

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA

INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS



**ESTUDIO DE PARAMETROS DE TERMOSIFON,
EN ESTADO ESTACIONARIO.**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO

P r e s e n t a :

ALFREDO MARQUEZ MUÑOZ.

ASESOR: I.Q. JUAN JOSE TRUJILLO DEL RIO.

GUADALAJARA, JALISCO. 1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

INTRODUCCION	2
NOMENCLATURA	4
CAPITULO I :	
FUNDAMENTOS TEORICOS	6
ANALISIS DIMENSIONAL	7
CAPITULO II :	
DESCRIPCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL	11
CAPITULO III :	
EXPERIMENTACION	15
OBSERVACIONES SOBRE EL EXPERIMENTO	19
CAPITULO IV :	
TABLAS DE DATOS EXPERIMENTALES Y NUMEROS ADIMENSIONALES	23
ANALISIS DE DATOS EXPERIMENTALES	32
CONCLUSIONES	45
BIBLIOGRAFIA	47
APENDICE I :	
PROPIEDADES DEL AGUA (LIQ. SATURADO)	49
APENDICE II :	
CALIBRACION DEL EQUIPO EMPLEADO	51

I N T R O D U C C I O N

El objetivo de esta tesis es encontrar las ecuaciones que nos muestren el comportamiento de un tubo Termosifón Vertical, en estado estacionario. En la actualidad se fabrican calentadores solares con diversos tubos y materiales, - pero no hay una tecnología que los rijan o diseñe, sino que se fabrican por experiencias de calentadores solares anteriores. Por lo tanto, este estudio dará cierto conocimiento del Flujo por Termosifón en tres diferentes longitudes y tres diferentes diámetros, estableciendo las ecuaciones encontradas bajo las condiciones en que se realizaren los experimentos.

La ingeniería como ciencia, despierta el ingenio del hombre para la optimización de cualquier tipo de proceso, por lo que, si se conoce el comportamiento de éste, será factible optimizar la materia y la energía empleada en su realización.

Por una razón muy importante, que es la escasez de energéticos (que se pueden emplear en la fabricación de productos básicos para el desarrollo de la industria, accesorios y comodidades para la vida humana), se realizan intensas investigaciones para encontrar otros tipos de fuentes de energía, y una de estas fuentes es la energía solar.

La energía solar nos llega a la tierra en forma de radiación y al emplear la como fuente de energía no produce contaminación, no tiene costo de insumo, por lo que el proceso para su aprovechamiento resultaría económico, si el equipo utilizado tuviera un costo razonable.

En los calentadores solares, el aprovechamiento de la energía en forma de radiación, es importante. Ya que el tipo de Termosifón (Flujo por diferencia de densidades o bomba térmica), resulta más económico, pues no requiere siste-

ma de bombeo, consideramos importante el estudio de este fenómeno. Este trabajo.

Para tener un mejor aprovechamiento de la energía solar en los calentadores solares, se hizo un estudio del comportamiento del flujo en Termosifón, empleando tres longitudes de tubo, tres diámetros y diferentes gradientes de temperatura.

LOS PARAMETROS ESTUDIADOS SON:

LONGITUD: 100, 150 y 200 cm.
DIAMETRO: 1/2, 3/4 y 1 in. (PULGADAS)
GRADIENTES DE TEMPERATURA, CON UN MAXIMO DE 38°C.

El material de tubo empleado, fué acero galvanizado, cédula No. 40.

Se realizó un análisis dimensional, para encontrar las relaciones necesarias entre las variables que caracterizan el sistema físico, y así encontrar la ecuación de velocidad del flujo por Termosifón.

NOMENCLATURA

- Ao: Area de sección transversal, cm^2
Cp: Calor específico, $\text{Cal/g-}^\circ\text{C}$
Dn: Diámetro nominal, in (Pulgadas)
Do: Diámetro interno, cm.
g: Gravedad = 981 cm/s^2
h: Coeficiente de transferencia de calor, $\text{Cal/cm}^2\text{-s-}^\circ\text{C}$
k: Conductividad térmica, $\text{Cal/mol-s-}^\circ\text{C}$
L: Longitud del tubo, cm.
T(1): Temperatura ambiente del fluido, $^\circ\text{C}$
T(2): Temperatura a la salida del Termosifón, $^\circ\text{C}$
 \bar{T} : Temperatura promedio = $(T(1) + T(2))/2$, $^\circ\text{C}$
 ΔT : Gradiente de temperatura = $T(2) - T(1)$, $^\circ\text{C}$
V: Velocidad del fluido, cm/s
 \bar{V} : Gasto volumétrico, ml/s
 β : Coeficiente de expansión térmica, $^\circ\text{C}^{-1}$
 ρ : Densidad, g/cm^3
 μ : Viscosidad, g/cm-s
 ν : Viscosidad cinemática = μ/ρ , cm^2/s

GRUPOS ADIMENSIONALES:

- Re: Número de Reynolds = $V \text{ Do}/\nu$
Pr: Número de Prandtl = $C_p \mu/k$
Pe: Número de Peclet = Re Pr
Gr: Número de Grashof = $g \beta \bar{T} \text{ Do}^3/\nu^2$

NOTA: Los cuatro números adimensionales empleados en esta tesis, fueron calculados a temperatura promedio.

C A P I T U L O I

FUNDAMENTOS TEORICO:

El flujo por Termosifón es conocido como bomba térmica, puesto que lo causa solamente la radiación recibida.

El movimiento natural del fluido se debe a cambios en la densidad del mismo, los cuales son provocados por gradientes de temperatura.

En este caso, el fluido permanece en una tubería en forma de "U", en la cual una columna recibe la radiación, originando el fenómeno de convección natural, en el cual las partículas de fluido que se encuentran a mayor temperatura ascienden, mientras que sucede lo contrario con la columna de partículas frías.

La convección natural o libre se observa como resultado del movimiento del fluido, debido a los cambios en densidades que son consecuencia del proceso de calentamiento.

El flujo encontrado en el experimento es laminar o viscoso, encontrándose en el rango de $.06 \leq Re \leq .40$, basado en el diámetro interno del tubo empleado, las fuerzas debidas al empuje ejercido por la diferencia en la densidad de las dos columnas del tubo en forma de "U", establecen la capa límite de velocidad, y la capa límite térmica dentro del tubo.

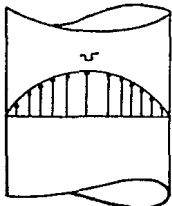


FIG. 1

Se muestra en la figura (1) la capa límite de velocidad, observando el efecto de la viscosidad sobre la velocidad del fluido y cómo se vencen fuerzas opositoras al movimiento, para obtener un flujo del fluido.

ANÁLISIS DIMENSIONAL

El Análisis Dimensional es fundamentalmente un método por medio del cual se obtiene información parcial sobre las relaciones necesarias entre las variables que caracterizan determinados sistemas físicos. La ventaja del método es su aplicación cuando sólo se tiene conocimiento parcial del sistema y la información parcial complementaria obtenida por la aplicación del método. Es de gran valor práctico para limitar el número de experimentos especiales o de mediciones necesarias para conseguir una información completa.

Para dicho análisis se usó el método " Π " de Buckingham, el cual nos dice:

- a) La restricción impone que las fórmulas dimensionales de todas las cantidades medidas deben de tener la forma de producto de potencias de las clases de unidades elegidas como fundamentales.
- b) Las reglas de las transformaciones matemáticas no implican el conocimiento del tamaño o magnitud de las unidades y son válidas para todos los sistemas.

"TEOREMA Π ": Una relación cualquiera que satisfaga estos requisitos, admitirá una forma a determinar, que comprenda únicamente productos adimensionales de todas las variables físicas y constantes adimensionales.

