

65
2 ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**DISEÑO DE UNA PRACTICA PARA EL LABORATORIO DE
INGENIERIA QUIMICA SOBRE UN INTERCAMBIADOR DE
CALOR DE FLUJO CRUZADO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
MARIA GUADALUPE MARTINEZ ARGÜELLO



MEXICO, D. F.

1985



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA



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.

I N D I C E

1.	INTRODUCCION	1
2.	GENERALIDADES	3
2.1	Mecanismos de la transferencia de calor.	
2.2	Proceso de transferencia de calor	
2.3	Experiencia de Investigadores sobre flujo forzado.	
3.	PARTE EXPERIMENTAL	17
3.1	Descripción general del equipo.	
3.2	Técnica experimental.	
3.3	Secuencia de cálculo para la determinación del coeficiente de transferencia de calor.	
4.	RESULTADOS	30
4.1	Curvas de enfriamiento de algunas corridas realizadas como ejemplos.	
4.2	Datos de las curvas de enfriamientos de las corridas presentadas.	
4.3	Gráficas de Log ΔT contra t (seg) de las corridas presentadas.	
4.4	Tablas de resultados de todas las corridas realizadas.	
4.5	Gráficas del comportamiento del Nusselt contra Reynolds.	
5.	MANUAL DE PRACTICA	83
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
7.	BIBLIOGRAFICA	98

1. INTRODUCCION

La Facultad de Química; dentro de sus instalaciones cuenta con el laboratorio de Ingeniería Química; éste a su vez cuenta con un gran número de equipos, por ejemplo: molinos, secadores, torres de destilación, cambiadores de calor, etc. En los cuales se efectúan prácticas de laboratorio que se relacionan con algunas materias de la carrera de ingeniería química e inclusive de otras carreras de la Facultad.

Los profesores que laboran en el laboratorio de ingeniería química, pretenden que los alumnos tengan una mejor formación en la parte experimental de la carrera, por lo que se han hecho algunas modificaciones en equipos ya instalados y se han adquirido nuevos equipos para aumentar la disponibilidad de experimentos en éste laboratorio.

Las prácticas son efectuadas con el propósito de que los alumnos tengan un contacto directo con los equipos que posiblemente va encontrarse en la industria cuando ejerza su profesión, otro de los objetivos que se persigue, es que los conceptos vistos en teoría sean aplicados para una mejor comprensión de los fenómenos y un mejor aprendizaje, así como para que el alumno adquiera nuevas habilidades.

Los cambiadores de calor constituyen uno de los equipos más empleados en la industria, su nombre es empleado incluyendo a todos los equipos que son usados con el propósito de transferir calor de un fluido caliente a uno frío bajo una amplia gama de condiciones de temperatura y presión. Dentro de estos equipos se encuentran: enfriadores, calentadores de vapor, evaporadores, precalentadores, enfriadores a baja temperatura y condensadores; se excluyen los equipos calentados a fuego directo.

El presente trabajo se refiere a un equipo de reciente adquisición que aun no esta al servicio de los alumnos, nuestro propósito es el instalarlo, ponerlo en funcionamiento y poder realizar una práctica sobre transferencia de calor; éste equipo es un intercambiador de calor en flujo cruzado por convección forzada.

El equipo es realmente sencillo y permite manejar una serie de variables para determinar: el coeficiente de transferencia de calor, la velocidad del fluido , curvas de enfriamiento, entre otras, y presenta también la posibilidad de manejarlo con diferentes alternativas. Este trabajo se concreto al primer punto, - transferencia de calor por convección forzada. Dentro de la versatilidad del - equipo en este caso se usó un elemento de cobre que al calentarlo fungiera como fluido caliente, la coraza del intercambiador esta constituida por varillas de plástico; a esta área se le denomina sección-trabajo. La convección forzada sera por medio de un ventilador cuya corriente será perpendicular al banco de varillas plásticas.

El coeficiente de transferencia de calor podrá obtenerse a partir de las curvas de enfriamiento, en las condiciones especificadas; convección forzada-flujo cruzado.

2.- GENERALIDADES

A lo largo de su historia la humanidad se a preocupado por los problemas de la alimentación, la salud y la generación de potencia. El progreso realizado en estas áreas ha llevado al desarrollo concomitante de la transferencia de calor como una ciencia, por lo cual un conocimiento de esta disciplina de transporte es de suma importancia para el ingeniero.

