GENERALES	2
2. INVESTIGACIONES ANTERIORES	12
3. DESCRIPCION DEL APARATO EXPERIMENTAL	23
4. SOLUCIONES VISCOELASTICAS	27
5. EXPERIMENTO	34
6. RESULTADOS OBTENIDOS	38
7. CONCLUSIONES	65
APENDICE	66
BIBLIOGRAFIA	74

## CONTENIDO

### 1. CONCEPTOS GENERALES

- 1.1 Concepto del material
- 1.2 Concepto de fluido
- 1.3 Viscosidad en líquidos
- 1.4 Viscosidad en gases
- 1.5 Variación de la viscosidad en los fluidos con la temperatura y la presión
- 1.6 Mecanismos de la transferencia de calor

### 2. INVESTIGACIONES ANTERIORES

- 2.1 Flujo de fluidos en secciones circulares y no circulares
- 2.2 Experimentos con flujo de calor constante
- 2.3 Experimentos con temperatura de pared constante

### 3. APARATO EXPERIMENTAL

- 3.1 Descripción del arreglo experimental
- 3.2 Dimensiones e instrumentos en el arreglo experimental

### 4. SOLUCIONES VISCOELASTICAS

- 4.1 Características especiales de la solución
- 4.2 Preparación de las soluciones viscoelásticas
- 4.3 Soluciones viscoelásticas usadas
- 4.4 Concentraciones empleadas
- 4.5 Observaciones en el manejo de las soluciones
- 4.6 Requerimientos de operación para las soluciones en el termosifón
- 4.7 Precauciones en la preparación de las soluciones

## 5. EXPERIMENTO

- 5.1 Descripción del experimento
- 5.2 Procedimiento experimental

## 6. RESULTADOS OBTENIDOS

- 6.1 Memoria de cálculo
- 6.2 Resultados experimentales
- 6.3 Análisis y comparación de resultados

## 7. CONCLUSIONES

## APENDICE

## OBJETIVOS .

1. Estudiar el comportamiento de un colector solar tipo termosifón de circuito cerrado utilizando líquidos newtonianos y soluciones viscoelásticas.
2. Cuantificar los gastos másicos , y la tasa de transferencia de calor , comparando los resultados para los fluidos utilizados .
3. Observar las variaciones de gasto másico y transferencia de calor y proponer las causas en cada caso .
4. Analizar los resultados en conjunto y obtener conclusiones para cada líquido o solución sobre sus mejoras en la operación en el colector solar.

## INTRODUCCION .

Uno de los equipos más comunes en el aprovechamiento de la energía solar es el de colectores solares tipo termosifón, en los cuales la radiación solar se convierte en calor al chocar en la superficie exterior de los tubos que componen al termosifón, y este calor es transferido a un fluido de trabajo, generalmente agua común.

El colector tipo termosifón está formado por una red de tubos inclinados, que se exponen directamente a la insolación, a través de los cuales circula fluido por convección natural. La convección se inicia debido a los gradientes de densidad que produce el calentamiento y a la inclinación de los tubos que se ha impuesto al colector.

Cuando el fluido de trabajo ha tomado energía térmica, generalmente circula hacia un depósito aislado térmicamente y se conserva ahí para darle uso cuando se requiera.

En este tipo de colectores generalmente la forma de la sección transversal de los tubos y la viscosidad del fluido son parámetros que no se toman en cuenta porque se trabaja con fluidos newtonianos y el flujo es el que predice la mecánica de fluidos clásica.

Sin embargo, si el fluido de trabajo es una solución viscoelástica, ésta tiene otras propiedades reológicas que hacen que el flujo dentro de los tubos del termosifón de sección no circular sea distinto del caso de el flujo de un líquido newtoniano.

En el presente trabajo se estudiaron y analizaron el comportamiento de algunas soluciones viscoelásticas en un sistema tipo termosifón, con ciertas simulaciones respecto al fenómeno real, que más adelante se expresarán.

# CAPITULO I

## CONCEPTOS GENERALES

## 1. CONCEPTOS GENERALES .

2

### 1.1 Concepto de Material .

Un material es un medio real , que ocupa un lugar determinado en el espacio , tiene una fase física definida que puede ser sólida o fluida y además tiene un conjunto particular de propiedades físicas y químicas que lo caracterizan .

#### 1.1.2 Material ideal .

Un material puede considerarse ideal con la finalidad de lograr establecer un modelo matemático confiable que nos represente el comportamiento de alguna de las propiedades de ese material , o bien cómo se relaciona una propiedad cuando se sujeta al material a efectos externos y relaciones .

Los materiales son reales y sus propiedades están siempre presentes, aunque para simplificar su estudio tanto experimental como analítico no se consideren todas las propiedades en conjunto para algún fenómeno o problema en particular .

Algunas simplificaciones previas que se hacen intrínsecamente al estudiar un material son las hipótesis de la mecánica del Medio Continuo, como son considerar al material continuo, homogéneo e isotrópico.

#### 1.1.3 Medio continuo .

Una de las hipótesis mas convenientes en el estudio de un material es considerarlo como un medio continuo Se entiende por esto que en todos los puntos de un sistema coordinado al cual se refiere el material corresponde un punto o partícula material; esta relación facilita el modelado matemático, ya que las funciones que se establezcan serán continuas ; es decir, válidas en todos sus puntos y la teoría matemática aplicable a este tipo de funciones será válida.

En la realidad un medio continuo no es posible , ya que todos están compuestos por pequeñas partículas que para existir individualmente deben necesariamente existir espacios vacíos .

1.2 Concepto de Fluido .

Un fluido es un material en fase líquida o gaseosa que es incapaz de conservar una forma propia por sí mismo. No tiene una estructura rígida y organizada como la de un material sólido.

En el caso de un líquido, éste adopta la forma del depósito que lo contiene . De no existir un depósito , el líquido se extiende hasta formar una delgada película cuyo espesor queda determinado únicamente por la tensión superficial . La forma de esta capa de fluido es irregular o de forma aleatoria .

El comportamiento de los gases es diferente al de los líquidos , ya que un gas además de tomar la forma del depósito que lo contiene, si el depósito es cerrado, ocupa la totalidad del volumen y si dicho depósito no existe el gas queda en libertad de difundirse en otros gases.

1.2.1 Deformación de un Fluido .

Desde el punto de vista de la mecánica, un fluido es aquel material que presenta la característica de deformarse fácilmente cuando se le aplica un esfuerzo cortante por pequeña que sea la magnitud esto no sucede si se aplican esfuerzos de compresión o normales . Un esfuerzo cortante es una fuerza de superficie , tangente al área que limita un cierto elemento de fluido .

1.2.2 Flujo de un fluido .

De manera simple se puede definir el flujo de un fluido como el transporte o movimiento que efectúa un elemento de fluido. Este movimiento puede ser ocasionado de dos maneras diferentes : de forma directa si se aplica una fuerza externa directamente al elemento de fluido que ocasione su movimiento, y de manera indirecta cuando se aplica la fuerza únicamente a una superficie o capa de fluido y las capas adyacentes a la que está en movimiento también se transportan por el efecto de transferencia de momentum que existe necesariamente en todos los fluidos porque son reales y las partículas que los componen tienen interacción .

Estas manifestaciones de movimiento indirecto son lo que da lugar a las propiedades que conocemos como viscosidad en los líquidos y a la viscosidad aparente en gases .Estas dos propiedades, como es sabido, ocasionan transferencia de momentum entre capas de fluido. Así las capas que inicialmente se encontraban en reposo entran en movimiento aunque las fuerzas no actúen directamente sobre ellas .

### 1.3 Viscosidad en los Fluidos Líquidos .

4

La viscosidad en los líquidos se debe a la interacción de las partículas o bien de las moléculas que componen al fluido. Por la cercanía de dichas partículas aparecen fuerzas de cohesión y fuerzas de adhesión , que son inversamente proporcionales a la distancia o radio medio de vibración que separa a las partículas del fluido.

Las fuerzas de cohesión en una partícula de fluido hacen que tenga la capacidad de atraer las partículas circunvecinas a ella , y éstas a su vez producen el mismo efecto sobre las demás , como tratando de mantener unido al fluido, pero el efecto total es débil en general.

Las fuerzas de adhesión en una partícula de fluido actúan atrayendo las moléculas a otros materiales en diferente fase o composición, por ejemplo las superficies sólidas . Al igual que en las fuerzas de cohesión, el efecto total puede ser débil, pero depende directamente del fluido de que se trate y las características físicas de la superficie, así como de sus condiciones, temperatura, humedad, porosidad etc.

### 1.4 Viscosidad en los Fluidos Gaseosos .

La viscosidad de un gas también tiene su origen en la interacción molecular , pero en este caso la separación de las partículas hace que las fuerzas de cohesión y adhesión tengan un efecto muy poco considerable , por lo que la naturaleza de la viscosidad es diferente al caso líquido . La interacción de partículas en un gas ocurre por transferencia de momentum , dado que en un gas existe el espacio suficiente para que las partículas tengan una trayectoria libre y mucho más grande de su tamaño . Si se establece un patrón de flujo para el gas , las partículas tienen una cantidad de movimiento que no está necesariamente en la dirección o patrón del flujo , esta energía adicional que hay que invertir es lo que da un efecto de viscosidad aparente en el gas . Aunque también en el caso de un gas la fricción del fluido con las paredes o conductos se opone al flujo , haciéndose mas evidente un efecto viscoso , pero que no es el mismo del caso de un líquido .

## 1.5 Variación de la Viscosidad en los Fluidos con la Temperatura y la presión .

5

Así como el origen de la viscosidad es diferente para los líquidos que para los gases , también las variaciones respecto a las propiedades presión y temperatura son diferentes .

### 1.5.1 Variación de la viscosidad en Líquidos con la Temperatura .

Quando cambia la temperatura en un líquido , el radio medio de vibración entre sus moléculas también cambia y su valor es proporcional a la temperatura .Por otra parte si las distancias entre las partículas del fluido se incrementan las fuerzas de cohesión y de adhesión disminuyen su valor y la viscosidad depende directamente de este tipo de fuerzas . Por lo tanto la viscosidad de un líquido varía inversamente proporcional con la temperatura . Esta relación sólo será válida mientras la temperatura no lleva a líquido a un cambio de fase , teniendo como límite inferior la solidificación y como límite superior la ebullición.

Un modelo matemático general para representar la variación de la viscosidad con la temperatura en un líquido será siempre una función decreciente, y puede decrecer de tres formas más comunes , y depende del líquido en particular que se estudie .Estas formas son :

#### A) Decrecimiento Amortiguado.

Un líquido disminuye el valor de su viscosidad con la temperatura pero los efectos no son evidentes para pequeños incrementos de la temperatura, como es el caso de algunos aceites de la industria automotriz por ejemplo .

#### B) Decrecimiento Lineal .

Un líquido puede disminuir su viscosidad con la temperatura guardando una relación aproximadamente lineal en ciertos intervalos de temperatura por ejemplo el agua .

#### C) Decrecimiento No Amortiguado .

Un líquido puede bajar rápidamente el valor de su viscosidad con pequeñas variaciones de temperatura , por ejemplo es el caso de algunos aceites ligeros .

Como ya se mencionó anteriormente, la viscosidad aparente de un gas depende de la cantidad de movimiento o bien de la transferencia de momentum entre sus partículas , y ésta es proporcional a la temperatura , por lo tanto en un gas el efecto de viscosidad aparente se incrementa proporcionalmente con la temperatura .

1.5.3 Variación de la Viscosidad en Líquidos con la Presión.

En los líquidos la viscosidad varía con la presión dependiendo del orden de magnitud con el cual cambie la presión; si los incrementos son pequeños, la viscosidad no cambia . Si se trata de presiones elevadas la viscosidad manifiesta variaciones de tipo errático .

1.5.4 Variación de la Viscosidad en los Gases con la Presión

En este punto sólo es conveniente recordar que en el caso de un gas la temperatura y la presión están relacionadas por una función llamada ecuación de estado y cualquier variación de la presión cambia casi directamente el valor de la temperatura, afectando la viscosidad aparente del gas como ya se explicó .

## 1.6 Mecanismos de Transferencia de Calor .

7

Los mecanismos de transferencia de calor son tres y son los siguientes : Conducción , Convección y Radiación . En este trabajo se presentan estos mecanismos de transferencia por lo que es necesario entender el concepto de ellos y establecer una definición de cada uno de ellos, así como las relaciones que rigen el comportamiento de cada uno de estos fenómenos .

### 1.6.1 Conducción .

La conducción es la forma de transferencia de calor en la cual el intercambio de energía ocurre de la región de mayor a la de menor temperatura por el movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones en el caso de los metales sólidos . La ley básica de la conducción de calor basada en observaciones experimentales proviene de Biot pero en general se conoce con el nombre del físico matemático francés Joseph Fourier. Esta ley establece que la tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada , es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección. Por ejemplo, para una dirección dada la ley de Fourier queda como :

$$Q_x = -k A \frac{\partial T}{\partial x}$$

Donde :

$Q_x$  = Es el flujo de calor

$A$  = Es el área normal a la dirección  $x$  .

$\frac{\partial T}{\partial x}$  = Es el gradiente de temperaturas en  $x$  .