LOS PARAMETROS EMPLEADOS PARA EL ANÁLISIS SON:

<u>PARAMETRO</u>	<u>SÍMBOLO</u>	<u>DIMENSION</u>
Díámetro	D	L
Longitud	L	L
Densidad	ρ	ML^{-3}
Gravedad	g	Lt^{-2}
Viscosidad	μ	$ML^{-1}t^{-1}$
Gradiente de Temperatura	ΔT	T
Coef. de Expansión Térmica	β	T^{-1}

Obteniendo una ecuación de velocidad en función de ellos:

$$V = f(D, L, \rho, g, \mu, \Delta T, \beta) \dots \dots \dots (2-1)$$

Según el teorema, el número de grupos " π " adimensionales son:

$$\pi(x) = N-M \dots \dots \dots (2-2)$$

Donde "N" es el número de argumentos y "M" el número de dimensiones fundamentales, utilizadas en el sistema. El número de argumentos son 8 y las dimensiones fundamentales (L, M, θ , T) son 4, por lo tanto el número de grupos " π " adicionales son 4.

$$f(V, D, L, \rho, g, \mu, \Delta T, \beta) \dots \dots \dots (2-3)$$

$$\pi(1) = V-D^{-1} \rho^{-1} \mu^b \Delta T^d \dots \dots \dots (2-4)$$

$$\pi(2) = L-D^{-1} \rho^{-1} \mu^b \Delta T^d \dots \dots \dots (2-5)$$

$$\pi(3) = g-D^{-1} \rho^{-1} \mu^b \Delta T^d \dots \dots \dots (2-6)$$

$$\pi(4) = \beta-D^{-1} \rho^{-1} \mu^b \Delta T^d \dots \dots \dots (2-7)$$

Resolviendo y aplicando la condición de homogeneidad dimensional, se tiene:

$$\pi(1) = (L\theta^{-1}) (L)^a (ML^{-3})^b (ML^{-1}\theta^{-1})^c (T)^d = 0 \dots (2-8)$$

Longitud (L) $1+a-3b-c = 0$

Masa (M) $b+c = 0$

Tiempo (θ) $-1-c = 0$

temperat. (T) $d = 0$

La solución de las ecuaciones anteriores es:

$$a = 1; \quad b = 1; \quad c = -1; \quad d = 0$$

Los números adimensionales " π " resultan:

$$\pi(1) = V \rho D / \mu \dots\dots\dots (2-9)$$

$$\pi(2) = L/D \dots\dots\dots (2-10)$$

$$\pi(3) = g D^3 \rho^2 / \mu^2 \dots\dots\dots (2-11)$$

$$\pi(4) = \beta \Delta T \dots\dots\dots (2-12)$$

La relación de los grupos " π " que se estudiará es:

$$\pi(1) = f (\pi(2), \pi(3), \pi(4)) \dots\dots\dots (2-13)$$

El número adimensional " $\pi(1) = V \rho D / \mu$ " que se le llama "Número de Reynolds" es empleado en la mecánica de fluidos como parámetro que determina el tipo de flujo, ya sea éste laminar o turbulento, teniendo rangos establecidos para cada uno.

El número adimensional " $\pi(3) \cdot \pi(4) = g D^3 \Delta T \rho / \mu^2$ ", conocido como "Número de Grashof" y que puede interpretarse físicamente como un grupo adimensional, representando la razón de las fuerzas de empuje a las fuerzas viscosas en el sistema de flujo de convección libre.

El número adimensional " $\pi(2) = L/D$ ", es la relación de longitud sobre el diámetro, que se estudiará a diversas potencias y analizará los resultados.

El motivo primordial al realizar esta tesis es estudiar la relación existente entre el Número de Reynolds con el Número de Grashof y la relación Longitud/Diámetro.

$$Re = f (Gr, L/D) \dots\dots\dots (2-14)$$

C A P I T U L O I I

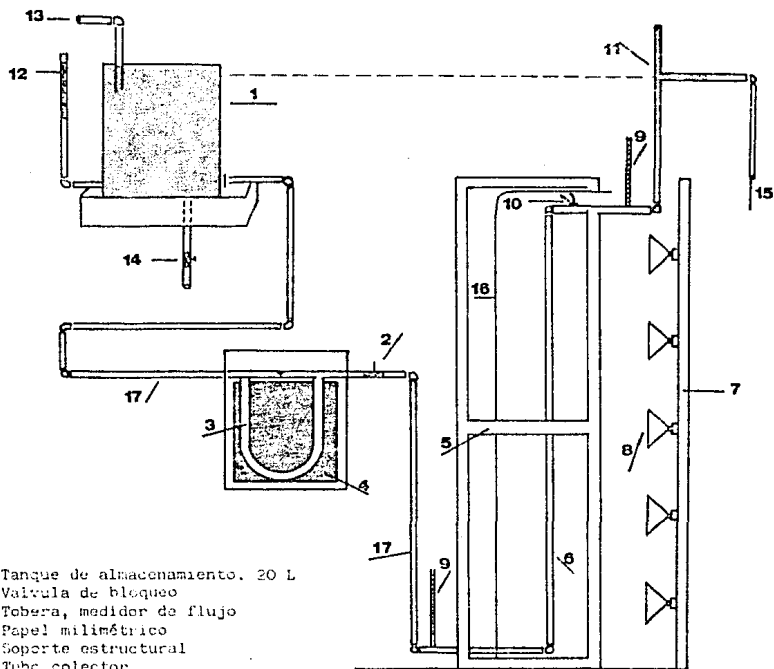
DESCRIPCION DEL GRUPO EXPERIMENTAL

Para observar la variación de los parámetros: Diámetro, Longitud y Gradientes de Temperatura en el flujo por Termosifón, se diseñó un calentador de agua experimental, el cual consta de: (Ver figura 2)

- a) Una fuente calorífica de radiación infrarroja, emitida por unas lámparas tratando de simular la radiación solar.
- b) Un tubo en forma de "U" que nos forma las dos columnas del fluido, en el cual una columna es intercambiable y ésta es la que recibe la radiación.
- c) Una pantalla parabólica, reflectora de radiación, la cual refleja los rayos dispersos de las lámparas y los incide en el tubo, teniendo así mayor absorción.
- d) Un tanque de alimentación, teniendo una altura tal que el nivel coincida con la salida del tubo en "U", evitando así el flujo por efecto de la presión.
- e) Una tobera calibradora, con el fin de registrar el flujo de agua por la caída de presión, en el medidor de la misma.
- f) Un termistor a la salida del tubo intercambiable con su multímetro (TMK) para leer la resistencia y traducirla a temperatura.
- g) Dos termómetros, uno en la entrada del agua en la parte inferior del tubo intercambiable y el otro en la parte superior del mismo para indicar la temperatura de salida.
- h) Una válvula a la salida de la Tobera, como seguridad para el cambio del tubo.

- i) Para observar el nivel del agua a la salida, se ideó poner una "T" de vidrio
- j) Conexiones y reducciones de manguera de plástico de $\frac{1}{4}$ de pulgada

CALENTADOR DE AGUA EXPERIMENTAL



- 1 Tanque de almacenamiento. 20 L
- 2 Valvula de bloqueo
- 3 Tobera, medidor de flujo
- 4 Papel milimétrico
- 5 Soporte estructural
- 6 Tubo colector
- 7 Soporte de lámparas
- 8 Lámparas de radiación infrarroja
- 9 termómetro de bulbo, - 10 a 200 °C
- 10 Termistor
- 11 "T" de vidrio
- 12 Indicador de nivel
- 13 Alimentación directa al tanque
- 14 Válvula reguladora de nivel
- 15 Salida del agua caliente
- 16 Pantalla parabólica
- 17 Manguera plástico (dn = 1/4")

FIG (2)

C A P I T U L O I I I

EXPERIMENTACION

Para la medición de los parámetros fijados, fué necesario el empleo de aparatos de medición. Para medir el flujo se utilizó una Tobera⁺. Para el registro de la temperatura se usó un Termistor⁺ y el Diámetro en el flujo por Termosifón, se usaron tres diferentes tipos de Diámetro y Longitud.

LOS TUBOS EMPLEADOS EN EL EXPERIMENTO FUERON DE ACERO GALVANIZADO, CEDULA #40, CUYAS DIMENSIONES SON:

<u>TAMAÑO NOMINAL</u>	<u>DIAMETRO INTERIOR</u>	<u>AREA DE SECCION TRANSVERSAL cm²</u>		
		<u>200 cm</u>	<u>150 cm</u>	<u>100 cm</u>
1/2"	1.580 cm	992.75	744.56	496.37
3/4"	2.033 cm	1,315.07	986.31	657.54
1"	2.664 cm	1,673.84	1,255.33	836.92

Además de los tres tipos de Diámetro y Longitud empleados como tubos intercambiables, se usó manguera de 1/4" (0.635 cm) para unir el flujo del tanque de almacenamiento con la entrada del tubo intercambiable, que es el que se encuentra dentro de la Pantalla Parabólica y Receptor de la Radiación.

En la parte superior, en la salida del Tubo Receptor de Radiación, se colocó una "T" de vidrio por dos motivos:

- a) Observar el nivel de llenado, para evitar el flujo por presión.
- b) Evitar la formación de vacío y una succión de agua. Conectada a la "T" de vidrio se puso una manguera para recibir el agua caliente resultante del calentamiento que va a un recipiente colector, en el cual se toman las pruebas de gasto volumétrico con la probeta y el cronómetro.

(+) Ver apéndice II

PANTALLA REFLECTORA:

Debido a que la radiación de las lámparas era muy dispersa, se utilizó una pantalla cromada y pulida como concentradora de radiación de la fuente calorífica sobre el tubo de prueba. La pantalla tiene las siguientes dimensiones: De ancho 625 cm., por 200 cm. de largo y un espesor de 0.3048 mm., en la cual la lámina se curvó dándole una forma parabólica.

El tubo de prueba se colocó en el foco de la parábola con lo cual se concentraron los rayos reflejados en el tubo, se redujo la radiación perdida y aumentó la eficiencia del sistema.