La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor. Si se vaporiza un Kg de agua ó se condensa un Kg de vapor, el cambio de energía en los dos procesos es idéntico. La velocidad a la que cualquiera de estos procesos pueda hacerse progresar con una fuente ó receptor, es independiente, pero diferente en cada caso; generalmente la vaporización es un fenómeno mucho más rápido que la condensación.

En el campo de la utilización de los combustibles fósiles se requiere un análisis de transferencia de calor en presencia de reacción química para mejorar la eficiencia de combustión en hornos y calderas.

Casi todos los alimentos en el curso de su preservación y preparación requieren tratamientos en los cuales también la transferencia de calor juega un papel importante. Dadas las condiciones adversas en algunas regiones agrícolas del mundo, se pierden grandes cantidades de grano por la falta de secado después de la cosecha, por ello el uso de la energía solar u otros mecanismos apropiados de secado podrían ser ventajosos.

El diseño moderno de estructuras y edificios exige cada vez más un análisis de transferencia de calor con el fin de eliminar en lo posible los daños causados por un incendio.

Mientras aparecen ideas cada vez más y más sofisticadas en la tecnología moderna, la teoría de transferencia de calor debe resolver problemas nuevos y cada vez más complejos.

Aun cuando la termodinámica predice el intercambio de calor en un sistema al realizar un proceso, esta es incapaz de predecir el tipo de mecanismo mediante el cual se lleva a cabo esta transferencia de calor. La aplicación de la primera y segunda leyes de la termodinámica en un intercambiador de calor proporcionará la información necesaria con respecto al flujo frío. Empero la termodinámica no suministra información con respecto al diámetro, longitud, material o arreglo geométrico de los tubos que deben emplearse. Estas características de diseño se obtienen mediante un análisis detallado de transferencia de calor.

De lo anterior se desprende que la termodinámica y la transferencia de calor son dos ciencias afines que se complementan entre sí. Mientras que la primera predice los requisitos de transferencia de calor en un sistema, la segunda predice el cómo está transferencia se lleva acabo.

2.1 Mecanismos de la transferencia de calor:

Existen tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente - al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos ó tres. Estas son: Conducción, Convección y Radiación:

Conducción:

El fenómeno de transferencia de calor por conducción es un proceso de propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso, mediante comunicación molecular directa o entre cuerpos a diferentes temperaturas. En el caso de líquidos y gases esta transferencia es importante mientras se tome la precaución debida para eliminar las corrientes naturales de flujo que pueden presentarse como consecuencia de las diferencias en densidad que experimentan éstos. De aquí que la transferencia de calor por conducción es de particular importancia en sólidos sujetos a una diferencia de temperatura.

Por ejemplo si tenemos una pared estacionaria como se muestra en la figura 1:

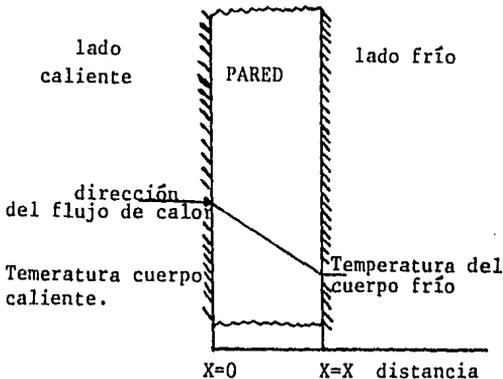


Figura 1.

La dirección del flujo de calor será en dirección perpendicular a la pared, - si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. Si a lado izquierdo de la pared se tienen una fuente de calor y que en la superficie derecha existe un receptor de calor. Tendremos que el flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y al área de la pared A . Si T es la temperatura en cualquier punto de la pared y X es

el grueso de esta en dirección del flujo de calor, la cantidad de calor esta dada por:

$$dq = KA (-dT/dX) \quad J/S \quad \dots(1)$$

donde $-dT/dX$ es el gradiente de temperatura y tiene signo negativo si se supone una temperatura mayor en la cara de la pared en donde $X=0$ y menor en la cara donde $X=X$, en otras palabras, la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura dT que impulsa el calor a través de la pared de espesor dX . La constante de proporcionalidad K es peculiar a la conducción de calor por conductividad y se le conoce por conductividad térmica, y se evalúa experimentalmente.