$\partial x$ :

Cuando un fluido en movimiento pasa sobre un cuerpo sólido o fluye dentro de un canal y si las temperaturas del fluido y del sólido o del canal son diferentes, habrá transferencia de calor entre el fluido y la superficie sólida debido al movimiento relativo entre el fluido y la superficie, a este mecanismo de transferencia de calor se da el nombre de convección. Se dice que la transferencia de calor es por convección forzada si el movimiento es inducido artificialmente.

Se dice que la transferencia de calor es por convección libre (o natural), si el movimiento del fluido es ocasionado por fuerzas de empuje debidas a diferencias de densidad causadas por diferencias de temperatura en el fluido.

Como el campo de temperatura de un fluido es influenciado por el movimiento de éste, la determinación de la distribución de temperatura y de la transferencia de calor por convección es un asunto complicado en la mayoría de los casos prácticos. En aplicaciones de la ingeniería para simplificar los cálculos de transferencia de calor entre una superficie a temperatura  $T_w$  y un fluido que se desplaza sobre ella a temperatura media  $T_f$  se define el coeficiente de transferencia de calor  $h$  como:

$$q = h(T_f - T_w)$$

en donde:

$q$  = Es el flujo de calor en la pared .

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor o conductancia en convección .

Algunas veces se da a esta relación el nombre de "Ley de enfriamiento de Newton".

### 1. 6.3 Radiación .

Cuando dos cuerpos a temperaturas diferentes están separados por un vacío perfecto , no es posible la transferencia de calor entre ellos por conducción o convección ; en tal caso la transferencia de calor ocurre mediante radiación térmica . Es decir , la energía radiante emitida por un cuerpo , debida a su temperatura es transmitida en el espacio en forma de ondas electromagnéticas de acuerdo con la teoría clásica de las ondas electromagnéticas de Maxwell o en forma de fotones discretos , de acuerdo con las hipótesis de Planck .

Ambos conceptos han sido utilizados en la investigación de la transferencia de calor por radiación .

La emisión o absorción de energía radiante por un cuerpo , es un proceso global , o sea la radiación que se origina en el interior de un cuerpo se emite através de la superficie ; reciprocamente , la radiación que incide sobre la superficie de un cuerpo penetra en un medio , en donde es atenuada , Se puede decir que la radiación fue absorbida o emitida por la superficie cuando una gran proporción de la radiación incidente se atenúa en una distancia muy pequeña a partir de la superficie .

La energía radiante emitida por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta . Así que la energía radiante neta que sale del cuerpo será :

$$Q = A_{\sigma} (T_1^4 - T_2^4)$$

donde :  $Q$  = energía radiante neta que sale del cuerpo .

$A$  = Area de la superficie del cuerpo .

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann. (  $5.6697 \times 10 \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  .)

$T_1, T_2$  = Son las temperaturas de los cuerpos 1 y 2 respectivamente .

## 1.7 Coeficiente Global de Transferencia de Calor

En particular, las ecuaciones de conducción y convección sugieren un concepto importante sobre sí mismas. De hecho, existe una analogía entre la difusión de calor y la carga eléctrica. Así es como una resistencia eléctrica puede asociarse a la conducción de calor, una resistencia térmica puede asociarse con la conducción de calor. Del mismo modo puede asociarse una resistencia térmica con la transferencia de calor por convección.

De la forma de estas ecuaciones es evidente que las resistencias térmicas para conducción y convección son, respectivamente:

$$R_{\text{cond}} = \frac{(T_1 - T_2)}{q_x} = \frac{L}{kA}$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{(T_1 - T_\infty)}{q} = \frac{1}{hA}$$

Similarmente para la conducción eléctrica, la ley de Ohm es la que provee la resistencia eléctrica dada por la forma:

$$R_e = \frac{(T_1 - T_2)}{I} = \frac{L}{\sigma A}$$

De forma tal que con la representación de circuitos eléctricos podremos conceptualizar y cuantificar problemas de transferencia de calor. Así, por ejemplo, el circuito equivalente térmico para una pared con condiciones de convección en la superficie, podremos expresar el flujo de calor como:

$$q_x = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{(1/h_1 A)} = \frac{T_1 - T_2}{(L/kA)} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{(1/h_2 A)}$$

En términos de la diferencia de temperatura  $T_{\infty 1} - T_{\infty 2}$  "global" y la resistencia total de transferencia de calor, nos queda:

$$q_x = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_g}$$

donde  $R_g$  es la resistencia total, y se obtiene por la suma de resistencias de convección y conducción. Esto es,

$$R_g = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}$$

donde  $h_1$  y  $h_2$  son los coeficientes de transferencia de calor por convección en la región interior y exterior de una pared sólida, respectivamente

$k$  es la conductividad térmica del material

$A$  es el área por la que atraviesa el flujo de calor

$L$  es el espesor de la pared sólida

## CAPITULO II

### INVESTIGACIONES ANTERIORES

## 2. INVESTIGACIONES ANTERIORES

### 2.1 Flujo de Fluidos en Secciones Circulares y No Circulares.

Se sabe bien que existen dos tipos básicos de flujo, cada uno con características fundamentales diferentes. El primero de estos flujos se llama flujo laminar, en el cual el fluido fluye en capas lisas o láminas; es decir, una partícula del fluido que se halla en determinada capa permanece en ella a lo largo de su trayecto. El esfuerzo cortante en el flujo laminar es producido por el deslizamiento de una capa de fluido sobre otra. El otro tipo de flujo es el conocido como turbulento. Este flujo se caracteriza por el movimiento irregular y errático de las partículas de fluido con respecto al tiempo y al espacio. Las fluctuaciones de la velocidad son pequeñas en comparación con la media. Esto es, mientras la velocidad media no varía con el tiempo, podemos todavía considerar el flujo turbulento como permanente. No obstante, aunque las fluctuaciones de velocidad sean pequeñas, tienen un gran efecto sobre las características del flujo. Así, las partículas que se mueven en dirección normal a la del flujo actúan como una tensión cortante; esta tensión cortante turbulenta puede ser cientos de veces mayor que la tensión cortante laminar debida al deslizamiento de una capa sobre otra. Más aún, al presentarse en un flujo turbulento un gran número de fluctuaciones erráticas de las partículas, hay tendencia del flujo a mezclarse y a producirse un perfil de velocidad más uniforme. El intercambio en la cantidad de movimiento entre partículas lentas y rápidas tiende a "suavizar" el perfil de la velocidad.

Es así como, para flujo turbulento dentro de una tubería de sección circular, la distribución de velocidades en función del radio puede aparecer como en la figura 2.1(a), mientras que para el flujo laminar es parabólico (figura 2.1(b)).



(a) Flujo Turbulento



(b) Flujo Laminar

Figura 2.1 Distribución de velocidad en una tubería de sección circular para fluidos newtonianos.

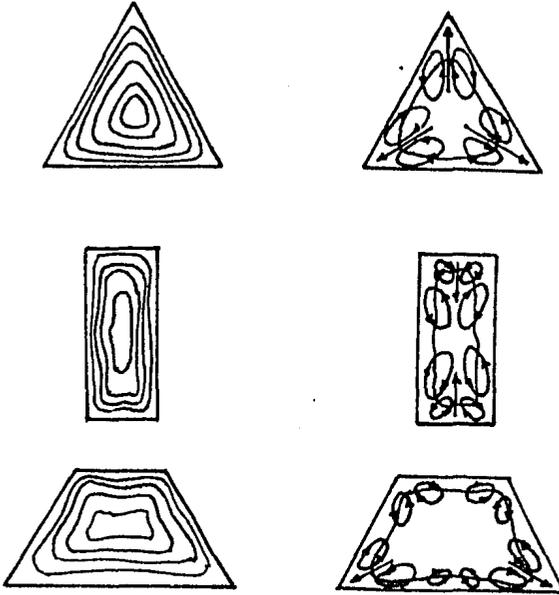
El flujo de fluidos en tuberías de sección circular está completamente estudiado para fluidos newtonianos. En el caso de flujo laminar existe una amplia y desarrollada teoría al respecto. Y para el caso de flujo turbulento, se cuenta con los elementos suficientes para el análisis del flujo. Esto es, se han obtenido soluciones aproximadas para algunos casos y relaciones empíricas en aquéllos donde no es posible obtener soluciones exactas.

En cuanto al flujo en tuberías de sección no circular, en el caso de fluidos newtonianos, se han obtenido algunas soluciones exactas cuando la geometría no complica tanto el desarrollo matemático. Sin embargo, se cuenta con conceptos que facilitan el análisis, como son por ejemplo, el radio hidráulico y el diámetro efectivo.

En el caso de flujo laminar de fluidos newtonianos en tuberías de sección no circular la fricción varía mucho, siendo máxima cerca de los puntos medios de los lados y cero en los rincones. En cambio, en flujo turbulento el esfuerzo es prácticamente constante a lo largo de las paredes y cae bruscamente a cero en las esquinas. Esto es debido al fenómeno turbulento de flujo secundario. La figura 2.2 presenta algunas configuraciones de estos flujos secundarios.

El flujo laminar de fluidos newtonianos en una tubería de sección poligonal NO PRESENTA flujo secundario.

En cuanto al flujo de fluidos no newtonianos, se ha estudiado para diferentes fluidos y diversas configuraciones. Abordaremos aquí el caso de flujo laminar, el cual es de gran interés para el mejor entendimiento del presente trabajo.



a) Líneas de velocidad promedio      b) Movimiento celular del flujo secundario

Figura 2.2 Para diferentes configuraciones se muestra el flujo secundario.

A diferencia del flujo de fluidos newtonianos en ductos de sección no circular, los fluidos no newtonianos, en particular los viscoelásticos, presentan diferencias, ya que aparecen flujos secundarios en éstos. Estos flujos secundarios tienen efectos bien marcados sobre las características del flujo.

Se han hecho pocas investigaciones sobre el flujo de fluidos viscoelásticos en tuberías de sección no circular. Un trabajo experimental al respecto es el realizado por B. Mena, G. Best, P. Bautista y T. Sánchez, en el cual se compara el coeficiente de transferencia de calor para diferentes geometrías de sección transversal cuadrada, rectangular, triangular y circular. Este trabajo se presentará con más detalle en la siguiente sección.

## 2.2 Experimentos con Flujo de Calor Constante.

Debido a la importancia que pueda tener la aparición de los flujos secundarios en tuberías, es de gran interés determinar los efectos que pudiera tener sobre el coeficiente de transferencia de calor. La forma más indicada de hacerlo es mediante la experimentación, ya que el análisis teórico se complica en gran medida.

La manera más conveniente de resolver nuestro problema es mediante dos tipos de experimentos básicamente: uno a flujo de calor constante, y el otro a temperatura de pared constante. El primero será discutido en esta sección y el segundo en la siguiente.

La figura 2.3 representa una descripción esquemática de un termosifón de circuito cerrado, con flujo de calor constante.

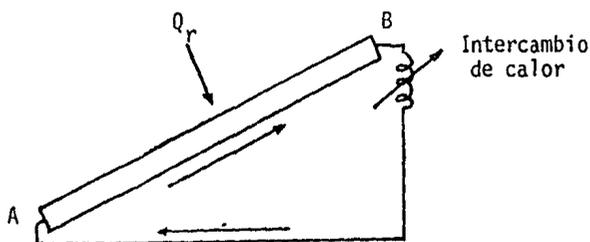


Figura 2.3 Circuito cerrado de termosifón.

Para este experimento se probaron dos soluciones no newtonianas y una newtoniana. Estas soluciones fueron:

- Para las no newtonianas; separán AP-30 al .05 % y separán AP-30 al .25 % , ambas en agua destilada.
- Para la newtoniana; agua destilada.

El experimento consistió en lo siguiente:

Usando un líquido como elemento conductor de calor en un sistema de circuito cerrado del tipo termosifón, se tiene un arreglo como el de la figura 2.3 , el cual consta principalmente de dos secciones: una sección calefactora, en que se mantiene un flujo de calor constante, utilizando para ello un elemento eléctrico que rodea a una sección de la tubería del circuito cerrado. Y la otra sección es de intercambio de calor hacia el exterior.

Los parámetros por medir son: el flujo de calor ( $Q_r$ ), la temperatura entre los puntos A y B ( $T_a$ ) y ( $T_b$ ) respectivamente, la caída de presión entre A y B ( $p_a - p_b$ ), el gasto másico ( $\dot{m}$ ), la densidad ( $\rho_a$ ) y ( $\rho_b$ ) y la viscosidad ( $\mu_a$ ) y ( $\mu_b$ ).

Se compararon los resultados que se obtuvieron de las soluciones no newtonianas y newtonianas. Para ello se establece una eficiencia global para el sistema del termosifón, como:

$$\eta = \frac{Q_a}{Q_r}$$

donde  $Q_r$  es el flujo de calor aplicado al sistema  
 $Q_a$  es el calor adquirido por la sustancia de trabajo, y está dado por:

$$Q_a = \dot{m} C_p \Delta T$$

donde  $\dot{m}$  es el flujo másico

$C_p$  es la capacidad térmica del fluido

$\Delta T$  la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de la sección de prueba

Los resultados a que se llegaron se encuentran resumidos en la tabla 2.1, para dos diferentes valores del flujo de calor.