FUENTE DE ENERGIA:

El flujo calorífico se obtuvo mediante lámparas de radiación infrarroja, con una potencia de 250 watts, teniendo como área efectiva de radiación un medio de la superficie de una esfera (S). Por lo que se consideró una lámpara generadora de una media esfera radiante:

$$S = \frac{4 \pi r^2}{2} ; \quad S = 2 \pi r^2$$

Y donde (r) es el radio de la esfera radiante o sea la distancia que hay entre el tubo de prueba y la lámpara.

Para obtener los diferentes gradientes de temperatura se fueron retirando cada vez más las lámparas, provocando así menor radiación incidente y como consecuencia menor calentamiento.

Considerando que la longitud máxima del tubo de prueba sería de 200 cm., se colocaron cinco lámparas en un soporte vertical de madera rectangular. Para el tubo de prueba de 150 cm. se usaron solamente cuatro lámparas y para el tubo de prueba de 100 cm. se usaron sólo tres lámparas.

Una vez armado el aparato, se procedió a la realización de las pruebas - para cada uno de los experimentos.

Para ilustrar el método empleado en la realización del experimento se -- muestra una prueba típica, que se describe a continuación:

El primer paso es llenar el aparato hasta el nivel indicado por la "T" de vidrio, se toma la temperatura del agua ambiente, registrándose como T (1). Se encienden las lámparas, las cuales se encuentran a la me nor distancia (r) para obtener el mayor calentamiento y esperar que el flujo sea estacionario.

Los datos se tomaron desde el mayor calentamiento al mínimo, ésto logrado retirando las lámparas gradualmente del tubo de prueba, sin hacerlo brusco para no perder la continuidad del calentamiento y mantener el flujo estacionario.

Se decidió tomar datos de temperatura y gasto volumétrico cada dos grados de temperatura descendente y así sucesivamente se realizaron las pruebas con - los tres diámetros y longitudes.

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON,
EN ESTADO ESTACIONARIO

CORRIDA TIPICA

PRUEBA (1)

T (1) (°C)	T (2) (°C)	\bar{T} (°C)	\bar{V} (ml/s)
22	54	38	1.465
22	52	37	1.200
22	50	36	1.100
22	48	35	1.000
22	46	34	0.900
22	44	33	0.667
22	41	31.5	0.533
22	38	30	0.333

L = 200 cm.
Dn = 1 cm.

Do = 2.664 cm.
Ao = 1,673.84 cm.²

OBSERVACIONES HECHAS DURANTE LA REALIZACION DE LAS PRUEBAS

Es conveniente hacer cierto tipo de observaciones obtenidas a lo largo - del experimento y algunas fueron repetitivas.

En pruebas realizadas se vió que la Tobera, debido al pequeño flujo producido, era imprecisa por sus dificultades en su visualización correcta y en la gráfica, por lo que se empleó una probeta graduada y un cronómetro para medir el flujo termosifónico.

En el caso del Termistor, sucedió algo similar que con la Tobera, como el "TMK" medidor de la resistencia no tiene una escala completa, parte de los datos eran inexactos y no coincidían con la lectura del termómetro que se encontraba a un lado suyo.

En conclusión el Termistor como la Tobera nos ayudaron a visualizar rápidamente un cambio cualitativo, pero no se emplearon para el registro de datos cuantitativos.

El principal problema de la realización de cada prueba fué mantener el nivel del tanque de almacenamiento constante, una vez calibrado con la conexión "T" de vidrio. Ya que el tanque de almacenamiento se está cargando por medio de una manguera que viene de una llave de agua potable, y como se eliminó el - flotador para control de nivel, por ineficiente, se ideó una salida del tanque de almacenamiento por medio de una válvula, con la cual se hicieron los ajustes al nivel.

Cuando el nivel del tanque baja, la columna de agua caliente baja y el - flujo por Termosifón se suspende, ya que necesita alcanzar una mayor diferencia en la densidad para lograr derramar el agua caliente por el tubo colector,

en consecuencia, hay un calentamiento excesivo del agua, que al hacer la corrección del nivel del tanque de almacenamiento nos da un mayor flujo, por lo cual hay que esperar el reajuste del sistema.

Lo mismo sucede cuando el nivel sube de lo establecido, comienza además - del flujo por Termosifón, un flujo por la presión ejercida por la columna de agua fría, obteniéndose así un decrecimiento en la temperatura de salida del tubo de prueba, lo cual al regular el nivel, hay que esperar el reajuste del sistema.

También se observó la formación de pequeñas burbujas, ya que la manguera transparente que se encuentra conectada con la salida del tubo de prueba lo presenta, y periódicamente un burbujec mayor, que es el desprendimiento de estas burbujas, por lo cual se concluye que hay una pequeña gasificación alrededor del tubo de prueba que reduce la eficiencia en la transmisión de calor, además el desprendimiento de las burbujas favorecen al cambio de la densidad y como consecuencia, mayor flujo.

No se hizo tratamiento alguno para eliminar las pequeñas burbujas, por lo que los resultados obtenidos no tienen corrección alguna por este fenómeno.

Los datos del gasto volumétrico que se darán en las tablas de datos experimentales en el capítulo siguiente, son promedios de las corridas experimentales.

C A P I T U L O I V

TABLAS DE DATOS EXPERIMENTALES Y NUMEROS ADIMENSIONALES

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOFON

EN ESTADO ESTACIONARIO

PRUEBA (1)

L = 200 cm
Dn = 1" (in)

Do = 2,664 cm
Ao = 1,673.84 cm²

T(1) (°C)	T(2) (°C)	\bar{T} (°C)	\bar{v} (ml/s)	ρ (g/cm ³)	$\mu(10^4)$ (g/cm-s)	$\beta(10^5)$ (°C ⁻¹)	Pr	Re	Pe	Gr 10 ⁻⁶	Gr(L/D) 10 ⁻⁸	Gr(L/D) ^{3.5} 10 ⁻¹³
22	54	38	1.465	0.9929	67.6	35.1	4.50	0.342	1.539	5.337	4.007	1.957
22	52	37	1.200	0.9935	69.0	34.0	4.62	0.275	1.270	4.838	3.632	1.774
22	50	36	1.100	0.9939	70.5	32.9	4.72	0.247	1.166	4.367	3.278	1.661
22	48	35	1.000	0.9942	72.0	31.7	4.82	0.220	1.060	3.924	2.946	1.439
22	46	34	0.900	0.9945	73.6	30.6	4.92	0.193	0.952	3.524	2.646	1.292
22	44	33	0.667	0.9948	75.0	29.8	5.00	0.141	0.705	3.209	2.409	1.176
22	41	31.5	0.533	0.9951	77.4	28.5	5.20	0.109	.567	2.752	2.066	1.009
22	38	30	0.333	0.9954	80.0	27.2	5.40	0.066	0.356	2.343	1.759	0.859

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON
EN ESTADO ESTACIONARIO

PRUEBA { 2 }

L = 200 cm

Dn = 3/4"

Do = 2,093 cm

Ao = 1,315.07 cm²

T(1) (°C)	T(2) (°C)	\bar{T} (°C)	\bar{V} (ml/s)	ρ (g/cm ³)	μ (10 ⁴) (g/cm-s)	β (10 ⁵) (°C ⁻¹)	Pr	Re	Pe	Gr 10 ⁻⁶	Gr(L/D) 10 ⁻⁸	Gr(L/D) ^{3.5} 10 ⁻¹³
22	50	36	1.280	0.9939	70.5	32.9	4.72	0.287	1.355	2.117	2.023	1.806
22	48	35	1.150	0.9942	72.0	31.7	4.82	0.253	1.219	1.903	1.818	1.623
22	47	34.5	1.000	0.9943	72.8	31.1	4.86	0.217	1.055	1.800	1.720	1.535
22	45	33.5	0.933	0.9946	74.0	30.3	4.96	0.200	0.992	1.649	1.576	1.406
22	42	32	0.733	0.9950	76.8	29.0	5.12	0.151	0.773	1.401	1.339	1.195
22	40	31	0.667	0.9952	78.2	28.0	5.26	0.135	0.710	1.264	1.208	1.078
22	38	30	0.500	0.9954	80.0	27.2	5.40	0.099	0.535	1.136	1.085	0.969

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON
EN ESTADO ESTACIONARIO

PRUEBA (3)

L = 200 cm
Dn = 1/2"