Convección:

Este fenómeno es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido ó gas) y está íntimamente relacionado con el movimiento de éste. Si consideramos una placa cuya superficie se mantiene a una temperatura T_s como se muestra en la figura 2, la cual disipa el calor hacia un fluido cuya temperatura tiene T_∞ .

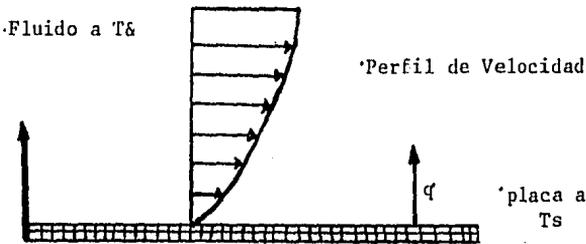


Figura 2.

La experiencia indica que cuando se le hace pasar aire proveniente de un ventilador al sistema este disipa más calor que cuando esta expuesto al aire ambiente, deduciéndose que la velocidad del fluido tiene un efecto importante sobre la transferencia de calor a lo largo de la superficie. También el flujo de calor es diferente si la placa se enfría en agua ó aceite en vez de aire. Por lo que las propiedades del fluido deben tener un efecto importante sobre la transferencia de calor.

La velocidad relativa del del fluido con respecto a la placa es en general idénticamente igual a cero en la interfase sólido-fluido ($Y=0$), el calor se transfiere por conducción solamente en este plano del fluido.

Para este caso el gradiente de temperatura en el fluido depende de las características a menudo complejas del flujo de éste, por lo que es conveniente calcular el flujo de calor disipado por el sistema en términos de la diferencia total de temperaturas entre la superficie de éste y el fluido.

$$q = hA (T_s - T_f) \quad \dots(2)$$

donde h es el coeficiente de transferencia de calor ó coeficiente de película.

La ecuación anterior se conoce como ley de Newton de enfriamiento.

El fenómeno de transferencia de calor por convección usualmente se clasifica en dos, estos son:

Convección forzada:

En este caso el fluido se hace pasar sobre el sistema mediante la acción de algún agente externo, como un ventilador, una bomba ó agentes meteorológicos. Un ejemplo de este caso sería el radiador en el sistema de enfriamiento de un motor de automóvil u otro intercambiador de calor.

Convección libre ó natural:

En este caso el movimiento del fluido resulta como una consecuencia de los gradientes en densidad que experimenta este, al estar en contacto con una superficie a mayor temperatura y en presencia de un campo gravitacional (ó centrífugo). Por ejemplo el calentamiento de agua en un recipiente antes de sufrir ebullición ó el enfriamiento de equipo eléctrico (transformadores, transistores, etc.).

Aunque la ecuación (2) su apariencia sea sencilla, el proceso de transferencia de calor por convección es muy complejo, haciendo que el coeficiente h dependa de muchos factores, como por ejemplo: de la geometría del sistema, propiedades físicas y características del flujo de fluido.

Radiación:

Los mecanismos de transferencia de calor por conducción como por convección -- requieren un medio para la propagación de la energía. Sin embargo, el calor puede también propagarse aún en el vacío absoluto mediante radiación. Puede decirse que a una temperatura dada, todos los cuerpos emiten radiación en forma de energía electromagnética en diferentes longitudes de onda, siendo la radiación dependiente de la temperatura absoluta del cuerpo y de sus características superficiales, sólo las fracciones que se encuentre en el intervalo de longitud de onda de 0.1 a 100 micrones, se considera como radiación térmica. En este intervalo del espectro se localiza el espectro ultravioleta, el visible e infrarojo.

Basándose en la segunda ley de la termodinámica Boltzman estableció que la velocidad de transferencia de calor por radiación es:

$$dq = \sigma \epsilon A T^4 \quad \dots(3)$$

Esta ecuación es conocida como la ley de la cuarta potencia; donde:

T es la temperatura absoluta

E es un factor peculiar a la radiación y se llama emisividad

σ es una constante dimensional.

La emisividad, igual que la conductividad térmica K ó el coeficiente de transferencia de calor h , debe determinarse experimentalmente.

Aunque se han discutido por separado los tres principales mecanismos de transferencia de calor, en la mayoría de las aplicaciones de interés para los ingenieros, éstos ocurren en forma simultánea. Sin embargo, en estas aplicaciones también puede suceder que uno ó más de ellos sean prácticamente insignificante con respecto a los demás.