FLUIDOS	FLUJO DE CALOR DE 9.7 W EFICIENCIA (%)	FLUJO DE CALOR DE 535 W EFICIENCIA (%)
Agua des-tilada	55	55
Separán AP-30 .05	65	68
Separán AP-30 .25	76	87

Tabla 2.1 Experimentos a flujo de calor constante. Comparación de la eficiencia de varias sustancias de trabajo, y para diferentes flujos.

Como puede observarse la eficiencia permanece constante cuando se utiliza agua destilada como sustancia de trabajo, aún cuando exista un incremento en el flujo de calor. Esto es, el coeficiente de transferencia de calor no se ve alterado de ninguna forma.

En cambio, cuando se usa un fluido viscoelástico como sustancia de trabajo, aumenta en forma sustancial la eficiencia del sistema, de la misma forma que el aumento de concentración produce un incremento en la eficiencia, esto incluso cuando se aumenta el flujo de calor. Esto quiere decir que existe un aumento en el coeficiente de transferencia de calor.

Dicho aumento del coeficiente de transferencia de calor se puede deber a:

- 1) La existencia de flujos secundarios en las soluciones no newtonianas,
- 2) El aumento de la concentración del polímero aumenta sus propiedades viscoelásticas,
- 3) La disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura, lo cual se produce cuando se incrementa el flujo de calor.

### 2.3 Experimentos con Temperatura de Pared Constante.

En cuanto a este tipo de experimento se plantea en forma similar al de flujo de calor constante. Pero no abordaremos aquí la descripción de dicho experimento, ya que esta tesis se basa en el trabajo experimental citado, razón por la cual el resto del trabajo se dedica a dicho problema.

De hecho, los únicos experimentos realizados al respecto son los que se mencionaron en la sección 2.1 y que ahora describimos.

En la figura 2.4 , se describe esquemáticamente el arreglo experimental utilizado para dicho fin. Este consta de un arreglo de tuberías en paralelo de varias geometrías en la sección transversal. Esto es, circular, cuadrada, rectangular y triangular, todas ellas con área de sección transversal igual a  $1 \text{ cm}^2$ .

Las tuberías están rodeadas por una camisa externa, a través de la cual circula un fluido desde un depósito calefactor (R) a temperatura constante. Una bomba peristáltica (P) provee el flujo laminar de la(s) solución(es) viscoelástica(s) a través de las tuberías. La distribución de temperatura a lo largo de cada tubería es monitoreada por 28 termopares conectados a un lector múltiple (M). El gradiente de presiones a lo largo de la tubería es medida por un transductor de presión (T) y la tasa de flujo es obtenida por procedimientos usuales. Las tuberías y camisa están hechas de aluminio.

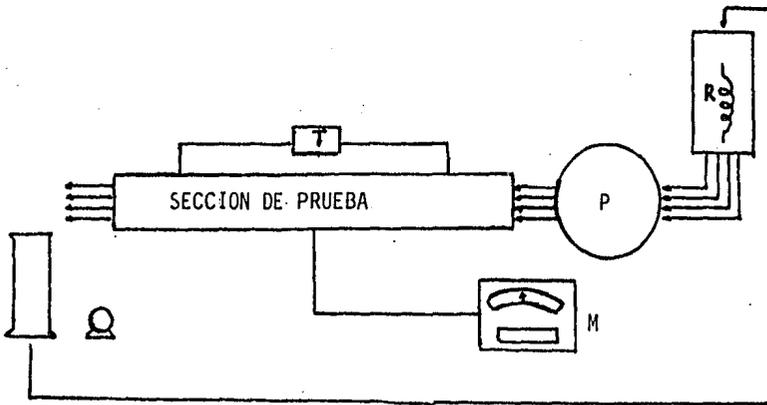


Figura 2.4 Arreglo experimental.

Los fluidos newtonianos utilizados fueron agua , glicerina y soluciones agua-glicerina de diversas viscosidades.

En este estudio preliminar se probaron dos soluciones no newtonianas. Una solución acuosa de poliacrilamida-separán AP-30 al 0.6 % en peso y separán AP-30 al 1.0 % , en una mezcla agua-glicerina en proporción de 50%-50%. Ambas soluciones se han estudiado en otras situaciones de flujo, por lo cual ya se conocen sus propiedades viscoelásticas.

Entre los resultados obtenidos en los experimentos se cuentan las mediciones de gasto a temperatura constante y el coeficiente de transferencia de calor.

En el primer caso, se sabe que la resistencia al flujo de las soluciones newtonianas en tuberías depende en parte de la geometría de la sección transversal. Y además se dispone de análisis teóricos para geometrías circular, cuadrada y rectangular. Con base en esto, es posible comparar el decremento de la tasa de flujo (D) para las diversas geometrías, tomando como referencia la circular. Dicho decremento puede ser expresado por:

$$D = \frac{Q_c - Q_{nc}}{Q_c}$$

donde  $Q_c$  y  $Q_{nc}$  son respectivamente, la tasa de flujo en la sección circular y en la no circular

La figura 2.5 muestra los resultados de D vs Re (número de Reynolds) para soluciones newtonianas. Las líneas continuas representan las predicciones teóricas para las tuberías de sección transversal cuadrada y rectangular.

Para fluidos no newtonianos la resistencia al flujo en tuberías dependerá no sólo de la geometría de la sección transversal, sino también de la presencia de flujos secundarios. No obstante, los efectos que producen estos flujos secundarios sobre la tasa de flujo son pequeños.

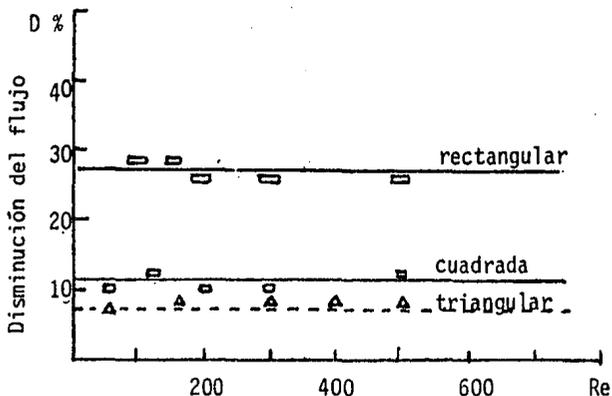


Figura 2.5 Decremento del flujo contra el número de Reynolds.

Puesto que los flujos secundarios no parecen tener influencia fuerte en la tasa del flujo, podemos suponer 'a priori' que el cambio en el coeficiente de transferencia de calor para tuberías de sección circular, cuando las comparamos con las tuberías de sección no circular, se debe a estos flujos secundarios y no al cambio en la tasa del flujo.

El incremento en el coeficiente de transferencia de calor (I) entre las tuberías de sección circular y no circular puede cuantificarse como:

$$I = \frac{h_{nc} - h_c}{h_{nc}}$$

donde  $h_{nc}$  y  $h_c$  son respectivamente, el coeficiente de transferencia de calor en una sección no circular y circular.

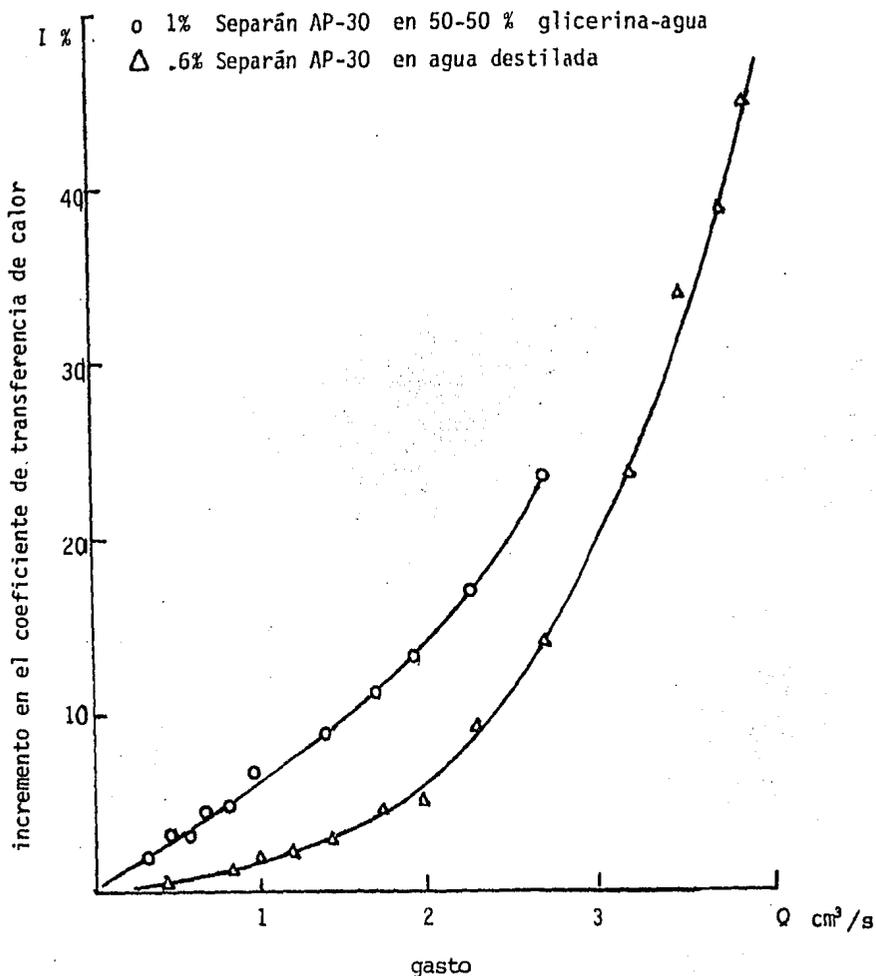


Figura 2.6 Incremento sobre el coeficiente de transferencia de calor (I) (para tuberías de sección transversal rectangular cuando se compara con una tubería de sección circular) vs gasto (Q) .

## CAPITULO III

### DESCRIPCION DEL APARATO EXPERIMENTAL

### 3. DESCRIPCION DEL APARATO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Descripción del Arreglo Experimental.

El arreglo experimental está descrito esquemáticamente en la figura 3.1 . Dicho esquema muestra un termosifón de circuito cerrado, el cual consta de una sección calefactora en la que circula agua caliente por una camisa aislada térmicamente al exterior. La camisa rodea a una tubería se sección transversal cuadrada, a través de la cual circula el fluido de trabajo. El agua caliente proviene de un baño en el que es posible aumentar la temperatura. Más aún, es posible mantenerla constante en un valor determinado. Además, el baño cuenta con una bomba que se encarga de recircular el agua caliente en todo el sistema de calefacción.

La otra parte del circuito cerrado que forma el termosifón, tiene una camisa aislada en la que circula agua fría. De igual manera, esta misma camisa rodea la tubería por la cual circula el fluido de trabajo.

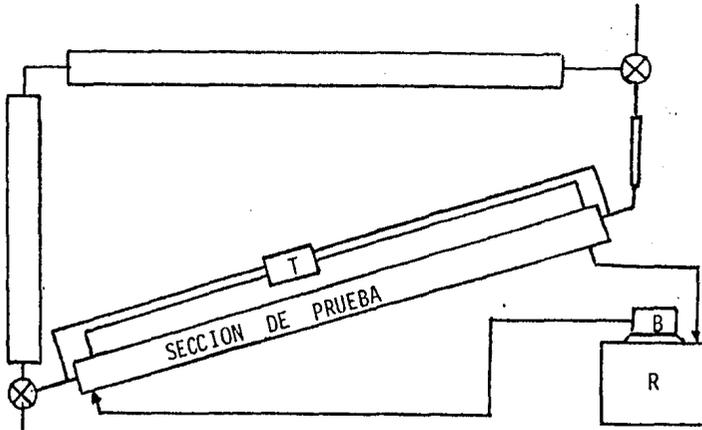


Figura 3.1 Arreglo experimental del termosifón.

El circuito cerrado que forma el termosifón tiene una sección cuadrada.

Una parte importante del circuito cerrado es la sección en donde se mide la velocidad del fluido de trabajo. Esta se encuentra al final de la sección calefactora y consiste de un tubo de vidrio de sección circular, éste se acopla a la tubería de sección cuadrada por medio de mangueras flexibles. La velocidad se mide por observación directa de tinta, la cual se inyecta al inicio de la tubería de sección transversal circular.

La tinta utilizada se prepara con la misma sustancia de trabajo que se esté probando en esos momentos. Se le agrega una pequeña porción de anilina a dicha sustancia para darle un color distintivo. Una vez que está preparada se deposita en una jeringa hipodérmica, de forma tal que pueda inyectarse tinta en cualquier momento que se desee.

### 3.2 Dimensiones e Instrumentos en el Arreglo Experimental.

Las dimensiones en nuestro aparato experimental son:

La longitud de la sección calefactora es de 1.95 m y la sección total de inclinación es de 2.2 m . La dimensión total de la sección de enfriamiento es de 3.5 m . El diámetro de la camisa de todas las secciones es de 5 cm .

El material del cual está construido todo el arreglo (tuberías y camisas) es aluminio. Por otro lado, el aislante térmico en la sección calefactora consta de una capa de asbesto de 3 cm de espesor. La tubería que forma el circuito cerrado

del termosifón tiene una sección transversal cuadrada de  $1 \text{ cm}^2$ .

La longitud de la tubería de sección transversal circular y transparente, donde se mide la velocidad, es de  $30 \text{ cm}$ , y su diámetro es  $1.35 \text{ cm}$ .