Do = 1.580 cm
Ao = 992.75 cm²

T(1) (°C)	T(2) (°C)	\bar{T} (°C)	\bar{V} (ml/s)	ρ (g/cm ³)	μ (10 ⁴) (g/cm-s)	β (10 ⁵) (°C ⁻¹)	Pr	Re	Pe	Gr 10 ⁻⁶	Gr(L/D) 10 ⁻⁸	Gr(L/D) ^{3.5} 10 ⁻¹¹
22	50	36	1.400	0.9939	70.5	32.9	4.72	0.314	1.482	0.911	1.153	2.079
22	48	35	1.280	0.9942	72.0	31.7	4.82	0.281	1.358	0.818	1.035	1.867
22	46	34	1.100	0.9945	73.6	30.6	4.92	2.237	1.166	0.735	0.930	1.677
22	44	33	1.000	0.9948	75.0	29.8	5.00	0.211	1.055	0.669	0.847	1.527
22	42	32	0.767	0.9950	76.8	29.0	5.12	0.158	0.809	0.613	0.763	1.376
22	40	31	0.700	0.9952	78.2	28.0	5.26	0.142	0.747	0.544	0.689	1.241
22	38	30	0.533	0.9954	80.0	27.2	5.40	0.106	0.572	0.489	0.619	1.116

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON
EN ESTADO ESTACIONARIO

PRUEBA (4)

L = 150 cm

Dn = 1"

D_o = 2.664 cm

A_o = 1,255.38 cm²

T(1) (°C)	T(2) (°C)	\bar{T} (°C)	\bar{V} (ml/s)	ρ (g/cm ³)	$\mu(10^4)$ (g/cm-s)	$\beta(10^5)$ (°C ⁻¹)	Pr	Re	Pe	Gr 10 ⁻⁶	Gr(L/D) 10 ⁻⁸	Gr(L/D) ^{3.5} 10 ⁻¹³
26	57	41.5	0.733	0.9914	63.0	39.2	4.16	0.245	1.019	7.511		
26	56	41	0.750	0.9915	63.6	38.6	4.20	0.248	1.042	7.134	4.017	0.956
26	54	40	0.625	0.9920	64.5	37.6	4.30	0.204	0.877	6.598	3.715	0.884
26	52	39	0.533	0.9925	66.0	36.4	4.40	0.170	.748	5.954	3.352	0.797
26	50	38	0.500	0.9929	67.6	35.1	4.50	0.156	0.702	5.337	3.005	0.715
26	48	37	0.442	0.9935	69.0	34.0	4.62	0.135	0.624	4.837	2.723	0.648
26	46	36	0.333	0.9939	79.5	32.9	4.72	0.100	0.472	4.366	2.458	0.585
26	44	35	0.253	0.9942	72.0	31.7	4.82	0.074	0.357	3.924	2.209	0.526
26	42	34	0.211	0.9945	73.6	30.6	4.92	0.060	0.295	3.523	1.984	0.472

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON
EN ESTADO ESTACIONARIO

PRUEBA (5)

L = 150 cm
Dn = 3/4 "

Do = 2.093 cm
Ao = 986.31 cm²

T(1) (°C)	T(2) (°C)	\bar{T} (°C)	\bar{V} (ml/s)	ρ (g/cm ³)	$\mu(10^4)$ (g/cm-s)	$\beta(10^5)$ (°C ⁻¹)	Pr	Re	Pe	Gr 10 ⁻⁶	Gr(L/D) 10 ⁻⁸	Gr(L/D) ^{3.5} 10 ⁻¹³
26	57	41.5	0.805	0.9914	63.0	39.2	4.16	0.269	1.119	3.623	2.596	1.129
26	55	40.5	0.733	0.9918	64.0	38.0	4.26	0.241	1.027	3.324	2.382	1.036
26	54	40	0.667	0.9920	64.5	37.6	4.30	0.218	0.937	3.200	2.293	0.997
26	51	38.5	0.630	0.9927	67.0	35.8	4.45	0.198	0.881	2.721	1.950	0.848
26	49	37.5	0.550	0.9932	68.4	34.8	4.55	0.169	0.769	2.475	1.774	0.771
26	46	36	0.420	0.9939	70.5	32.9	4.72	0.126	0.595	2.117	1.517	0.660
26	44	35	0.383	0.9942	72.0	31.7	4.82	0.112	0.540	1.903	1.364	0.593
26	42	34	0.308	0.9945	73.6	30.6	4.92	0.088	0.433	1.709	1.225	0.533

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON
EN ESTADO ESTACIONARIO

PRUEBA (6)

L = 150 cm
Dn = 1/2 "

Do = 1.580 cm
Ao = 744.56 cm²

T(1) (°C)	T(2) (°C)	\bar{T} (°C)	\bar{V} (ml/s)	ρ (g/cm ³)	$\mu(10^4)$ (g/cm-s)	$\beta(10^5)$ (°C ⁻¹)	Pr	Re	Pe	Gr 10 ⁻⁶	Gr(L/D) 10 ⁻⁸	Gr(L/D) ^{3.5} 10 ⁻¹³
26	58	42	1.000	0.9912	62.4	39.8	4.10	0.337	1.382	1.632	1.549	1.361
26	56	41	0.833	0.9915	63.6	38.6	4.20	0.276	1.159	1.488	1.413	1.241
26	54	40	0.785	0.9920	64.5	37.6	4.30	0.256	1.101	1.376	1.306	1.147
26	52	39	0.733	0.9925	66.0	36.4	4.40	0.234	1.030	1.242	1.179	1.035
26	50	38	0.667	0.9929	67.6	35.1	4.50	0.208	0.936	1.113	1.057	0.928
26	48	37	0.553	0.9935	69.0	34.0	4.62	0.169	0.781	1.009	0.958	0.841
26	46	36	0.500	0.9939	70.5	32.9	4.72	0.150	0.708	0.911	0.865	0.759
26	43	34.5	0.400	0.9943	72.8	31.1	4.86	0.116	0.564	0.772	0.733	0.644
26	41	33.5	0.333	0.9946	74.0	30.3	4.96	0.095	0.471	0.709	0.673	0.591

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON
EN ESTADO ESTACIONARIO

PRUEBA (7)

L = 100 cm

Do = 2.664 cm

Dn = 1 "

Ao = 836.92 cm²

T(1) (°C)	T(2) (°C)	\bar{T} (°C)	\bar{V} (ml/s)	ρ (g/cm ³)	μ (10 ⁴) (g/cm-s)	β (10 ⁵) (°C ⁻¹)	Pr	Re	Pe	Gr · 10 ⁻⁶	Gr(L/D) 10 ⁻⁸	Gr(L/D) ^{3.5} 10 ⁻¹²
28	59	43.5	0.615	0.9906	61.0	41.0	4.00	0.318	1.272	8.723	3.274	2.827
28	57	42.5	0.579	0.9910	62.0	40.2	4.07	0.295	1.201	8.906	3.039	2.624
28	56	42.0	0.529	0.9912	62.4	39.8	4.10	0.267	1.095	7.823	2.936	2.535
28	54	41.0	0.428	0.9915	63.6	38.6	4.20	0.212	0.890	7.134	2.678	2.312
28	52	40.0	0.410	0.9920	64.5	37.6	4.30	0.201	0.864	6.598	2.477	2.138
28	50	39.0	0.312	0.9925	66.0	36.4	4.40	0.149	0.656	5.954	2.235	1.929
28	48	38.0	0.267	0.9929	67.6	35.1	4.50	0.125	0.563	5.337	2.003	1.730
28	46	37.0	0.171	0.9935	69.0	34.0	4.62	0.078	0.360	4.837	1.816	1.568
28	44	36.0	0.133	0.9939	70.5	32.9	4.72	0.060	0.283	4.366	1.639	1.415

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON
EN ESTADO ESTACIONARIO

PRUEBA (8)

L = 100 cm
Dn = 3/4 "

Do = 2.093 cm
Ao = 657.54 cm²

T(1) (°C)	T(2) (°C)	\bar{T} (°C)	\bar{V} (ml/s)	ρ (g/cm ³)	μ (10 ⁴) (g/cm-s)	β (10 ⁵) (°C ⁻¹)	Pr	Re	Pe	Gr 10 ⁻⁶	Gr(L/D) 10 ⁻⁸	Gr(L/D) ^{3.5} 10 ⁻¹²
28	60	44	0.667	0.9905	60.2	41.4	3.96	0.349	1.382	4.435	2.119	3.344
28	58	43	0.633	0.9908	61.3	40.7	4.04	0.326	1.317	4.112	1.965	3.010
28	56	42	0.545	0.9912	62.4	39.8	4.10	0.276	1.132	3.794	1.813	2.860
28	54	41	0.495	0.9915	63.6	38.6	4.20	0.426	1.033	3.460	1.653	2.608
28	52	40	0.449	0.9920	64.5	37.6	4.30	0.220	0.946	3.200	1.529	2.412
28	50	39	0.367	0.9925	66.0	36.4	4.40	0.176	0.774	2.887	1.379	2.176
28	49	38.5	0.310	0.9927	67.0	35.8	4.45	0.146	0.650	2.721	1.300	2.051
28	46	37	0.250	0.9935	69.0	34.0	4.62	0.115	0.531	2.346	1.121	1.769
28	44	36	0.182	0.9939	70.5	32.9	4.72	0.082	0.387	2.117	1.011	1.596