2.2 Proceso de transferencia de calor.

Se ha descrito a la transferencia de calor como el estudio de las velocidades a las cuales el calor se intercambia entre fuentes de calor y receptores, tratándose usualmente de manera independiente. Los procesos de transferencia de calor se relacionan con las razones de intercambio térmico tales como los que ocurren en equipo de transferencia de calor, tanto en ingeniería mecánica como en los procesos químicos este enfoque realza la importancia de las diferencias de temperatura entre la fuente y el receptor, lo que es, después de todo, el potencial por el que se lleva a cabo la transferencia. Un problema típico de proceso de transferencia de calor involucra las cantidades de calor que deben transferirse, las razones a las cuales pueden transferirse debido a la naturaleza de los cuerpos, la diferencia de potencial, la extensión y arreglo de las superficies que separan la fuente y el receptor y la cantidad de energía mecánica que debe disiparse para facilitar la transferencia de calor. Puesto que la transferencia de calor considera un intercambio en un sistema, la pérdida de calor por un cuerpo deberá ser igual al calor absorbido por otro dentro de los confines del mismo sistema.

2.3 Experiencias de investigadores sobre flujo forzado.

Algunos investigadores han trabajado con anterioridad en experimentos relacionados con el paso de fluidos con elementos de calentamiento diversos como el caso de cilindros que es el nuestro, también esferas, alambres, etc., algunos de sus resultados pueden observarse en los ejemplos siguientes:

Caso 1.- Flujo forzado normal a un cilindro único:

Mecanismo; La figura 3, muestra una fotografía tomada por Ray²⁴ en el caso de

aire fluyendo de izquierda a derecha normal a un cilindro caliente (calentado - interiormente) en posición horizontal. A causa del cambio que sufre el índice de refracción con la temperatura, el aire caliente aparece más brillante que el - aire frío.

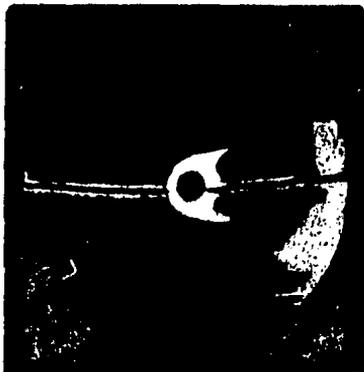


Figura 3.

Los experimentos realizados en condiciones isotérmicas han arrojado luz sobre la naturaleza del flujo, de fluido, transversales a elementos cilíndricos. La figura 4, tomada por Rubach²⁶ muestra las condiciones en el instante en que los remolinos al otro lado del cilindro están aumentando de tamaño. A veces estos vórtices crecen demasiado, protegidos por el cilindro, y son arrastrados en el sentido de la corriente. Prandtl²³ ha dado a conocer fotografías análogas en diversos trabajos. Reiher²⁵ y Lohrisch¹⁷ han publicado fotografías de ((humo)) en corrientes de aire fluyendo isotérmicamente, transversalmente a elementos de diversas formas.

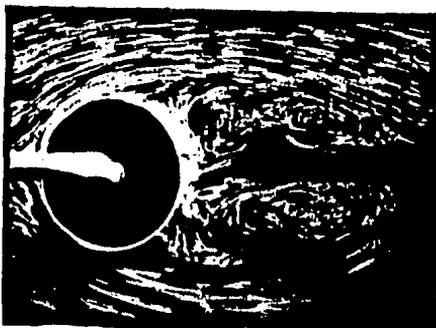


Figura 4.

Los elementos se recubrieron con papel de filtro mojado con una solución acuosa de ácido clorhídrico, produciéndose el humo por la reacción del vapor de amoníaco de la corriente de aire con el ácido clorhídrico evaporado de la superficie mojada.

Las fotografías mostraron las condiciones del flujo de aire en las zonas muy proximas al elemento. La figura 5, muestra los remolinos en la parte posterior del cilindro.



Figura 5.

La figura 6, presenta fotografías del flujo isotérmico de agua transversal a un elemento cilíndrico situado en un canal de vidrio cerrado.



Figura 6.

El tipo de flujo se hace visible gracias a la adición de una pequeña cantidad de bentonita especialmente preparada en solución coloidal, tomando la fotografía entre dos placas de polarización cruzadas que transmitían la luz. poniendo de manifiesto la variación de la doble refracción con el gradiente de velocidad en la suspensión.