Este arreglo tiene además dos válvulas, una que se utiliza para el paso de la sustancia de trabajo al circuito cerrado, y la otra para el escape de aire que pudiera quedar atrapado en el circuito.

La longitud total que forma la tubería de circuito cerrado es de aproximadamente  $7 \text{ m}$ .

Los instrumentos de medición y control instalados en el termosifón son los siguientes:

a) Para el registro de temperatura se tienen cuatro termopares. Dos de ellos registran la temperatura del flujo del baño de agua caliente, tanto en la entrada como en la salida de la camisa calefactora. Y los otros dos indican la temperatura del fluido de trabajo (dentro del circuito) a la entrada y a la salida de la sección calefactora.

Los termopares son del tipo T cobre-constantán calibre 20. Estos fueron conectados a un multicanal, el cual tiene capacidad hasta 10 entradas. De ahí la señal se manda a un compensador de punto frío. Finalmente se tiene una conexión del compensador a un multímetro digital, en donde se registra el voltaje que se genera en cada uno de los termopares.

Al final del presente trabajo presentamos un apéndice en

que incluimos tablas de conversión voltaje temperatura del aparato que utilizamos, incluyendo además las razones por las que se usaron este tipo de termopares, así como los fenómenos eléctricos que se presentan cuando se trabaja con termopares y el objeto del compensador.

b) El baño que proveía el agua caliente en el termisifón tiene instalado un termostato, el cual nos ayuda a controlar la temperatura y mantenerla constante en el valor que deseáramos. Dado que sólo necesitamos incrementos de temperatura en el baño, se instaló un termómetro con la finalidad de fijar los valores de temperatura para un determinado incremento. Hay que hacer notar que esta temperatura no se involucra en el cálculo, por lo que dicha temperatura sólo nos indica los incrementos de temperatura que empleábamos. Así, las únicas temperaturas que intervienen en los cálculos son aquellas que se miden con ayuda de los termopares.

c) Para la medición de velocidad del fluido de trabajo tan sólo utilizamos una regla graduada y un cronómetro, ya que ésta se determinó por simple observación de el paso de tinta en una distancia determinada, por el tiempo correspondiente que tardó en hacer el recorrido.

Como ya se ha mencionado, la sección de la longitud de la tubería en donde se hizo la medición de velocidad es de cristal y de sección transversal circular, por lo que es posible visualizar el perfil de velocidad completamente desarrollado y medir la velocidad media, ya que se trata de un flujo laminar.

## CAPITULO IV

### SOLUCIONES VISCOELASTICAS

#### 4. SOLUCIONES VISCOELASTICAS .

27

##### 4.1 Características Especiales .

Los líquidos usados para las pruebas en el termosifón pueden clasificarse como fluidos no newtonianos , es decir presentan un comportamiento de flujo no lineal con la deformación, o bien con la rapidez de deformación, lo que implica que la viscosidad no sea un va - lor constante .

Sin embargo en las soluciones aquí empleadas, debido a la baja concentración del soluto , mantienen un valor constante para la viscosidad , pero además exhiben grandes propiedades elásticas .

La elasticidad de un fluido es una caracterfstica similar a la de los materiales sólidos , cuando se aplica un esfuerzo tal que su efecto sea una deformación del material , si el esfuerzo no alcanza un valor crítico , la deformación es puramente elástica , y si el esfuerzo se retira , la deformación del material no se mantiene regresando de la configuración final deformada a la configuración inicial no deformada .

En el caso de un material sólido el esfuerzo que provoca la deformación puede ser de tipo cortante o normal , mientras que en el caso de un fluido ocurre sólo por efecto de esfuerzos cortantes .

A la elasticidad de un fluido suele llamarse la memoria del líquido ya que en un sentido figurado recuerda la configuración anterior del material en cuanto a posiciones y esfuerzos , respecto a una configuración actual deformada .

Una clasificación simple en cuanto al efecto de memoria en los líquidos es la siguiente :

- a) Fluidos de Memoria Devanente .
- b) Líquidos de primer orden .
- c) Líquidos de segundo orden .

Los líquidos viscoelásticos al fluir a diferencia de los líquidos newtonianos , presentan la aparición de esfuerzos normales al sentido o dirección principal del flujo y actúan sobre las paredes de los conductos y pueden suceder los siguientes dos casos :

1 er Caso .

Si la geometría del ducto es de sección circular los esfuerzos normales son iguales hacia todas las direcciones y no hay diferencias en la periferia o perímetro de la sección circular de esfuerzos normales y no sucede nada con el flujo .

2° Caso .

Si la geometría del ducto no es circular , por ejemplo una sección poligonal , los esfuerzos normales no son iguales en todas las direcciones , y aparecen diferencias de esfuerzos normales en las paredes lo que ocasiona un gradiente de presión en las paredes , que se manifiesta con la aparición de flujos secundarios al flujo principal, provocando una disminución en el gasto y en la presión dinámica . Cabe aclarar en este punto que los flujos secundarios que aparecen en este caso son distintos de los flujos de esquina que ocurren aún en el caso de líquidos newtonianos , y que además son de un orden de magnitud comparativamente mayor .

Otra característica de las soluciones aquí usadas es que aún cuando la viscosidad a la temperatura ambiente es 4 o 5 veces mayor a la del agua , cuando se incrementa la temperatura la viscosidad de la solución disminuye rápidamente y puede llegar a igualar el valor de la viscosidad del agua en una temperatura cercana a los 70°C. Además los efectos de elasticidad se mantienen, lo cual es favorable a los flujos secundarios .

Por tratarse de soluciones diluidas y acuosas , la viscosidad de las soluciones aquí empleadas no depende en general de la rapidez de deformación, lo cual facilita el cálculo del gasto así como del coeficiente de transferencia de calor global, ya que es un valor constante .

Secuencia :

- 1) Se elige una concentración del soluto, de acuerdo con el valor de la viscosidad que se requiere para las pruebas en el termosifón al iniciar la operación del sistema. Existen tablas de concentración y la viscosidad que resulta después de elaborada la solución y pueden servir para comprobar .
- 2) Se dosifica el soluto utilizando una báscula en que se mide el peso necesario para obtener la cantidad de solución requerida.
- 3) La cantidad de solvente (agua destilada) se mide con un juego de probetas graduadas en mililitros en los siguientes rangos: 0 - 200 ml. , 0 - 250 ml. , 0 - 500 ml. , 0 - 1 l. y 0 - 2 l.
- 4) Se mezclan el soluto y el solvente en un vaso de precipitado de tamaño adecuado, evitando pérdidas del soluto pulverizado.
- 5) Por medio del agitador magnético se mezcla la solución haciendo girar hasta lograr una perfecta disolución del polvo en el líquido, evitando la formación de grumos o de burbujas por lo cual es necesario controlar la velocidad del agitador . Un ligero calentamiento de la solución ayuda a eliminar las burbujas que aparecen, combinado con la agitación . La solución está lista cuando es completamente transparente.
- 6) Medir las propiedades viscométricas con un tipo de viscosímetro capilar, manteniendo la temperatura constante .
- 7) Se elabora una curva de variación de la viscosidad con la temperatura para cada solución , lo que se logra cambiando la temperatura con un baño de agua caliente en el cual se sumerge el viscosímetro capilar .

- 8) Si los valores de viscosidad son adecuados en todo el rango de temperaturas, la solución puede ser corrida en el termosifón y efectuar las pruebas.

#### 4.3 Soluciones viscoelásticas Usadas .

Las soluciones viscoelásticas usadas en el termosifón están compuestas por un soluto y un solvente que pueden ser combinaciones de los siguientes:

SOLUCION	{	SOLVENTE	{	1) Agua destilada por evaporación.
	{	SOLUTOS	{	1) Poliacrilamida Separán Ap-30 2) Bromuro de Cetil-trimetil amonio + ácido para-toluensulfónico.

#### 4.4 Lista de concentraciones empleadas.

La concentración se mide en partes por millón (p.p.m.).

- 1) Poliacrilamida Separán Ap-30 a 200 p.p.m. en Agua destilada.
- 2) Poliacrilamida Separán Ap-30 a 100 p.p.m. en Agua destilada.
- 3) Bromuro de cetil-trimetil amonio + ácido para-toluensulfónico a 500 p.p.m. en Agua destilada.
- 4) Bromuro de cetil-trimetil amonio + ácido para-toluensulfónico a 750 p.p.m. en Agua destilada.
- 5) Bromuro de cetil-trimetil amonio + ácido para-toluensulfónico a 1000 p.p.m. en Agua destilada.

- 4.5.1 Cuando se prepara una solución viscoelástica con agua de la toma ésta tiene un alto contenido de sales minerales , respecto a la concentración del soluto empleado y esto ocasiona que no se obtenga un valor de viscosidad correcto en la solución así preparada . Como la concentración de sales minerales en el agua depende de cada lugar en particular , no sería posible el control el la preparación de las Soluciones Viscoelásticas aquí usadas que nos diga la viscosidad resultante de la solución , ya que no se conoce la concentración de dichas sales en el agua de elaboración .
- 4.5.2 Las Soluciones viscoelásticas de bajas concentraciones o diluídas deberán ser elaboradas de preferencia con agua destilada con alto control de calidad , es decir un proceso que reduzca al mínimo la existencia de sales minerales ,(doble evaporación por ejemplo.) .
- 4.5.3 No es absolutamente necesario experimentar con soluciones de agua destilada. Si se desea un valor de viscosidad y no se dispone de agua destilada , la concentración puede variarse empíricamente hasta lograr el valor de viscosidad requerido. Pero para establecer conclusiones de cómo varía el comportamiento de la solución viscosidad-concentración no sería posible .
- 4.5.4.Las sales minerales con el tiempo de fluir se precipitan ensuciando las paredes de los tubos del termosifón , variando con esto la conductividad térmica de la pared y afectando el coeficiente global de transferencia de calor que nos interesa estudiar
- 4.5.5.Si las soluciones viscoelásticas se exponen por un gran período de tiempo a la luz solar , las soluciones reaccionan perdiendo algunas de sus propiedades reológicas , viscosidad ,elasticidad etc.

- 4.5.6 La completa disolución del polímero pulverizado en agua se puede lograr agitando lentamente con el agitador magnético del laboratorio ,o bien la difusión se logra totalmente pero es un proceso muy lento y no se logra homogéneamente en todas las soluciones , ya que depende de la concentración que se tenga y del punto de saturación .
- 4.5.7 Un aspecto incierto es la deterioración de las soluciones viscoelásticas , ya que las propiedades pueden cambiar por envejecimiento de la solución o bien por fatiga térmica o mecánica pero estos aspectos todavía no están bien estudiados y dependen de factores como el lugar de almacenamiento de la solución así como de las condiciones de trabajo de la solución.
- 4.5.8 Sólo se ha comprobado que las soluciones después de operar en el termosifón por un tiempo breve y todo el rango de temperaturas no cambian sus propiedades , pero no se puede predecir el tiempo que se mantendrán .

#### 4.6 Requerimientos de operación de Soluciones Viscoelásticas en el Termosifón .

- 4.6.1 Para que las soluciones puedan fluir fácilmente el valor  $\mu$  a temperatura ambiente deberá estar en un intervalo de 1 a 5 centipoises.
- 4.6.2 La viscosidad de las soluciones no dependerá en ningún caso de la rapidez de deformación .
- 4.6.3 La pendiente de la curva viscosidad-temperatura de la solución será mayor , esto quiere decir que la viscosidad de las soluciones decrece grandemente con la temperatura hasta alcanzar el valor de la viscosidad del agua como límite inferior.
- 4.6.4 Los efectos de elasticidad de las soluciones se mantendrán aún cuando la temperatura aumente .

#### 4.7 Precauciones de Preparación .

- 4.7.1 Usar agua destilada de alto control de calidad .
- 4.7.2 Al agregar el soluto evitar pérdidas de polímero;
- 4.7.3 Evitar la introducción de polvo del ambiente en la solución .
- 4.7.4 Evacuar las burbujas existentes en la solución .
- 4.7.5 Evitar la exposición de las soluciones a la luz solar .
- 4.7.6 Al vaciar la solución evitar la formación de burbujas.  
Y hay que emplear vasos limpios .
- 4.7.7 Etiquetar las soluciones preparadas para evitar confusión.

## CAPITULO V

### EXPERIMENTO

## 5. EXPERIMENTO

### 5.1 Descripción de Experimento.

Se llevó a cabo sólo un tipo de experimento. Esto es a temperatura de pared constante. Para simular este efecto, seleccionamos una sección de prueba en el circuito cerrado. A ésta le hemos llamado sección calefactora, ya que en ella se ha colocado una camisa, que rodea a la tubería de sección transversal cuadrada, por la cual circula agua caliente. La recirculación de esta agua permite mantener un flujo a una temperatura de 'equilibrio' cualquiera (ver figura 5.1)

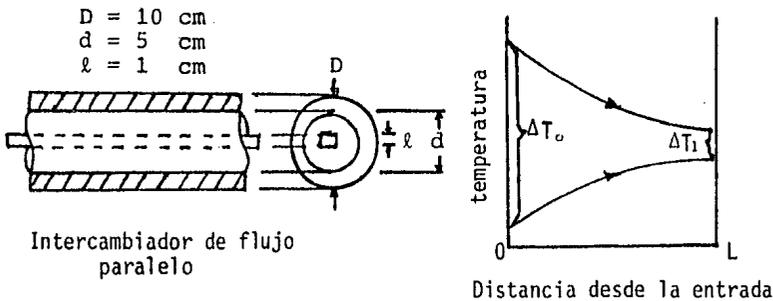


Figura 5.1 Detalle de la sección calefactora en el arreglo experimental.