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON
EN ESTADO ESTACIONARIO

PRUEBA (9)

L = 100 cm
Dn = 1/2 "

Do = 1.580 cm
Ao = 496.37 cm²

T(1) (°C)	T(2) (°C)	\bar{T} (°C)	\bar{V} (ml/s)	ρ (g/cm ³)	$\mu(10^4)$ (g/cm·s)	$\beta(10^5)$ (°C ⁻¹)	Pr	Re	Pe	Gr 10 ⁻⁶	Gr(L/D) 10 ⁻⁸	Gr(L/D) ^{3.5} 10 ⁻¹²
28	60	44	0.711	0.9905	60.2	41.4	3.96	0.372	1.473	1.908	1.208	3.848
28	58	43	0.667	0.9908	61.3	40.7	4.04	0.343	1.386	1.769	1.120	3.568
28	56	42	0.581	0.9917	62.4	39.8	4.10	0.294	1.205	1.637	1.033	3.292
28	54	41	0.566	0.9915	63.6	38.6	4.20	0.281	1.180	1.488	0.942	3.001
28	52	40	0.500	0.9920	64.6	37.6	4.30	0.245	1.054	1.376	0.871	2.775
28	50	39	0.442	0.9250	66.0	36.4	4.40	0.212	0.933	1.242	0.786	2.505
28	48	38	0.367	0.9929	67.6	35.1	4.50	0.172	0.774	1.113	0.704	2.245
28	46	37	0.275	0.9935	69.0	34.0	4.62	0.126	0.582	1.009	0.639	2.035
28	44	36	0.217	0.9939	70.5	32.9	4.72	0.097	0.458	0.911	0.576	1.837

ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES

Con el análisis dimensional, ya encontradas las relaciones entre las variables físicas, que caracterizan el sistema de flujo en Termosifón, se realizaron una serie de gráficas para analizar los parámetros estudiados, dadas a conocer a continuación.

Se mostrarán solo gráficas de una sola longitud de 200 cm., que servirán - para demostrar el procedimiento seguido y para encontrar las ecuaciones de velocidad, además serán representativas de las demás longitudes de 150 y 100 cm.

Para tener noción de las relaciones entre \bar{V} vs T , \bar{V} vs \bar{T} y Re vs \bar{T} se construyeron las gráficas: 4-1, 4-2 y 4-3, encontrando que guardan una relación lineal, con diferente pendiente e intersección.

Tómándose como base para el análisis la siguiente relación:

$$Pe \text{ vs } Gr (L/D)^a \dots\dots\dots (4-1)$$

Manteniéndose una longitud constante y variando los diámetros de prueba, - se realizaron gráficas donde el exponente "a" se prueba a varias potencias (Ver fig. 4-4, 4-5, 4-6 y 4-7), encontrándose que además de guardar una relación lineal, se observa un acercamiento e igualdad en las pendientes, esto rebasa cuando se llega a la cuarta potencia, analizando las gráficas de la tercera y cuarta potencia (Fig. 4-6 y 4-7) se intuye que la linealidad se cumple, formando el exponente $a = 3.5$, comprobándose esto al graficarlo, (Ver fig. 4-8).

Realizándose las mismas observaciones y gráficas para las demás longitudes: 150 y 100 cm., se encuentran los mismos fenómenos y resultados de linealidad, - (Ver fig. 4-9 y 4-10).

De las gráficas: 4-8, 4-9 y 4-10 y la relación 4-1, se encuentra que la forma de las rectas graficadas es:

$$P_e = m Gr (L/D)^{3.5} + b \dots\dots\dots (4-2)$$

Donde "m" es la pendiente de la recta y "b" la intersección de ésta.

Las pendientes e intersecciones encontradas, fueron los siguientes:

FIG. (4-8)	FIG. (4-9)	FIG. (4-10)
L = 200 cm	L = 150 cm	L = 100 cm
b = -0.3800779	b = -0.390779	b = -0.377773
m = 9.486613 x 10 ⁻¹⁴	m = 1.142883 x 10 ⁻¹³	m = 5.238721 x 10 ⁻¹³
Corr. = 0.9819	Corr. = 0.9849	Corr. = 0.9612

El valor promedio de las pendientes e intersecciones encontradas son:

$$m_p = 2.443421 \times 10^{-13}$$

$$b_p = -0.383110$$

Como $P_e = R_e Pr$ y $R_e = \frac{V \rho D_o}{\mu}$, se despeja de aquí la velocidad del fluido "V", encontrándose así las ecuaciones de velocidad de flujo en Termosifón, - en estado estacionario, para cada longitud del tubo experimentado, quedando de la forma siguiente:

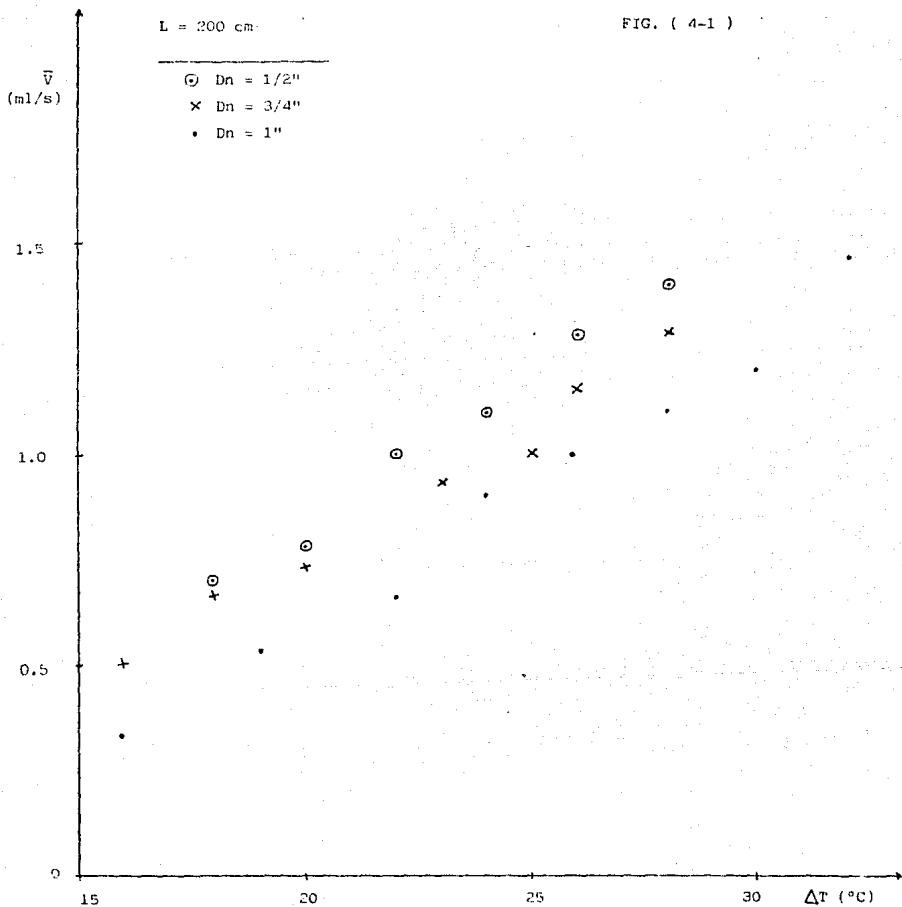
$$V = \left[m Gr (L/D)^{3.5} + b \right] \frac{\mu}{Pr D_o} \dots\dots\dots (4-3)$$