Coefficientes locales. De la discusión anterior sobre el mecanismo de la transferencia de calor en el caso de fluidos moviéndose perpendicularmente a tubos, y de la naturaleza del flujo del fluido sobre tales superficies, puede inferirse que el coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y la tubería no -

será uniforme alrededor del perímetro de la misma. Drew y Ryan⁴ han realizado - medidas de la variación de la velocidad local del flujo calorífico hacia al aire en distintos puntos alrededor de una tubería calentada por vapor, encontrando - resultados similares a los que se basan en el trabajo de Lohrisch¹⁷ para absorción. Los resultados de un experimento de Paltz y Starr²¹ se muestran en la figura 7, con velocidades locales del flujo calorífico representadas radialmente en diversas posiciones alrededor de un cilindro único calentado por vapor.

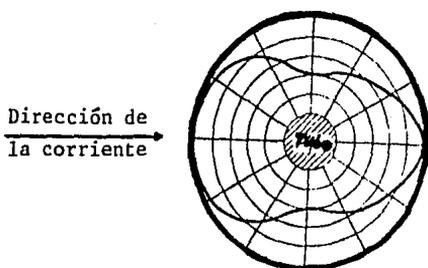


Figura 7.

La curva representa la distribución real del flujo calorífico, observándose que la velocidad local máxima del flujo de calor se lleva acabo en el frente y parte posterior y la velocidad mínima, aproximadamente el 40 por 100 de la máxima, se encuentra localizada en los lados.

Caso 2.- Flujo de aire normal a cuerpos únicos:

Correlación de los datos en el caso de cilindro único. Un cierto número de - experimentadores*, han medido coeficientes de transferencia calorífica a lo largo de perímetros medios para flujo de aire normal a un cilindro calentado eléctricamente o con vapor.

Los intervalos cubiertos por las condiciones experimentales se resúmen en la tabla T-1. Como los números de Prandtl para el aire varían poco, solo es necesario considerar dos grupos adimensionales, el Nusselt $h_m D_o / K_f$, y el de Reynolds $D_o G / \mu_f$.

*Referencias: 6, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 18.

Tabla T-1. Intervalos de los datos para aire fluyendo normalmente a un cilindro único.

Diámetro, cm 0.001 - 15
 Velocidad de aire, m/s 0.19
 Temperatura del aire °C 15 - 260
 Temperatura del cilindro °C 21 - 1000
 Presión, atm. 0.4 - 4
 Reynolds, unidades acorde 0.2 - 235000
 Nusselt, unidades acorde 0.5 - 500

Los datos de Hilpert⁹ cubren el intervalo de diámetro mayor de 0.02 a 15 cm, y se ajustan bien a la curva recomendada que se muestra en la figura 8 y establece el Nusselt como función de el Reynolds. Todos los datos experimentales se correlacionan mediante una ecuación de la forma :

$$\frac{h_m D_o}{K_f} = B (D_o G / \mu_f)^n \tag{1a}$$

donde:

h_m = es el coeficiente de transferencia calorífico medio ó promedio.

D_o = es el diámetro exterior del elemento.

K_f = es la conductividad térmica del fluido.

G = es el flujo masico del fluido.

μ_f = es la viscosidad del fluido.