Dado que el flujo del fluido de trabajo deberá producirse por convección natural, el sistema experimental cuenta con una sección de enfriamiento. De tal forma que entre ambas secciones (calearfactora y de enfriamiento) se produce una diferencia de temperatura en el fluido de trabajo. Esto provoca una diferencia de densidades, estableciéndose una convección natural. De forma tal que el fluido de trabajo empieza a circular por el circuito cerrado, tal como se muestra en la figura 5.2 .

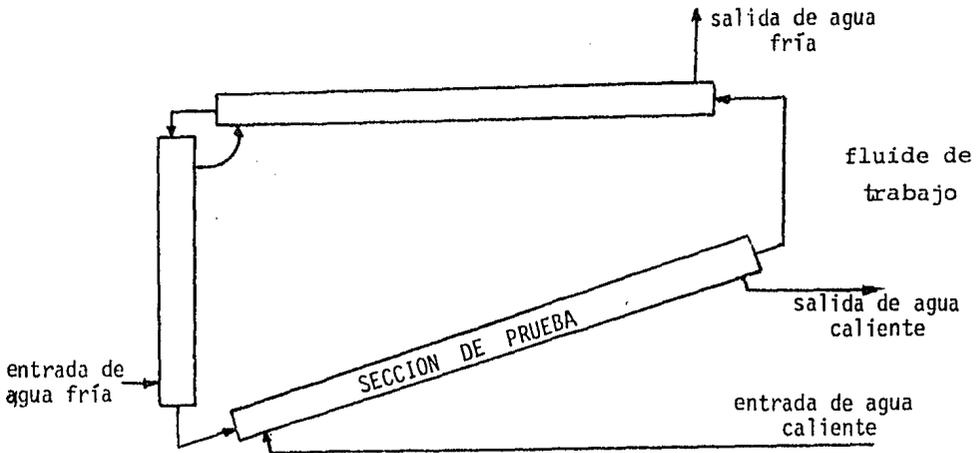


Figura 5.2 Arreglo experimental con el sentido de los flujos de fluidos.

Al establecerse este flujo del fluido de trabajo, no se alcanzan velocidades altas. De hecho se tiene un flujo laminar, el cual es fácilmente visible en la sección de tubería de cristal, ya que al inyectar tinta se forma un perfil 'parabólico', y además el cálculo del número de Reynolds ( $Re$ ) para las condiciones de un estado determinado cualquiera de trabajo, se verifica esta aseveración.

Como ya hemos mencionado con anterioridad, en flujo laminar con fluidos viscoelásticos y en secciones no circulares, deben aparecer flujos secundarios, debido a la presencia de esfuerzos normales. Los resultados obtenidos nos dirán si en realidad aparecieron estos flujos. El análisis de estos resultados se basa en el coeficiente de transferencia de calor y en la tasa de flujo (gasto volumétrico). Teniendo en cuenta como parámetro de comparación el fluido newtoniano, el cual NO presenta el fenómeno de flujos secundarios bajo estas condiciones. Dicho análisis se presenta en el siguiente capítulo.

En lo que respecta al fluido de trabajo, se utilizaron básicamente dos tipos de fluidos viscoelásticos y un fluido newtoniano. Entre los fluidos viscoelásticos usados, se variaron las concentraciones, con la finalidad de saber cómo varían el coeficiente de transferencia de calor y el gasto con respecto a sus propiedades viscoelásticas. De forma tal que se llegó a la conclusión de usar sólo dos fluidos viscoelásticos con una determinada concentración. De igual manera los resultados se discuten en el capítulo siguiente.

## 5.2 Procedimiento Experimental.

Inicialmente debemos tener el fluido de trabajo ya preparado y listo para trabajar con él, lo mismo que el aparato experimental. Esto es, el circuito cerrado debe estar completamente limpio, la tinta que se va a inyectar debe estar preparada con el mismo tipo de fluido de trabajo que se vaya a utilizar en ese momento. El fluido de trabajo debe estar libre de burbujas y con la concentración adecuada, para el caso de las soluciones no newtonianas. El baño que provee el agua caliente debe tener agua suficiente. Los instrumentos de medición deben estar conectados y encendidos, etc.

Entonces, el paso inicial es introducir el fluido de trabajo al circuito cerrado, procurando evitar la generación de burbujas.

Una vez que el circuito cerrado está completamente lleno, se pone en marcha la bomba de recirculación del agua caliente, a la sección calefactora, al mismo tiempo que se abre el sistema de agua de enfriamiento. Cuando el baño alcanza la tem

peratura de 30 °C , mantenemos esta temperatura con el termostato del baño, hasta que las lecturas registradas por los termopares se estabilizan. Una vez que esto sucede, se inyecta tinta con el fin de medir la velocidad del fluido de trabajo, y se toman las lecturas en nuestros instrumentos de medición. Después se aumenta la temperatura del baño hasta tener un incremento de temperatura determinado. Una vez ahí, se vuelve a controlar la temperatura y se reinicia el proceso anterior. Los incrementos de temperatura se realizan de 5 en 5 grados hasta llegar a la temperatura de 75 u 80 °C.

Lógicamente, esto se hace para cada sustancia y repetidas veces, con objeto de saber si se sigue un patrón de comportamiento.

Finalmente se resumen los resultados obtenidos, comparándolos y analizándolos .

**CAPITULO VI**

**RESULTADOS OBTENIDOS**

## 6. RESULTADOS OBTENIDOS

### 6.1 Memoria de Cálculo.

El objeto principal del presente trabajo es el de conocer el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor para varios fluidos con 'condiciones de flujo' diferentes. Es decir, si el uso de fluidos no newtonianos como fluido de trabajo mejoran o no el coeficiente de transferencia de calor en el sistema termosifón de circuito cerrado. Por tanto se hará el siguiente análisis para calcular dicho coeficiente.

Dado que el sistema cuenta con una sección de prueba muy semejante a los intercambiadores de calor estacionarios (en que la transferencia de calor del fluido caliente al frío ocasiona una diferencia de temperatura de ambos fluidos en su paso a través del intercambiador) entonces, será posible hacer el análisis que sigue :

La figura 6.1 muestra los flujos de fluido en la sección de prueba del sistema

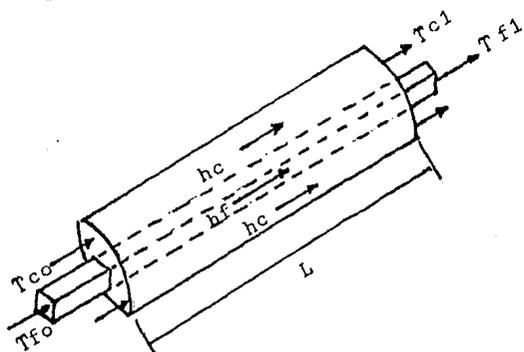


Figura 6.1 Sección de prueba.

donde  $L$  es la longitud de la sección de prueba

$h_c$  es el coeficiente de transferencia de calor del fluido caliente

$h_f$  es el coeficiente de transferencia de calor del fluido de trabajo (fluido frío)

$T_{c1}$ ,  $T_{c0}$  temperatura del fluido caliente a la entrada y sa

lida de la sección de prueba  
 $T_{f_0}, T_{f_1}$  temperatura del fluido frío a la entrada y salida de la sección de prueba

Designamos a  $q$  como la cantidad total de transferencia de calor entre los fluidos caliente y frío, y despreciamos la transferencia de calor hacia el exterior, así como el cambio de energía cinética y potencial. Aplicamos un balance de energía a la entrada y salida de la sección de prueba tenemos:

$$q = \dot{m}_c c_{pc} \Delta T_c = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c_1} - T_{c_0}) \quad 6.1$$

$$q = \dot{m}_f c_{pf} \Delta T_f = \dot{m}_f c_{pf} (T_{f_1} - T_{f_0}) \quad 6.2$$

donde  $\dot{m}_f$  y  $\dot{m}_c$  son los flujos másicos del fluido frío y caliente respectivamente

$c_{pf}$  y  $c_{pc}$  son las capacidades térmicas del fluido frío y caliente respectivamente

$\Delta T_f$  y  $\Delta T_c$  es la diferencia de temperatura entre la salida y entrada del fluido frío y caliente respectv.

La ecuación 6.1 representa el incremento en la entalpia del fluido frío y la ecuación 6.2 expresa el decremento de entalpia del fluido caliente. Las temperaturas que aparecen en estas expresiones se refieren a temperaturas medias del fluido tanto a la entrada como a la salida.

Por otro lado, usando la expresión de la ley de enfriamiento de Newton con el coeficiente de transferencia de calor global  $U$ . Y como la diferencia de temperatura varía con la posición en la sección de prueba se hace necesario trabajar con una ecuación de la forma:

$$q = UA \overline{\Delta T}$$

6.3

donde  $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor  
 $A$  es el área por la que atraviesa el flujo de calor  
 $\overline{\Delta T}$  es un valor medio de la diferencia de temperatura

El valor de  $\overline{\Delta T}$  puede determinarse aplicando un balance de energía para un elemento diferencial, en los fluidos frío y caliente. Dicho elemento tiene de largo  $dx$  y un área de superficie de transferencia de calor  $dA$ , tal como se muestra en la figura 6.2. Los balances de energía y el análisis siguiente están sujetos a las siguientes suposiciones:

- La transferencia de calor sólo se lleva a cabo entre el fluido frío y el caliente
- La conducción axial a lo largo de la tubería es despreciable
- Las capacidades térmicas de los fluidos son constantes
- El coeficiente de transferencia de calor global es constante
- El cambio de energía potencial y cinética son despreciables

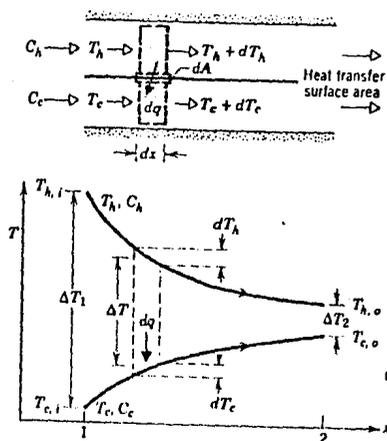


Figura 6.2

Aplicando un balance de energía en un elemento diferencial (figura 6.2) tenemos:

$$dQ = - \dot{m}_c c_{pc} dT_c \quad \delta \quad dq = - c_{pc} dT_c \quad 6.4$$

$$dQ = \dot{m}_f c_{pf} dT_f \quad \delta \quad dq = c_{pf} dT_f \quad 6.5$$

La transferencia de calor a través de la superficie de área  $dA$  puede expresarse como:

$$dq = U dA \Delta T \quad 6.6$$

donde  $\Delta T = T_c - T_f$  es la diferencia de temperatura local entre el fluido caliente y frío

y como 
$$d(\Delta T) = dT_c - dT_f \quad 6.7$$

sustituyendo las ecuaciones (6.4) y (6.5) en (6.7)

$$\begin{aligned} d(\Delta T) &= - \frac{dq}{c_{pc}} - \frac{dq}{c_{pf}} = \\ &= - dq \left( \frac{1}{c_{pc}} + \frac{1}{c_{pf}} \right) \end{aligned} \quad 6.8$$

sustituyendo la ecuación (6.6) en (6.8) tenemos

$$\begin{aligned} d(\Delta T) &= - U \Delta T dA \left( \frac{1}{c_{pc}} + \frac{1}{c_{pf}} \right) \\ \int_0^1 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} &= - U \left( \frac{1}{c_{pc}} + \frac{1}{c_{pf}} \right) \int dA \\ \ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_0} &= - U \left( \frac{1}{c_{pc}} + \frac{1}{c_{pf}} \right) A \quad 6.9 \end{aligned}$$

sustituyendo las ecuaciones (6.1) y (6.2) en (6.9) nos queda:

$$\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_o} = \frac{UA}{q} \left[ (T_{f_1} - T_{f_o}) - (T_{c_1} - T_{c_o}) \right]$$

reagrupando

$$q = UA \frac{\Delta T_1 - \Delta T_o}{\ln (\Delta T_1 / \Delta T_o)} \quad 6.10$$

donde  $\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_o}{\ln (\Delta T_1 / \Delta T_o)}$  se conoce como temperatura media logarítmica

De acuerdo a las suposiciones que hemos hecho podemos igualar el flujo total de calor con la energía que 'gana' el fluido de trabajo en el sistema. Esto es,

$$U A \overline{\Delta T} = \dot{m}_f c_{pf} \Delta T_f$$

donde  $U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_f}}$  es el coeficiente global de transferencia de calor

A es es área por la que atraviesa el flujo de calor

$\overline{\Delta T}$  es la diferencia media logarítmica

$\dot{m}_f$  flujo másico del fluido de trabajo

$c_{pf}$  capacidad calorífica del fluido de trabajo

$\Delta T_f = T_{f_1} - T_{f_o}$  es la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del fluido de trabajo

por tanto  $U = \frac{\dot{m}_f c_{pf} \Delta T_f}{A \overline{\Delta T}}$  6.11

La ecuación (6.10) se utilizará para calcular el coeficiente global de transferencia de calor del sistema termosifón!