**GRAFICAS DE PARAMETROS ESTUDIADOS Y NUMEROS ADIMENSIONALES
ENCONTRADOS EN EL ANALISIS DIMENSIONAL**

ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON, EN
ESTADO ESTACIONARIO

L = 200 cm

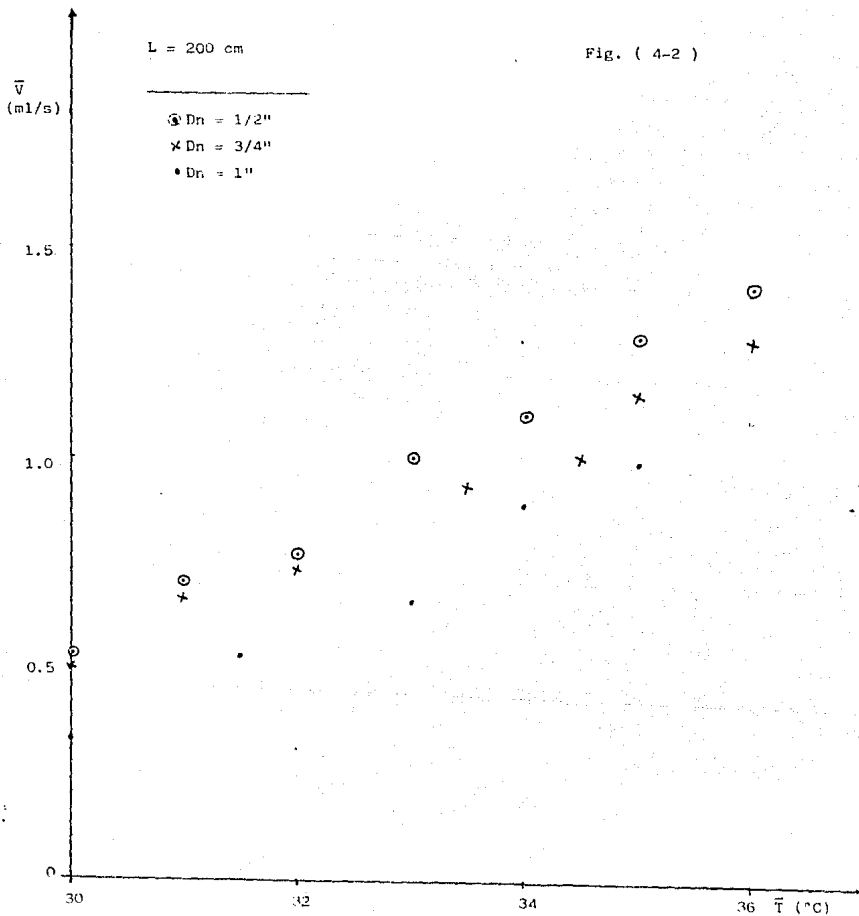
FIG. (4-1)



ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON,
EN ESTADO ESTACIONARIO

L = 200 cm

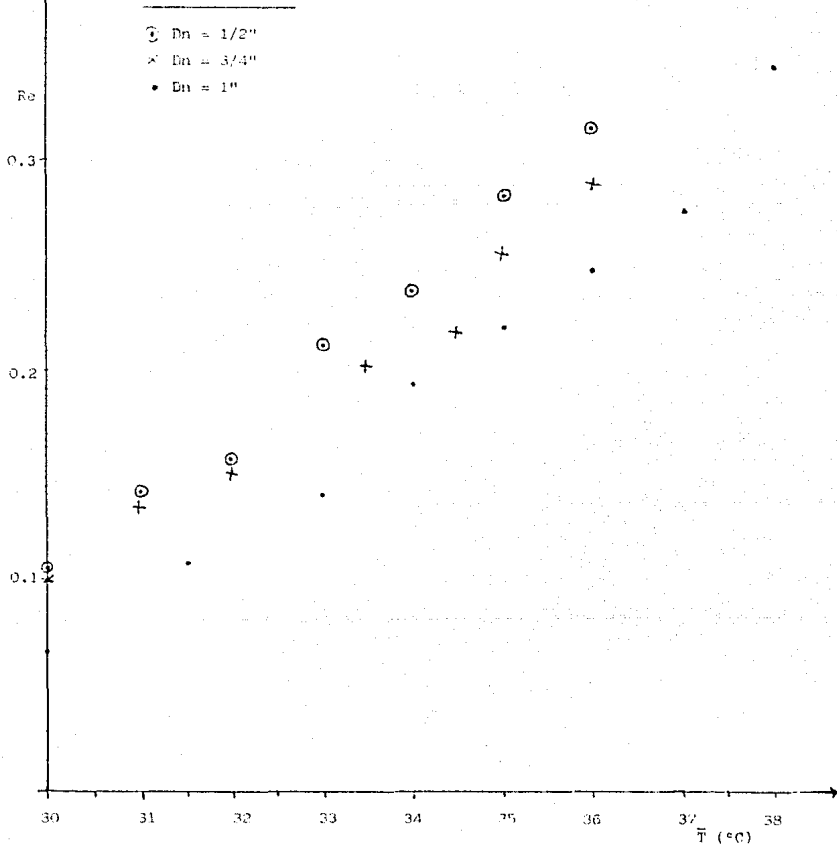
Fig. (4-2)



ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON,
ESTADO ESTACIONARIO

$L = 200$ cm

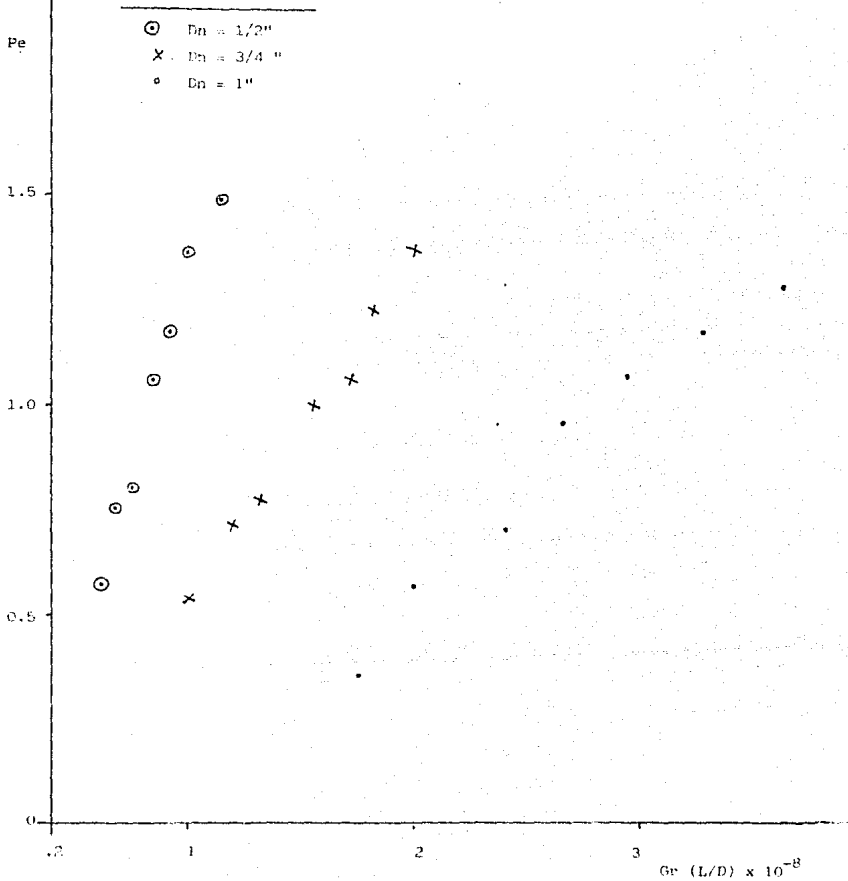
Fig. (4-3)



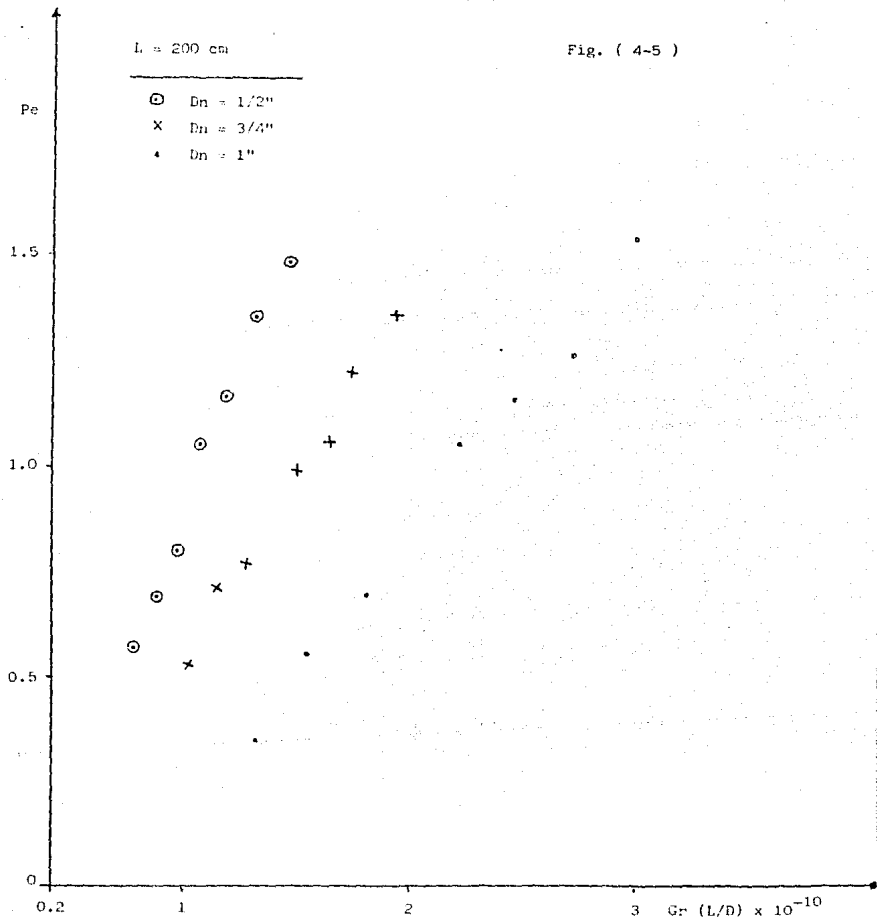
ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON,
EN ESTADO ESTACIONARIO