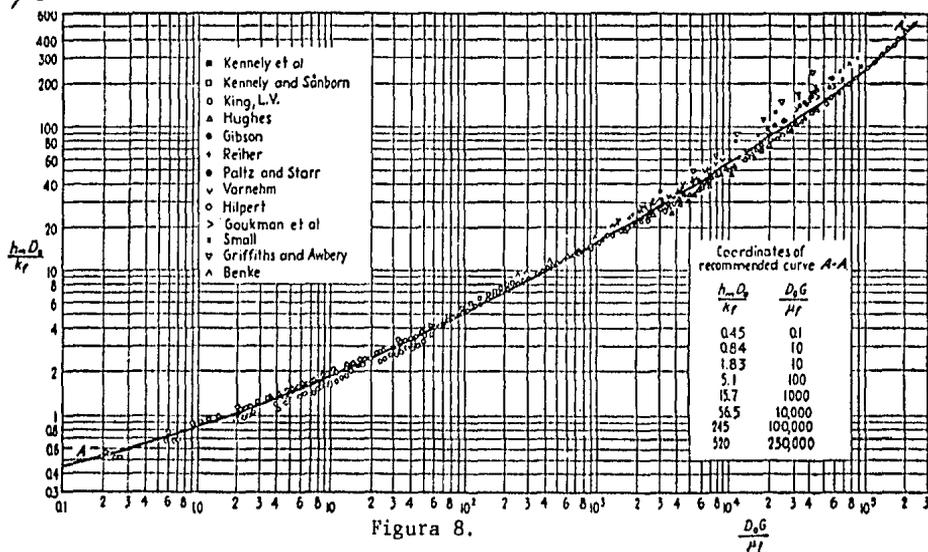


Figura 8.

Como se muestra en la tabla T-2, al aumentar el valor del número de Reynolds, aumenta el exponente n y disminuye el coeficiente B .

Tabla T-2. Valores de n y B de la ecuación (1a).

$D_o G / \mu_f$	n	B	$h_m D_o / K_f$	Ec. N°.
1 - 4	0.330	0.8910	0.891 - 1.42	1a*
4 - 40	0.385	0.8210	1.40 - 3.40	1a**
40 - 4000	0.466	0.6150	3.43 - 29.6	1a***
4000 - 40000	0.618	0.1740	29.5 - 121	1a****
40000 - 250000	0.805	0.0239	121 - 528	1a*****

Para intervalos del número de Reynolds mayores que el de cualquier línea horizontal de la tabla T-2, puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$\frac{h_m D_o}{K_f} = B_1 + B_2 (D_o G / \mu_f)^m \quad (2a)$$

donde los coeficientes B_1 , B_2 y el exponente m , son adimensionales, se dan sus valores en la tabla T-3.

Tabla T-3. Valores de m , B_1 , B_2 de la ecuación (2a)

$D_o G / \mu_f$	m	B_1	B_2	Ec. N°.
0.1 - 1000	0.52	0.32	0.43	2a*
1000 - 50000	0.60	0	0.24	2a**

Al determinar los coeficientes de transferencia calorífica a lo largo de un perímetro medio, es conveniente la generación interna del calor eléctricamente en hilos de pequeños diámetros, ya que en cualquier caso, la variación de temperatura con la circunferencia es despreciable. Si el calor se transfiere hacia o desde el aire mediante un líquido que cambia apreciablemente de temperatura al fluir a través de los tubos, las variaciones sustanciales del coeficiente de transferencia puntual h_x , sobre el lado del aire producen variaciones apreciables en la temperatura de la pared del tubo al variar la circunferencia considerada, complicando así la interpretación de los resultados. Esta misma complicación puede haberse presentado en los resultados de Reihner²⁵ y de otros experimentos.

tadores que enfriaban gases fluyendo normalmente a tubos enfriados por un líquido. Si la influencia de la conducción circunferencial es convenientemente determinada²⁷, se llega a la variación normal de h_x puntual, con el perímetro, procediendo de otra forma se obtiene una información errónea.

Maisel y Sherwood¹⁹ encontraron que sus datos experimentales referentes a la evaporación de diversos líquidos en varios gases, a partir de la superficie porosa mojada de un cilindro colocado en la corriente transversal del gas, concordaban con los resultados experimentales de transferencia calorífica desde cilindros únicos secos.

Ecuación simplificada. La ecuación siguiente simplificada para el aire se aplica para una temperatura peculiar de 93°C y un Reynolds entre 1,000 a 50,000.

$$h_m = 0.129 C_p G_o^{0.6} / D_o^{0.4} \quad (3a)$$

Caso 3.- Efecto de la turbulencia. El efecto de un aumento en la turbulencia del aire aumentando el coeficiente de transferencia calorífica ha sido estudiado por Reiher, que obtuvo un incremento del 50 % en h_x al pasar previamente el aire a través de una rejilla con el fin de aumentar su turbulencia antes de pasar sobre una tubería única.

Para un número de Reynolds de 5,800, Comings y sus colaboradores² encontraron que el Nusselt aumentaba en un 31 % al incrementar la turbulencia desde el 2 al 26 %. Para un número de Reynolds de 4,900, Maisel y Sherwood²⁰ obtuvieron un incremento del 32 % en la transferencia de masa equivalente de el Nusselt, al aumentar la intensidad de la turbulencia desde el 4 al 24 por 100, para un Reynolds de 10,000, el aumento fue del 50 %. Se han encontrado efectos analogos en caso de esferas.