Para esta ecuación las temperaturas fueron medidas por termopares y el área directamente por flexómetro, como ya se había mencionado. El flujo másico está dado por:

$$\dot{m}_f = \rho_f \bar{V}_f A_s$$

donde  $\rho_f$  es la densidad del fluido de trabajo ( $\rho = \rho(T)$ )  
 $\bar{V}_f$  es la velocidad media del fluido de trabajo  
 $A_s$  es el área de la sección transversal donde se midió la velocidad

Otro parámetro importante por determinar es el gasto y por ende la velocidad del fluido de trabajo. Y dado que los fenómenos que presentan los fluidos no newtonianos solo pueden efectuarse en flujo laminar, es necesario obtener el número de Reynolds.

La velocidad del fluido de trabajo fue determinada por medición directa. Por lo que el gasto está dado por:

$$G = \frac{\pi d^2 \bar{V}_f}{4}$$

Por otra parte el parámetro que nos indica si el flujo es laminar es el número de Reynolds, el cual se determina por:

$$Re = \frac{\bar{V} d}{\nu}$$

donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido de trabajo ( $\nu = \nu(T)$ )

1. NOTA. La capacidad Térmica de las soluciones no newtonianas es aproximadamente la misma que la del agua, así como la variación de la densidad.

## 6.2 Resultados Experimentales.

A continuación se presentan en resumen los resultados experimentales obtenidos para cada solución empleada.

Los valores de viscosidad para diferentes temperaturas, usados en el caso del agua, y los obtenidos experimentalmente para las soluciones se muestran en la tabla 6.1 .

SOLUCION	T °C	$\nu$ m <sup>2</sup> /s X 10 <sup>6</sup>
Agua Destilada	20	1.005
	25	0.897
	30	0.802
	40	0.662
	50	0.555
	60	0.475
	70	0.414
	80	0.365
Separán AP-30 a 100 ppm en agua destilada	20	1.547
	25	1.328
	30	1.233
	40	0.985
	50	0.777
	60	0.605
	70	0.507

Tabla 6.1 Variación de la viscosidad con la temperatura, para las soluciones empleadas.

Continuación<sup>1</sup> de la tabla 6.1

SOLUCION	T °C	$\nu \text{ m}^2/\text{s} \times 10^6$
Solución Jabonosa a 1000 ppm de bromu ro de hexadeciltrim etil amonio y 1000 ppm de acido para-toluen - sulfónico en agua D.	20	1.283
	25	1.148
	30	0.842
	40	0.67
	50	0.571
	60	0.507
	70	0.441

Los valores para la densidad<sup>2</sup> que se tomaron, fueron:

T °C	$\rho \text{ kg/m}^3$
30	996
35	994
40	992
45	990
50	988
60	983
70	978

Tabla 6.2 Variación de la densidad del agua destilada con res -  
pecto a la temperatura.

<sup>1</sup> NOTA. La viscosidad de las soluciones no newtonianas fue medida con un viscosímetro capilar.

<sup>2</sup> NOTA. Datos obtenidos de la bibliografía .

La figura 6.3 muestra gráficamente la variación de la viscosidad con la temperatura.

Las tablas 6.4 muestran algunos de los resultados obtenidos, para las diferentes sustancias utilizadas.

### 6.3 Análisis y Comparación de Resultados.

Las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 muestran gráficamente las variaciones para cada sustancia, de acuerdo a diferentes parámetros.

La figura 6.7 muestra las soluciones empleadas que fueron descartadas por su alta viscosidad (en el caso del Separán) y su bajo gasto. En el caso de la solución jabonosa, se presentaba un bajo coeficiente de transferencia de calor, aún cuando la disminución en el gasto no fuera tan grande. Razón por la cual solo se dan los intervalos en que éstas trabajaban. Es de cir que se seleccionaron dos tipos de soluciones que nos dieran mejores resultados. Estas soluciones fueron:

- Separán AP-30 a 100 p.p.m. en agua destilada.
- Solución jabonosa a 1000 p.p.m. en agua destilada.

Estas soluciones presentan mayores coeficientes de transferencia de calor para un determinado  $\Delta T$ , lo cual lo podemos ver en la gráfica 6.5, aunque el incremento se haga a costa de un decremento en el gasto.

Podríamos aventurarnos a decir que el aumento del coeficiente de transferencia de calor, se debe a la aparición de flujos secundarios, y que estos tienen apreciable efecto en el gasto.

SOLUCION	CONCENTRACION p.p.m.	DIFERENCIA DE TEMPERATURA °C	INTERVALO DE GASTO cm <sup>3</sup> /min.	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR .
Solución jabonosa	500	9.23 a 44.47	1.55 a 6.15	114.35 a 348.16
	750	9.37 a 54.43	1.55 a 5.61	203.8 a 408.7
Separán AP-30	250	7.54 a 52.53	0.41 a 3.93	5.76 a 157.4

Figura 6.7 Soluciones descartadas en el uso del Termosifón.

$T_{f_0}$ °C	$T_{f_1}$ °C	$T_{c_0}$ °C	$T_{c_1}$ °C	$\Delta T_f$ °C	$\bar{v}$ cm/s	G cm <sup>3</sup> /s	Re	U W/K-m <sup>2</sup>
16.32	25.62	27.00	26.75	9.30	2.367	3.388	363	276.8
20.20	31.64	34.58	33.52	11.44	3.063	4.384	548	304.3
20.37	35.33	40.00	38.35	14.96	3.603	5.158	700	323.4
21.00	38.45	43.78	41.83	17.45	4.193	6.003	867	382.4
21.68	42.07	48.44	46.48	20.39	4.480	6.414	990	390.8
22.72	45.39	53.48	51.00	22.67	4.907	7.024	1146	398.1
23.53	48.30	58.81	55.25	24.77	5.395	7.723	1319	404.9
24.63	51.86	63.47	59.72	27.23	5.535	7.922	1426	410.0
25.90	55.09	68.11	64.00	29.19	6.089	8.716	1640	435.8
26.80	58.44	71.86	67.46	31.64	6.302	9.021	1773	465.8

Tabla 6.4<sup>1</sup> Resultados obtenidos para el termosifón, cuando se utilizó agua destilada como sustancia de trabajo.

<sup>1</sup> NOTA. Todos los valores experimentales que se realizaron no están incluidos, solamente se expone aquí un evento realizado para cada sustancia.

$T_{f_0}$ °C	$T_{f_1}$ °C	$T_{c_0}$ °C	$T_{c_1}$ °C	$\Delta T_f$ °C	$\bar{V}$ cm/s	G cm <sup>3</sup> /s	Re	U W/K-m <sup>2</sup>
18.60	27.95	28.92	28.24	9.35	1.505	2.154	241	267.9
18.85	31.14	34.00	33.16	12.29	1.893	2.710	324	190.5
19.17	35.09	39.28	37.73	15.92	2.710	3.880	546	267.0
19.52	39.12	44.50	42.39	19.60	3.153	4.513	671	299.7
20.35	42.67	49.18	46.95	22.32	3.424	4.902	808	315.0
21.07	46.48	54.32	51.58	25.41	4.138	5.922	1048	370.3
22.45	49.81	59.63	55.81	27.36	4.504	6.447	1198	380.4
23.41	53.18	64.16	60.16	29.77	5.528	7.913	1618	452.5
24.78	56.72	69.22	64.54	31.94	5.968	8.542	1826	474.7
25.82	59.25	73.57	67.66	33.43	6.756	9.671	2240	521.8

Tabla 6.4 Resultados obtenidos para el termosifón, cuando se utilizó hexadecyltrimethyl bromide amonium y ácido para-toluensulfónico en 1000 ppm c/u en agua destilada.

$T_{f_0}$ °C	$T_{f_1}$ °C	$T_{C_0}$ °C	$T_{C_1}$ °C	$\Delta T_f$ °C	$\bar{v}$ cm/s	G cm <sup>3</sup> /s	Re	U W/K-m <sup>2</sup>
20.40	28.97	31.62	30.90	8.57	0.250	0.357	28	21.7
20.95	31.59	35.26	34.51	10.64	0.343	0.491	41	27.2
21.04	35.59	39.90	39.00	14.55	0.742	1.062	100	63.6
21.26	39.83	44.69	43.33	18.57	1.211	1.734	181	114.0
21.44	43.07	49.53	47.66	21.63	1.982	2.838	318	175.3
21.80	47.31	54.30	52.07	25.51	2.625	3.758	457	245.3
22.05	50.11	60.18	56.34	28.06	3.652	5.228	670	306.2
23.17	53.95	64.54	60.59	30.78	3.921	5.613	768	335.5
25.00	57.20	70.54	64.96	32.20	4.731	6.773	976	374.6
26.29	60.29	73.71	68.79	34.00	5.992	8.576	1295	471.0

Tabla 6.4 Resultados obtenidos para el termosifón, cuando se utilizó Separán AP-30 a 100 ppm en agua destilada.

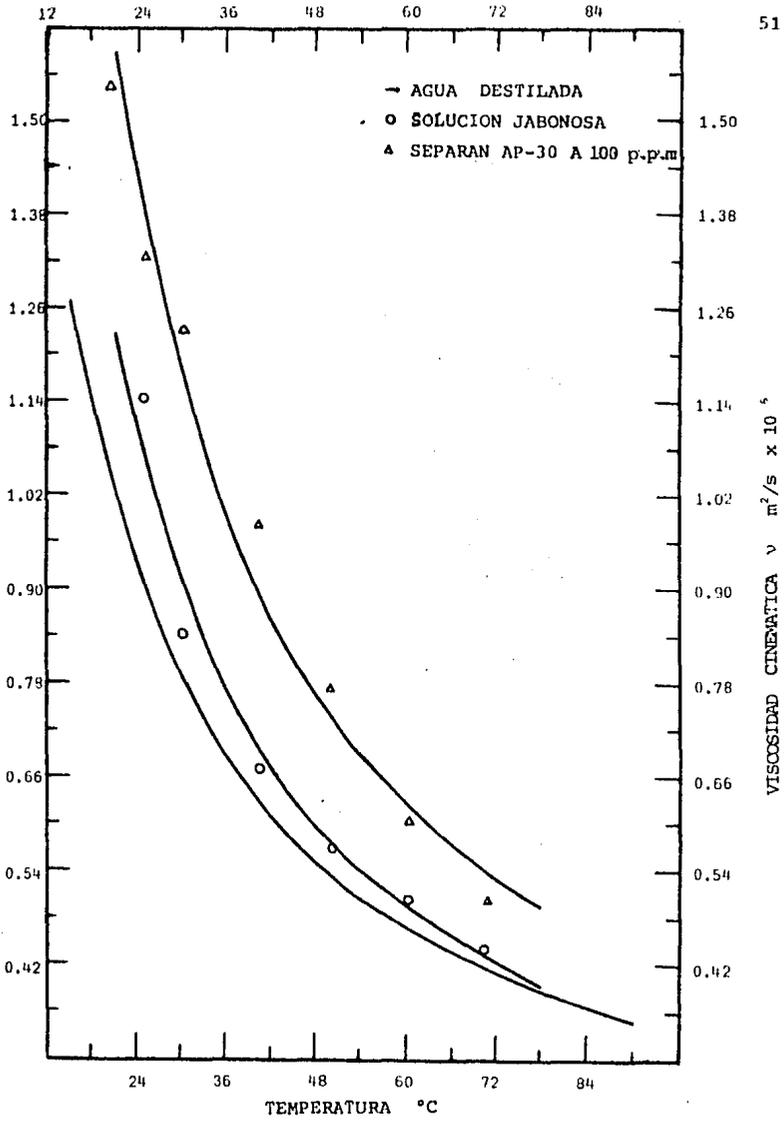
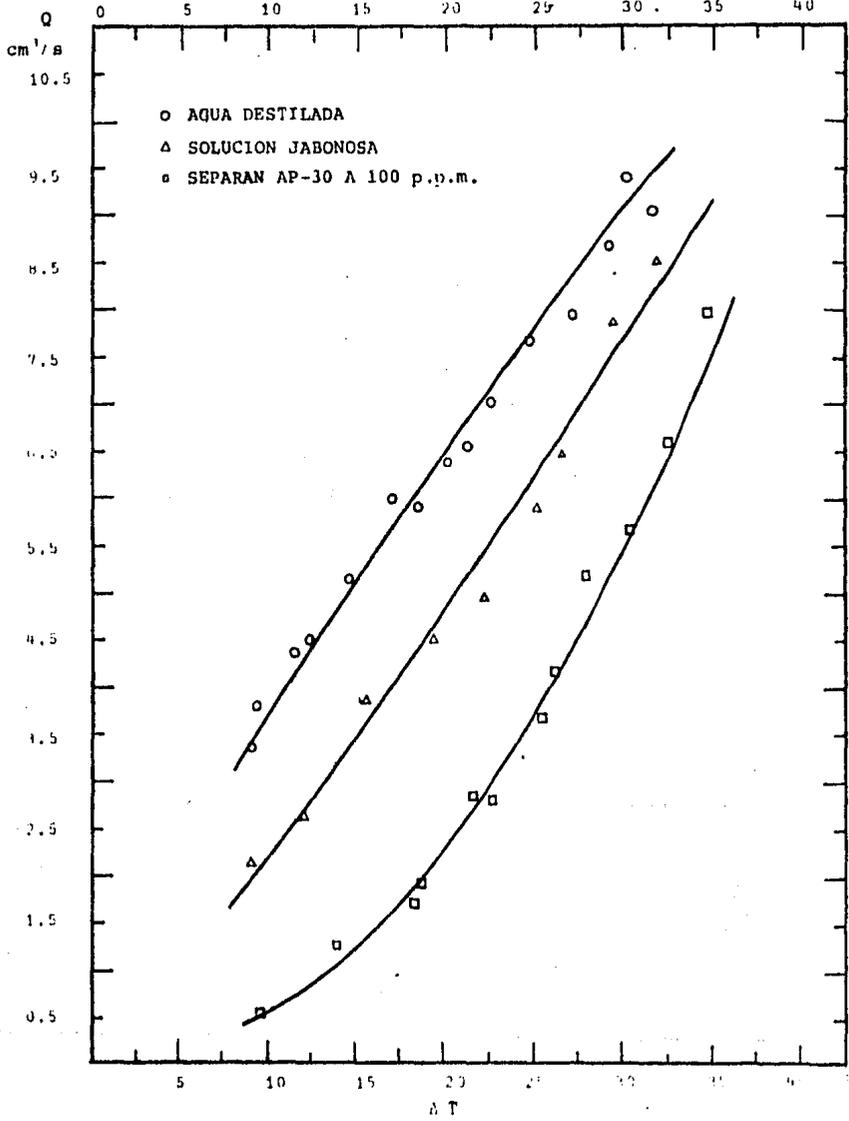