$L = 200 \text{ cm}$

Fig. (4-4)



ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON,
EN ESTADO ESTACIONARIO

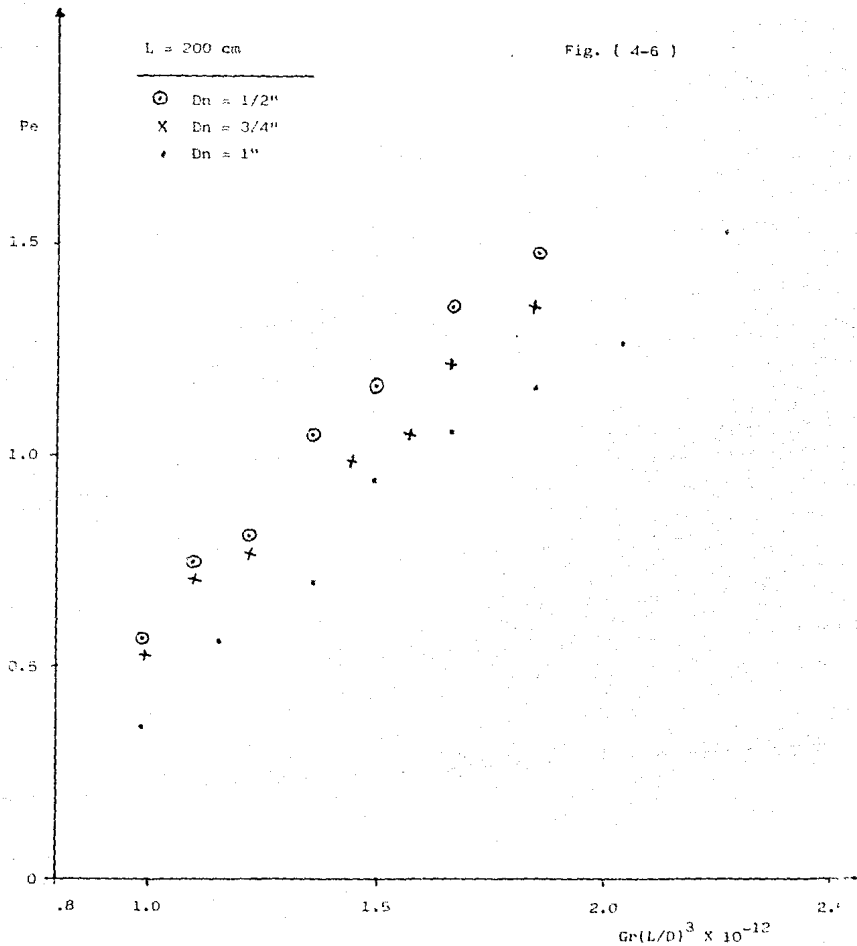


ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON,
EN ESTADO ESTACIONARIO

$L = 200 \text{ cm}$

Fig. (4-6)

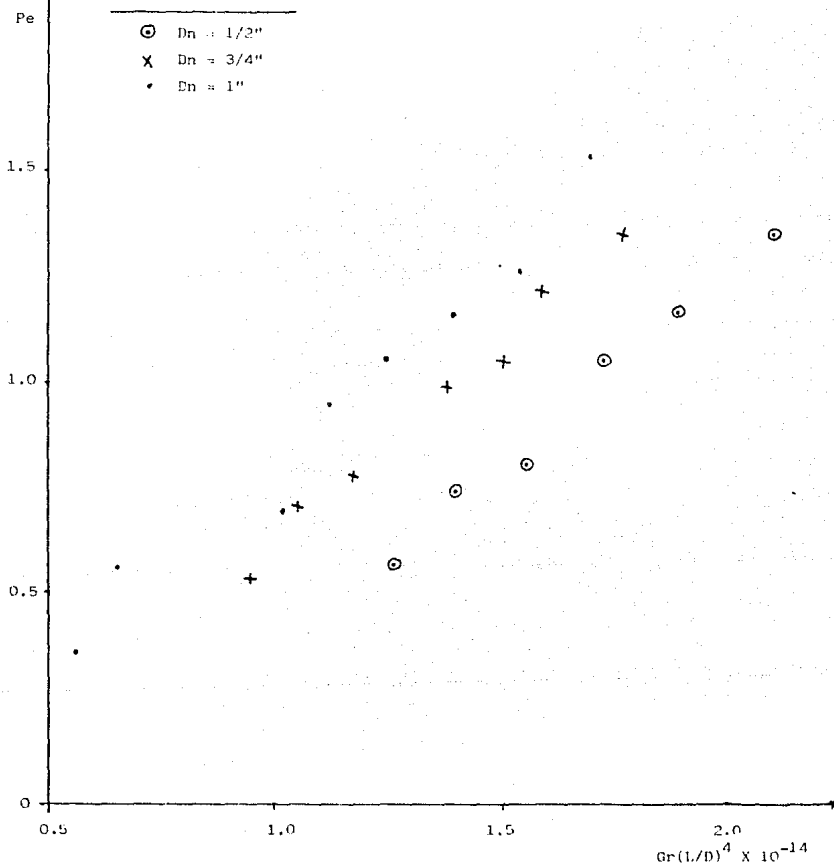
-
- ⊙ $D_n = 1/2''$
 - X $D_n = 3/4''$
 - $D_n = 1''$



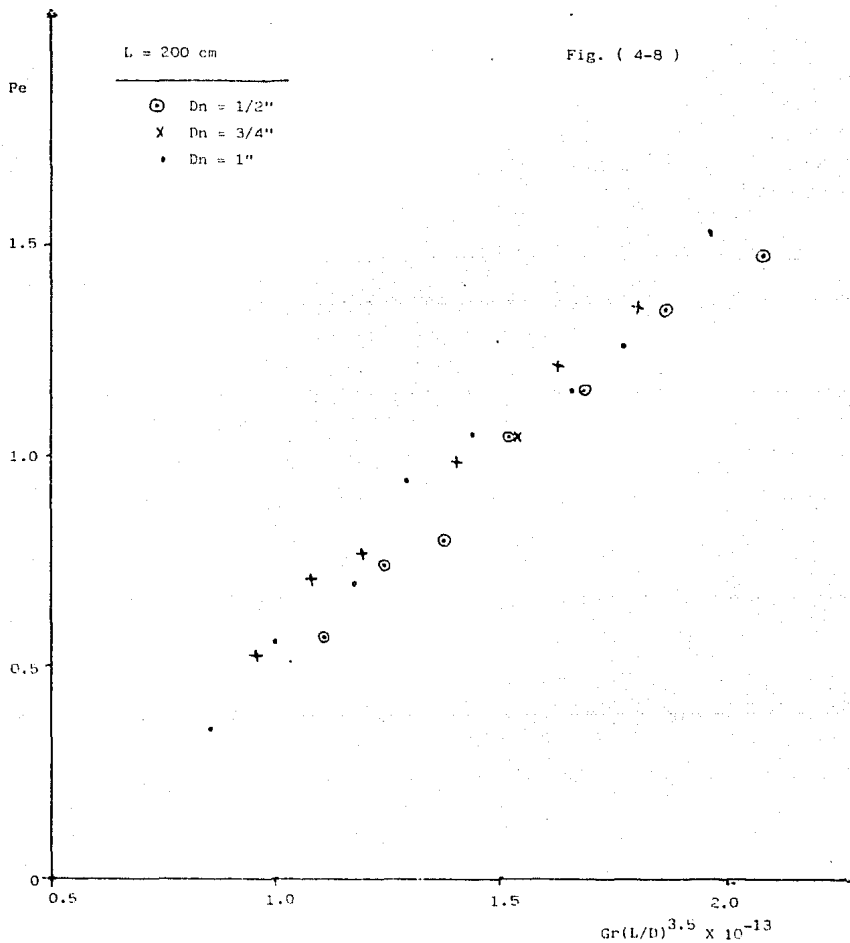
ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON,
EN ESTADO ESTACIONARIO

L = 200 cm

Fig. (4-7)