Caso 4.- Flujo a través de haces de tubos:

El caso de flujo perpendicular a haces de tubos sin pantallas deflectoras tiene considerable importancia, especialmente en calentadores de aire y cambiadores de calor. La figura 9 y 10 muestran las fotografías de un flujo de aire a 1.5 m/s de velocidad a través de un haz de tubos de 1.7 cm de diámetro, para tubos colocados ((al tresbolillo)) en la figura 9 y ((en filas alineadas)) en la figura 10. Para la misma velocidad de la corriente de aire, Reiher²⁵ encontró que la ordenación de tubos al tresbolillo, análoga a la fig. 9, dio coeficientes de transferencia calorífica sustancialmente más altos que en el caso de filas alineadas, similar al haz de la fig. 10.

Gases: En 1942 se disponía de muchos datos experimentales referentes a flujo

de aire perpendicularmente a haces de tubos. Como el Prandtl era constante, los datos se correlacionaron normalmente por una ecuación del tipo usado en el caso de flujo de aire perpendicularmente a tubos únicos:

$$\frac{h_m D_o}{K_f} = b_2 (D_o G_{\max} / \mu_f)^n \quad (4a)$$

donde G_{\max} , flujo masico máximo se calcula para el área libre mínima disponible para la corriente fluida, independientemente de si esta área mínima se presenta en las aberturas transversales o diagonales. Basándose en datos disponibles en 1933, Colburn¹ recomendó, para el caso de flujo de gases perpendicularmente a haces de tubos escaqueados, sin pantallas deflectoras y para un Reynolds entre 2,000 y 32,000, la siguiente ecuación adimensional:

$$\frac{h_m D_o}{K_f} = 0.33 (C_p / K)_f^{1/3} (D_o G_{\max} / \mu_f)^{0.6} \quad (5a)$$

Para aire, ésta se reduce a la Ec. (4a) con b_2 . Para haces de tubos en filas alineadas (no escaqueadas), Colburn¹ sugirió reducir el valor de la constante de la Ec. (5a) de 0.33 a 0.26.



Figura 9.



Figura 10.

Tucker²⁸ determinó los coeficientes de transferencia de calor hacia el aire en corriente perpendicular a un solo tubo de 2.54 cm colocado verticalmente en el centro de la tercera, fila de un haz de tubos no calentados y colocados al - tresbolillo, con 5 filas en profundidad. En cada una de las 15 ordenaciones utilizadas, la secciones rectas de los tubos ocupaban los vértices de triángulos -

isóceles. Se emplearon tres relaciones de espaciado longitudinal a transversal: S_L/S_T igual a 0.5, 3, 1, y 1.5. Con cada uno de éstos se utilizaron espaciados transversales iguales 1.25, 1.5, 2, 3 y 4 veces el diámetro de los tubos. Se encontró que los cambios de consideración en el espaciado transversal y longitudinal tenían una influencia despreciable sobre h_3 , para una unidad másica dada a través de la sección libre mínima, que en todos los casos imponía un espaciado transversal S_T-D_0 . Los datos se representan gráficamente en la figura 11 y se correlacionaron mediante la Ec. (4a), con $b_2 = 0.30$ y $n = 0.6$, con una desviación media de $\pm 5\%$.

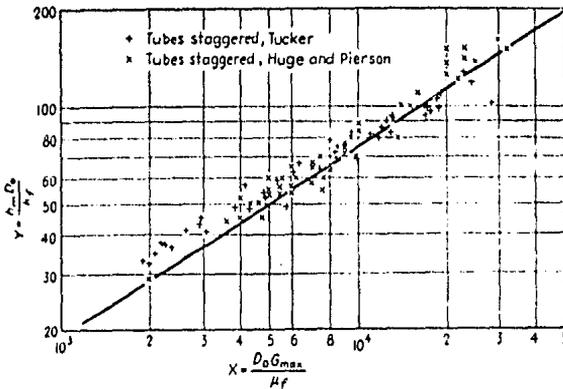


Figura 11. Datos experimentales del calentamiento de aire, comparados con la Ec. (4a) ($b_2 = 0.30$).