Figura 6.3

Figura 6.4



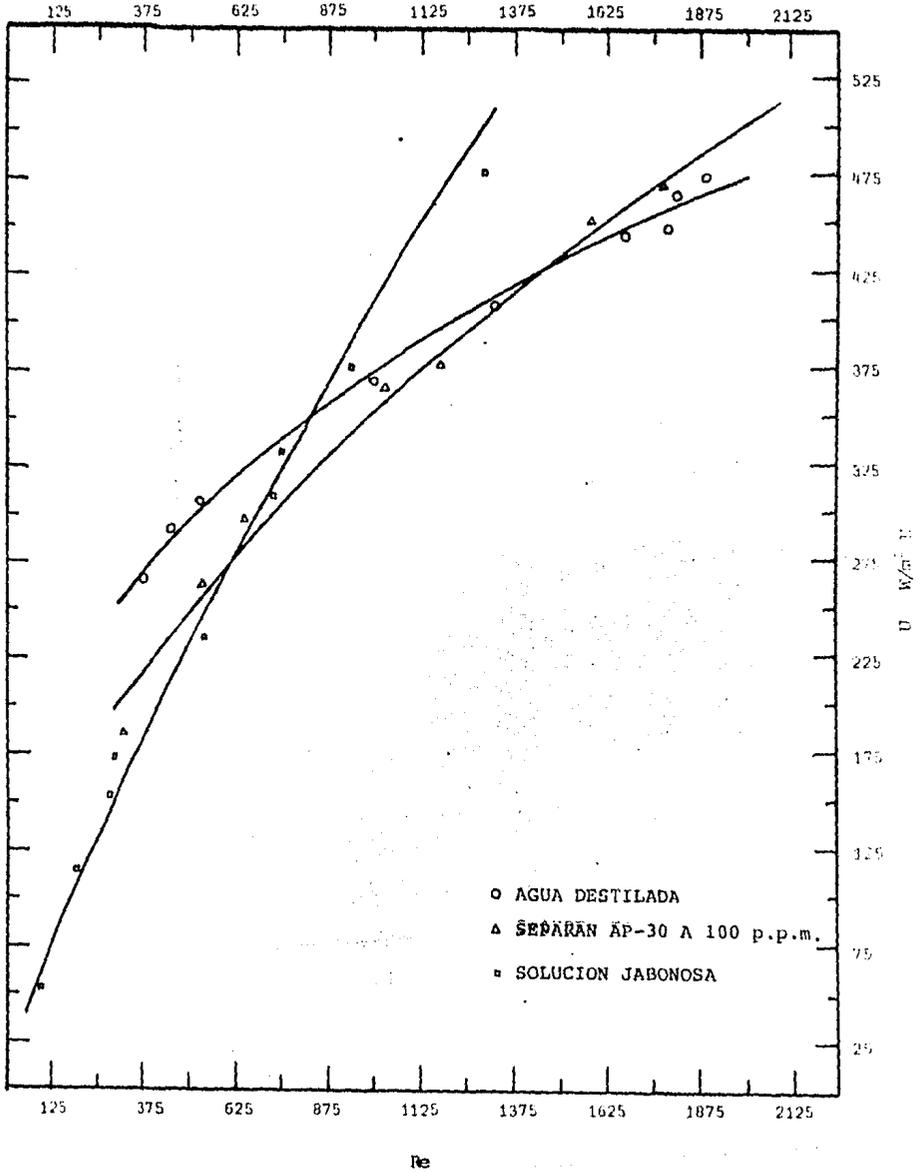


Figura 6.5

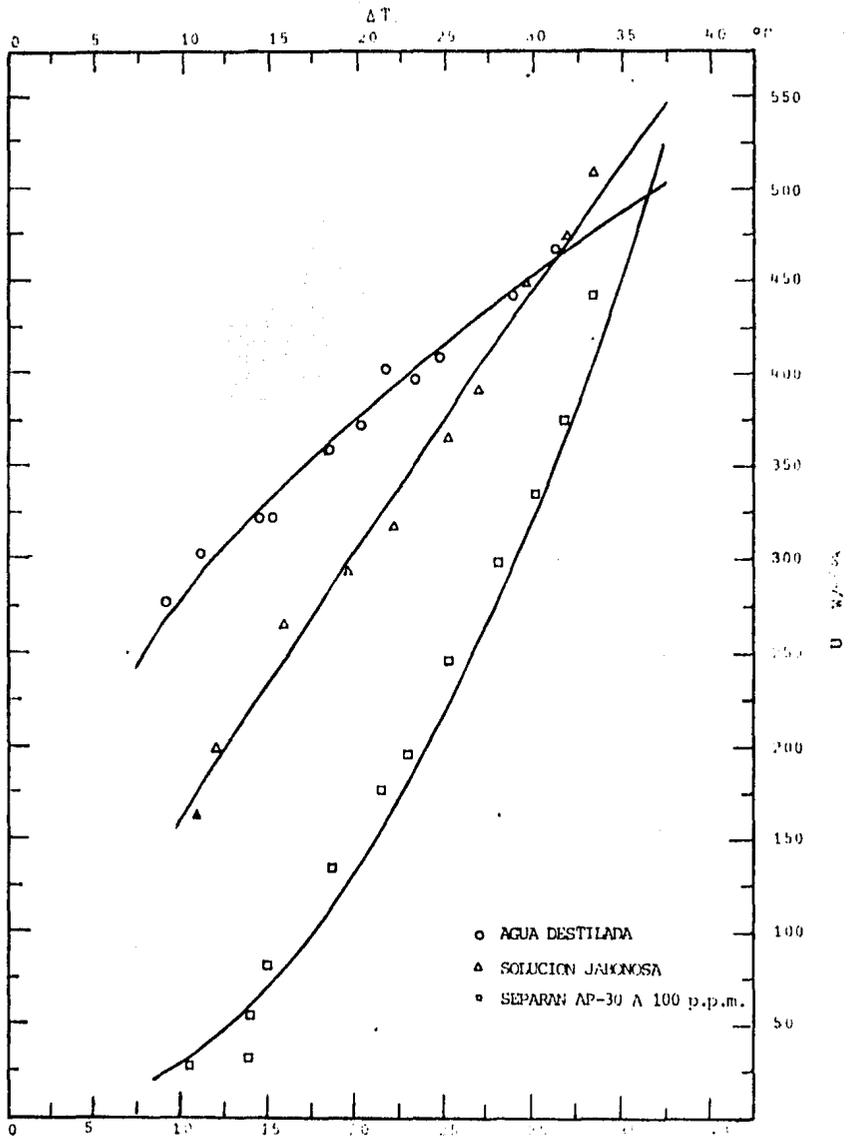


Figura 6.e

## CONCLUSIONES

## 7. CONCLUSIONES .

1. El uso de fluidos viscoelásticos como elementos de conducción de calor en un colector de circuito cerrado tipo termosifón, aumentan el coeficiente de transferen--cia de calor; como puede observarse en las figuras 6.5 y 6.6 y en la tabla 6.4 .
2. La presencia de flujos secundariso en el flujo laminar para soluciones viscoelásticas tienen poca influencia sobre la disminución del flujo másico, pero son ellos los que hacen aumentar el coeficiente de transferencia de calor. Lo cual se ve claro en las gráficas 6.4 y 6.5 y en la tabla 6.4 .
3. Dependiendo de la diferencia de temperatura en el termosifón es posible usar un fluido viscoelástico o agua destilada. Como puede observarse en la gráfica 6.6 y la tabla 6.4 .

APENDICE

## APENDICE A

## A.1 Efectos Termoeléctricos .

El método más común para medir temperatura por efectos eléctricos es el que utiliza el termopar . Cuando se juntan dos metales diferentes , se produce una fuerza electromotriz entre los puntos A y B (ver figura A.1) la cual es , principalmente , función de la temperatura de la junta . Este fenómeno se conoce como efecto Seebeck. Si los dos materiales se conectan a un circuito externo de manera que circule corriente, la F.E.M. puede alterarse ligeramente debido a un fenómeno conocido como efecto Peltier. Además , si existe un gradiente de temperatura en uno o ambos materiales , la F.E.M puede tener otra ligera alteración debida al fenómeno conocido como efecto Thomson .

La F.E.M. de Seebeck es de primordial importancia, ya que depende de la temperatura de la junta . Si se mide cuidadosamente la F.E.M. generada en la junta de dos metales diferentes como función de temperatura, posteriormente dicha junta nos puede servir para la medición de temperaturas . El principal problema para lograr lo anterior es la medición del potencial , ya que cuando se conecta los metales al circuito medidor se generará otra F.E.M en las uniones de éstos con los alambres que sirven de conexión al circuito medidor . Esta F.E.M. dependerá de la temperatura de la última junta y, por tanto , se debe tener en cuenta este potencial adicional. Por lo que es posible usar un " Compensador " . El cual tiene como función entregar una señal más pura y además establece una temperatura de referencia , sin la necesidad de utilizar un baño de hielo, como generalmente se hace . Esto es , el termopar mide la diferencia de temperatura entre la junta a la temperatura desconocida y la temperatura de referencia .

En la tabla A.1 se muestra la F.E.M. térmica en milivolts absolutos para un termopar de cobre constantán , el cual fue ocupado en este trabajo.

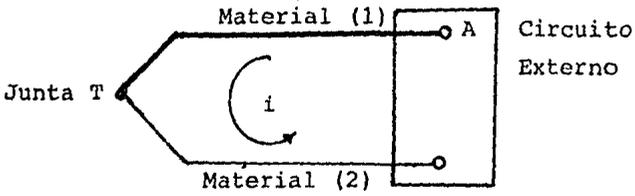


Figura A.1 Junta de dos metales diferentes indicando el efecto termoeléctrico .

Para el análisis de circuitos termoeléctricos se tienen dos leyes generales :

1.- Si se coloca un tercer metal en un circuito termoeléctrico como el mostrado en la figura A.2 la F.E.M. neta del circuito no se verá alterada siempre y cuando las nuevas conexiones se mantengan a la misma temperatura . A esto se le conoce como la ley de los metales intermedios .

2.- Considérese los arreglos mostrados en la figura A.3 . Los circuitos de termopares están contruídos con los mismos materiales , pero operan entre dos límites de temperatura diferentes . El circuito de la figura A.3.a genera una F.E.M. ( $E_1$ ) entre las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  ; el circuito de la figura A.3.b proporciona una F.E.M. de  $E_2$  entre temperaturas  $T_2$  y  $T_3$  . La ley de temperaturas intermedias establece que el mismo circuito generará un F.E.M.

$$E_3 = E_1 + E_2$$

cuando opere entre las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  , como se muestra en la figura A.3.c

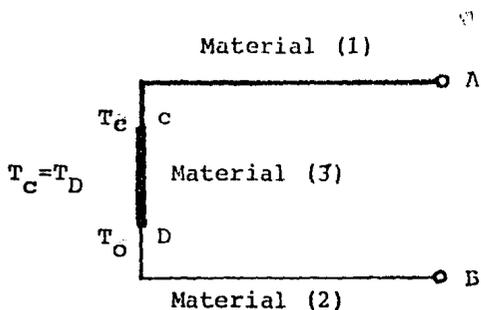


Figura A.2. Influencia de un tercer metal en un circuito termoelectrico; ley de los metales intermedios .