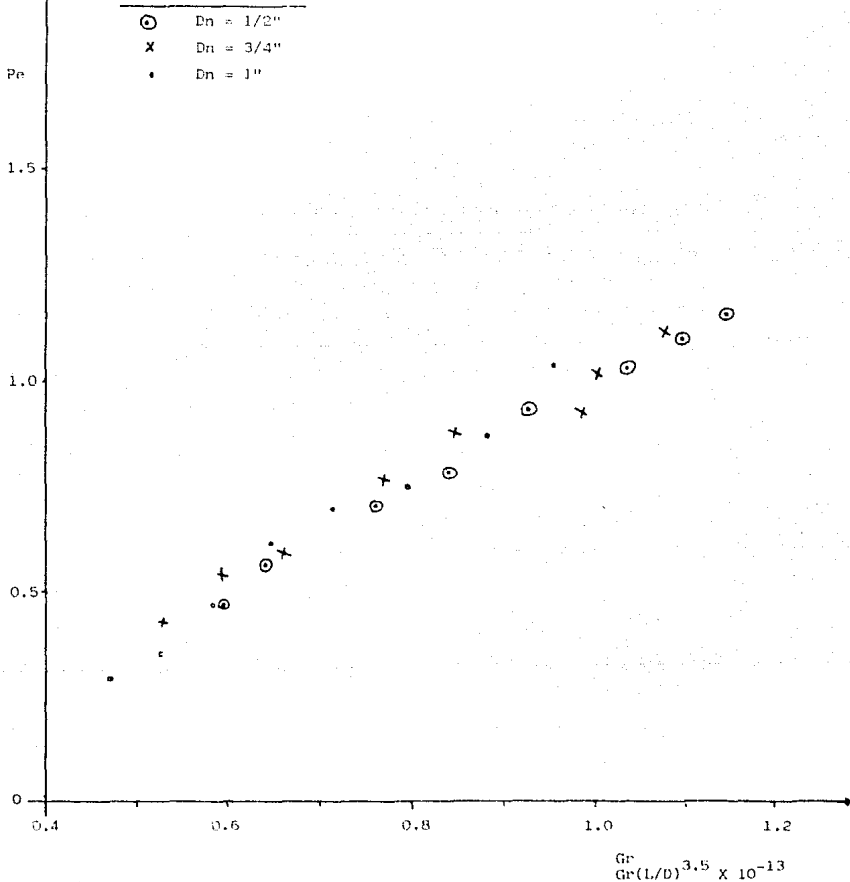
ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON,
EN ESTADO ESTACIONARIO



ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON,
EN ESTADO ESTACIONARIO

$l = 150 \text{ cm}$

Fig. (4-9)



ESTUDIO DE PARAMETROS EN EL FLUJO DE TERMOSIFON,
EN ESTADO ESTACIONARIO

$L = 100$ cm

Fig. (4-10)

Pe

- $D_n = 1/2''$
x $D_n = 3/4''$
• $D_n = 1''$

1.5

1.0

0.5

1

2

3

4

$Gr(L/D)^{3.5} \times 10^{-12}$

CONCLUSIONES

Después de haber realizado esta serie de pruebas y analizando matemáticamente los datos experimentales, podemos concluir lo siguiente:

La velocidad de un fluido en flujo por Termosifón, en estado estacionario, está dada por la siguiente ecuación:

$$V = \left[m \text{ Gr } (L/D)^{3.5} + b \right] \frac{\Delta T}{\text{Pr } D_0} \dots\dots\dots (4-3)$$

La cual fué comprobada en un Reynolds de: 0.06 a 0.40 y un gradiente de temperatura máxima de 38 °C.

Encontrándose las constantes ("m, b") para cada longitud, de los cuales los valores promedio ("Mp, bp") fueron:

$$\begin{aligned} M_p &= 2.443421 \times 10^{-13} \\ b_p &= -0.393110 \end{aligned}$$

En esta ecuación observamos que:

- a) Para una misma longitud, la velocidad del agua aumenta a menor diámetro.
- b) Para un mismo diámetro y diferentes longitudes, la velocidad del agua aumenta a menor longitud.
- c) Para cada longitud y para cada diámetro a mayor gradiente de temperatura, se obtiene mayor velocidad del agua.

Este trabajo indica el rumbo que debe seguirse para establecer las bases - de diseño de calentadores solares, en función del diámetro y la longitud de los tubos.

Ya que en la actualidad se carece de ecuaciones de diseño, sugerimos una - experimentación más amplia que permita corroborar y ajustar la ecuación que proponemos; y los resultados servirán para mejorar la fabricación de calentadores solares, así como de punto de partida para posteriores investigaciones en el - aprovechamiento de la energía solar y en el diseño de Termosifón.

B I B L I O G R A F I A

TRANSFERENCIA DE CALOR

J.P. Holman C.E.C.S.A.

Cuarta impresión Junio de 1980 (1)

MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO

Perry Robert H. - Chilton Cecil H.

Quinta edición (Español)

McGraw Hill de México Julio de 1982 (2)

INTRODUCCION TO HEAT TRANSFER

A.I. Brown y S.M. Marco

McGraw Hill - New York (3)

APPLIED SOLAR ENERGY AN INTRODUCTION

A.B. Meinel, M.P. Meinel

Addison - Wesley, Third printing, 1977 (4)

A P E N D I C E I

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

PROPIEDADES DEL AGUA (LIQ. SATURADO) +

T (°C)	Cp (Cal/g-°C)	ρ (g/cm ³)	μ (10 ³) (g/cm-s)	k (10 ³) (Cal/cm-s-°C)	Pr (Cp/k)	β (10 ⁵) (°C ⁻¹)
0.00	1.005	1.0000	17.90	1.352	13.36	
4.44	1.005	1.0000	15.50	1.372	11.35	4.12
10.00	1.002	0.9993	13.10	1.397	9.39	11.86
15.55	1.000	0.9987	11.20	1.422	7.88	17.60
21.11	0.998	0.9976	9.79	1.443	6.772	21.21
26.67	0.998	0.9960	8.60	1.465	5.849	24.78
32.20	0.997	0.9950	7.65	1.488	5.125	29.14
37.78	0.997	0.9937	6.82	1.505	4.519	35.18
43.33	0.997	0.9907	6.13	1.521	4.017	40.96
48.89	0.997	0.9889	5.62	1.538	3.644	44.25
54.44	0.998	0.9859	5.12	1.550	3.296	47.25
60.00	0.998	0.9835	4.71	1.563	3.008	50.43
65.55	0.999	0.9804	4.30	1.575	2.727	54.83
71.11	1.000	0.9774	4.01	1.587	2.526	60.02
76.67	1.001	0.9739	3.72	1.596	2.334	62.82
82.22	1.002	0.9703	3.47	1.608	2.162	65.59
87.78	1.003	0.9668	3.26	1.612	2.028	
93.33	1.004	0.9633	3.06	1.620	1.896	

(+) Bibliografía (3)

A P P E N D I C E I I

CALIBRACION DE LA TOBERA Y TERMISTOR

TOBERA:

Para medir el gasto volumétrico y la velocidad lineal del agua, se empleó una Tobera de vidrio para flujos pequeños, que consiste básicamente en una boquilla que se instala en la línea de flujo, para reducir gradualmente su sección desde el diámetro interno del tubo hasta un tramo recto de diámetro mínimo, que es la restricción de este elemento primario y se denomina "Garganta".

La calibración se llevó a cabo de la manera siguiente: Una vez fijada la Tobera y puesto el papel milimétrico para el registro de las lecturas, y usando como indicador una mezcla de Yodo-Tetracloruro de Carbono, inmisible en el agua y de mayor densidad, el cual permitió hacer las lecturas de caída de presión, se comienza la calibración abriendo gradualmente la válvula instalada a la salida de la Tobera y con el cronómetro y probeta graduada, se toman lecturas de los ml/s, para cada apertura de la válvula, construyéndose una gráfica de gasto contra caída de presión, la cual da una curva de la manera siguiente:

$$Q = b X^m$$

De donde:

- Q : GASTO VOLUMETRICO ml/s
- m : VALOR DE LA PENDIENTE
- b : VALOR DE LA INTERSECCION
- X : mm DE CAIDA DE PRESION

Resultando una ecuación:

$$Q = 0.583663 \times 10^{0.533606}$$

CALIBRACION DEL TERMISTOR

Para el registro de la temperatura a la salida del tubo de prueba, se usó un Termistor, ya que éste proporciona lecturas instantáneas de la resistencia - al paso de la corriente en el agua a cada temperatura, estas resistencias se - traducirán en temperatura por medio de la gráfica o la ecuación encontrada. El principio es que se basa el registro de la temperatura por Termistor, es que, a cada temperatura del agua, le corresponde una resistencia.

La calibración se hizo: Colocando el Termistor en un vaso de precipitado y calentándolo a baño María. El vaso puesto en una estufa eléctrica con regulador de temperatura, y para tener lecturas exactas de temperatura, se puso junto al Termistor un termómetro, se tomaron lecturas de la resistencia a cada temperatura, dando una curva de forma exponencial negativa al graficar resistencia - vs temperatura y la gráfica de $\ln R$ vs $1/\bar{T}$ da una recta de la forma:

$$\ln R = \frac{A}{\bar{T}} + B$$

Donde "A" es la pendiente de la curva y "B" es el punto de intersección. " \bar{T} " se encuentra en grados absolutos ($^{\circ}K$).

Resultando la siguiente ecuación:

$$A = 4154.0849 \quad ; \quad B = -2.11866$$

$$\bar{T} = \frac{A}{\ln R - B}$$