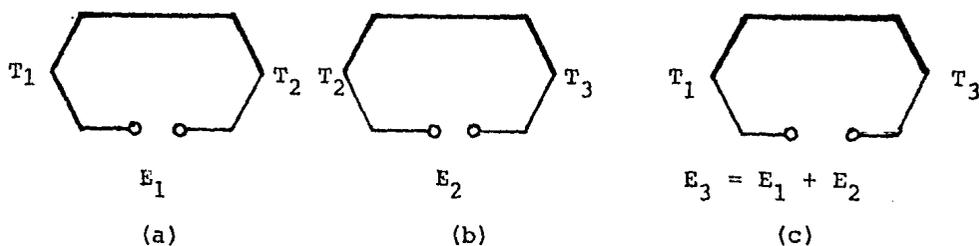


Figura A.3 Circuitos que ilustran la ley de las temperaturas intermedias .

La grafica A.1 y la tabla A.2 representan el rango de operaci3n de los termopares .

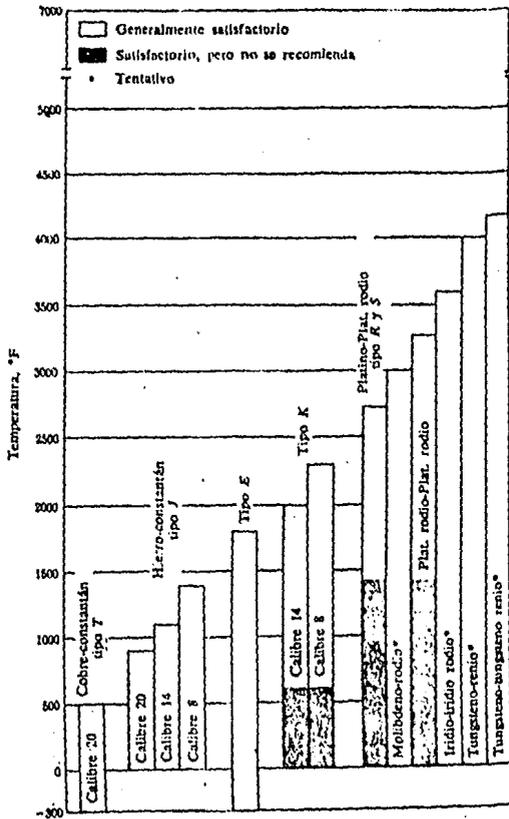
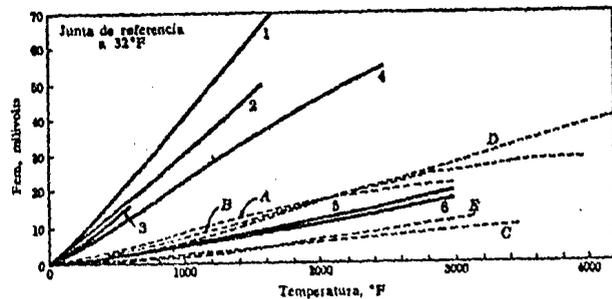


Tabla. A.2 Resumen del rango de operación de los termopares.



Leyenda:

1. Cromel-constantán
2. Hierro-constantán (tipo J)
3. Cobre-constantán (tipo T)
4. Cromel-alumel (tipo K)
5. Platino-platino rodio (tipo R)
6. Platino-platino rodio (tipo S)

Curvas tentativas:

- A Rodio-molibdeno
- B Rodio-tungsteno
- C Iridio-iridio rodio
- D Tungsteno-tungsteno rodio
- E Platino rodio-platino 10% rodio\*

Gráfica A.2 Relación de FEM vs. temperatura para varios materiales termopares.

Table 14-4. THERMOCOUPLE REFERENCE TABLES (continued)  
Copper-Constantan Thermocouples  
(Electromotive Force in Absolute Millivolts, Temperatures  
in Degrees C (Int. 1948), Reference Junctions at 0 C.)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
Millivolts												
-190	-5.379	-5.395	-5.411	-5.428	-5.446	-5.464	-5.482	-5.501	-5.520	-5.539	-5.559	-190
-180	-5.208	-5.223	-5.241	-5.258	-5.276	-5.294	-5.311	-5.329	-5.348	-5.367	-5.387	-180
-170	-5.033	-5.057	-5.082	-5.107	-5.132	-5.157	-5.182	-5.207	-5.232	-5.257	-5.282	-170
-160	-4.857	-4.885	-4.913	-4.941	-4.969	-4.997	-5.025	-5.053	-5.081	-5.109	-5.137	-160
-150	-4.681	-4.712	-4.743	-4.774	-4.805	-4.836	-4.867	-4.898	-4.929	-4.960	-4.991	-150
-140	-4.507	-4.540	-4.573	-4.606	-4.639	-4.672	-4.705	-4.738	-4.771	-4.804	-4.837	-140
-130	-4.334	-4.368	-4.402	-4.436	-4.470	-4.504	-4.538	-4.572	-4.606	-4.640	-4.674	-130
-120	-4.162	-4.197	-4.232	-4.267	-4.302	-4.337	-4.372	-4.407	-4.442	-4.477	-4.512	-120
-110	-3.991	-4.027	-4.063	-4.099	-4.135	-4.171	-4.207	-4.243	-4.279	-4.315	-4.351	-110
-100	-3.821	-3.857	-3.894	-3.931	-3.968	-4.005	-4.042	-4.079	-4.116	-4.153	-4.190	-100
-90	-3.652	-3.689	-3.727	-3.765	-3.803	-3.841	-3.879	-3.917	-3.955	-3.993	-4.031	-90
-80	-3.484	-3.522	-3.560	-3.598	-3.636	-3.674	-3.712	-3.750	-3.788	-3.826	-3.864	-80
-70	-3.317	-3.355	-3.393	-3.431	-3.469	-3.507	-3.545	-3.583	-3.621	-3.659	-3.697	-70
-60	-3.151	-3.189	-3.227	-3.265	-3.303	-3.341	-3.379	-3.417	-3.455	-3.493	-3.531	-60
-50	-2.986	-2.995	-2.995	-2.995	-2.995	-2.995	-2.995	-2.995	-2.995	-2.995	-2.995	-50
-40	-2.821	-2.819	-2.817	-2.815	-2.813	-2.811	-2.809	-2.807	-2.805	-2.803	-2.801	-40
-30	-2.656	-2.643	-2.630	-2.617	-2.604	-2.591	-2.578	-2.565	-2.552	-2.539	-2.526	-30
-20	-2.491	-2.467	-2.443	-2.419	-2.395	-2.371	-2.347	-2.323	-2.299	-2.275	-2.251	-20
-10	-2.326	-2.291	-2.256	-2.221	-2.186	-2.151	-2.116	-2.081	-2.046	-2.011	-1.976	-10
0	0.000	0.035	0.070	0.105	0.140	0.175	0.210	0.245	0.280	0.315	0.350	0
10	0.385	0.420	0.455	0.490	0.525	0.560	0.595	0.630	0.665	0.700	0.735	10
20	0.770	0.805	0.840	0.875	0.910	0.945	0.980	1.015	1.050	1.085	1.120	20
30	1.155	1.190	1.225	1.260	1.295	1.330	1.365	1.400	1.435	1.470	1.505	30
40	1.610	1.645	1.680	1.715	1.750	1.785	1.820	1.855	1.890	1.925	1.960	40
50	2.035	2.070	2.105	2.140	2.175	2.210	2.245	2.280	2.315	2.350	2.385	50
60	2.467	2.502	2.537	2.572	2.607	2.642	2.677	2.712	2.747	2.782	2.817	60
70	2.908	2.943	2.978	3.013	3.048	3.083	3.118	3.153	3.188	3.223	3.258	70
80	3.357	3.392	3.427	3.462	3.497	3.532	3.567	3.602	3.637	3.672	3.707	80
90	3.813	3.848	3.883	3.918	3.953	3.988	4.023	4.058	4.093	4.128	4.163	90
100	4.277	4.312	4.347	4.382	4.417	4.452	4.487	4.522	4.557	4.592	4.627	100
110	4.799	4.834	4.869	4.904	4.939	4.974	5.009	5.044	5.079	5.114	5.149	110
120	5.227	5.262	5.297	5.332	5.367	5.402	5.437	5.472	5.507	5.542	5.577	120
130	5.712	5.747	5.782	5.817	5.852	5.887	5.922	5.957	5.992	6.027	6.062	130
140	6.204	6.239	6.274	6.309	6.344	6.379	6.414	6.449	6.484	6.519	6.554	140
150	6.793	6.828	6.863	6.898	6.933	6.968	7.003	7.038	7.073	7.108	7.143	150
160	7.285	7.320	7.355	7.390	7.425	7.460	7.495	7.530	7.565	7.600	7.635	160
170	7.719	7.754	7.789	7.824	7.859	7.894	7.929	7.964	7.999	8.034	8.069	170
180	8.216	8.251	8.286	8.321	8.356	8.391	8.426	8.461	8.496	8.531	8.566	180
190	8.759	8.794	8.829	8.864	8.899	8.934	8.969	9.004	9.039	9.074	9.109	190
200	9.288	9.323	9.358	9.393	9.428	9.463	9.498	9.533	9.568	9.603	9.638	200
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C

TABLE A. 1

## A.2 Medición de temperaturas .

En la medición de temperaturas en el termosifón se emplean los siguientes equipos :

- a) Termopares cobre-constantán (Elemento sensor)
- b) Compensador de punto frío (Elemento transductor)
- c) Multímetro digital (Elemento receptor )
- d) Multicanal

### A.2.1 Arreglo del circuito

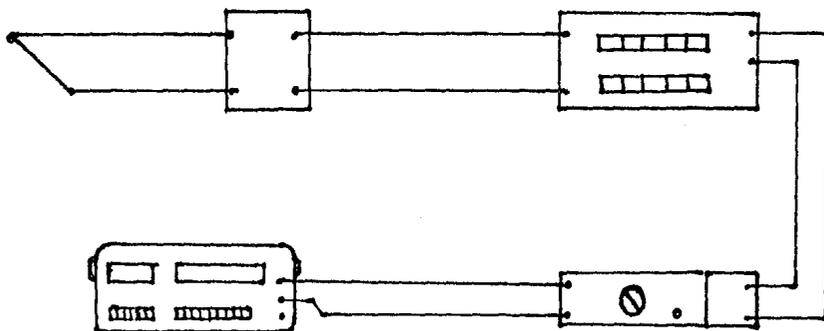


Figura A.4 Circuito de medición de temperatura

En el caso de las soluciones usadas en el termosifón , la medición de viscosidad , se hace por medio de un viscosímetro de escurrimiento , tipo Ubelodde , de tubo capilar .

Este tipo de viscosímetro mide la viscosidad del líquido de manera indirecta , debido a que se toma el tiempo que tardar en fluir un volumen determinado del líquido en estudio , y se compara con el tiempo que tarda en escurrir un volumen igual de un líquido de viscosidad conocida por ejemplo agua destilada .

La relación de la viscosidad del líquido conocido entre el tiempo promedio en que escurre en el viscosímetro nos da como resultado un factor con el cual podemos multiplicar el tiempo que tarda en fluir otro líquido y obtener el valor de su viscosidad relativa a la viscosidad del líquido conocido , en el mismo sistema de unidades.

#### A.3.1 Viscosímetro Capilar .

##### Descripción :

EL viscosímetro capilar usado esta formado esencialmente por 3 tubos de vidrio , resistente a la temperatura , y conectados entre sí por medio de cámaras que se hacen a partir del mismo tubo de vidrio , cada tubo tiene un diámetro distinto y hace también una función diferente .

El tubo de mayor diámetro sirve para introducir el líquido que se requiere estudiar y además tiene una cámara para fijar un nivel recomendado para realizar las mediciones .

El tubo capilar es la parte principal del viscosímetro ya que en el se establece el flujo del líquido , cuando este se ha succionado previamente a la cámara superior y se deja caer .

El tubo mediano Sirve para compensar la presión de vacío que hay en el líquido cuando se ha succionado igualando a la presión atmosférica además este efecto sirve para que el fluido que se va a dejar fluir a través del capilar se separe del fluido contenido en la cámara inferior permitiendo que el líquido escurra libremente; sin el obstáculo que traería si permaneciera unido.

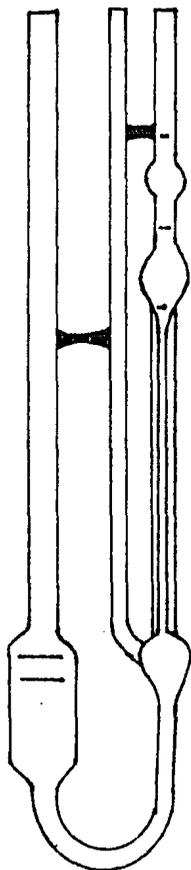


Figura A.5 Viscosímetro capilar

## BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA .

White M. Frank. Mecanica de Fluidos .

Incropera Dewi . Fundamentals of Heat Transfer.

Currie I. G: . Fundamental Mechanics of Fluids .

Holman Phillip. Métodos Experimentales para Ingenieros .

Rohsenow and Hartne . Handbook of Heat Transfer .

REFERENCIAS .

Short Communications . Wissenschaftliche Kurzberichte  
Rheol.Acta 17,454-457 (1978)

Rheology volume 2: Fluids  
(Plenum Publishing Corporation, 1980)

Esta Tesis fue elaborada en su  
totalidad en los Talleres de -  
Impresos Moya, Rep. de Cuba -  
No. 99, Despacho 23.  
México 1, D.F. Tel. 657-24-74  
Presupuestos 9 P.M. a 11 P.M.  
Sr. Salvador Moya Franco.