La tabla T-4 muestra valores de b_2 y n obtenidos por Grimison⁷ a partir de los datos de Huger⁹ y de Pierson²² para haces de 10 filas en profundidad y valores de Reynolds de 2,000 a 40,000. Los datos experimentales para el caso de flujo de aire a través de haces de tubos escaqueados indican que los coeficientes de transferencia de calor son algo altos que el caso de tubo único, a igualdad de tamaño de tubos y velocidad de la corriente de aire.

Tabla T-4. Valores de Gremison para b_2 y n en la Ec. (4a)

$X_L = \frac{S_L}{D_0}$	$X_T = 1.25$		$X_T = 1.5$		$X_T = 2$		$X_T = 3$	
	b_2	n	b_2	n	b_2	n	b_2	n
Escaqueados:								
0,600	.....	.....	.....	.....	.....	.....	0,213	0,636
0,900	.....	.....	.....	.....	0,446	0,571	0,401	0,581
1,000	.....	.....	0,497	0,558				
1,125	.....	.....	.....	.....	0,478	0,565	0,518	0,560
1,250	0,518	0,556	0,505	0,554	0,519	0,556	0,522	0,562
1,500	0,451	0,568	0,460	0,562	0,452	0,568	0,488	0,568
2,000	0,404	0,572	0,416	0,568	0,482	0,556	0,449	0,570
3,000	0,310	0,592	0,356	0,580	0,440	0,562	0,421	0,574
En línea:								
1,250	0,348	0,592	0,275	0,608	0,100	0,704	0,063	0,752
1,500	0,367	0,586	0,250	0,620	0,101	0,702	0,067	0,744
2,000	0,418	0,570	0,299	0,602	0,229	0,632	0,198	0,648
3,000	0,290	0,601	0,357	0,584	0,374	0,581	0,286	0,608

$$X_L = S_L / D_0, \quad X_T = S_T / D_0.$$

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Descripción general del equipo:

El aparato está diseñado para estudiar el fenómeno de transferencia de calor, asociado con el paso de aire en los tubos cilíndricos arreglados en forma separada o en bancos de varias configuraciones.

Esencialmente está constituido por una sección-trabajo en la parte central como se muestra en la figura 12, que tiene 18 espacios distribuidos en 4 columnas por la cual se pasa aire que es suministrado por un ventilador. Se cuenta con varillas cilíndricas de material plástico (que forman el banco de tubos) colocadas en la sección-trabajo en posición perpendicular a la dirección del flujo simulando así un intercambiador de calor típico de flujo cruzado.

Uno de los espacios, disponibles dentro de la sección-trabajo para varillas será ocupado por un elemento cilíndrico de cobre puro de 10 cm de longitud; cuando haya sido calentado, su temperatura se registrará por un termopar instalado en el centro del mismo.

El elemento se calienta con una resistencia eléctrica cilíndrica que se encuentra en la parte inferior de la sección-trabajo pero separada de esta; a la resistencia se suministra corriente de bajo voltaje (120 volts) desde un rectificador llevando la temperatura del elemento hasta un máximo de 80°C.

Se tiene un graficador de temperatura contra tiempo en el cual se trazarán las curvas de enfriamiento que se obtengan en cada experimentación,

El potenciómetro registrará la diferencia de temperatura entre la junta caliente empotrada en el elemento de cobre y la junta fría en la corriente de aire a la entrada de la sección-trabajo. La temperatura inicial del aire es indicada por un termómetro de mercurio (de vidrio) a la entrada del aire.

El aparato incluye un ventilador centrífugo accionado por un motor eléctrico de 1 HP de tiro inducido y que tiene su entrada conectada a la sección-trabajo, El aire entra al aparato por una boca tipo campana, pasando por una zona de transición a la sección-trabajo y después a la entrada del ventilador pasando por un panel para uniformizar el flujo evitando la transmisión de remolinos - del escape del ventilador hacia la sección-trabajo. El ventilador descarga a una válvula graduada de compuerta por medio de la cual se deberá regular la - velocidad del aire a través del aparato.

Se dispone de un tubo "pitot" para explorar el flujo de aire de la corriente arriba del banco de tubos y que debe colocarse en dirección perpendicular tanto al flujo de aire como a los ejes del elemento. El tubo "pitot" puede localizarse a todo lo ancho de la sección de trabajo para investigar el perfil de velocidad en la sección, en el momento deseado.

ESQUEMA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

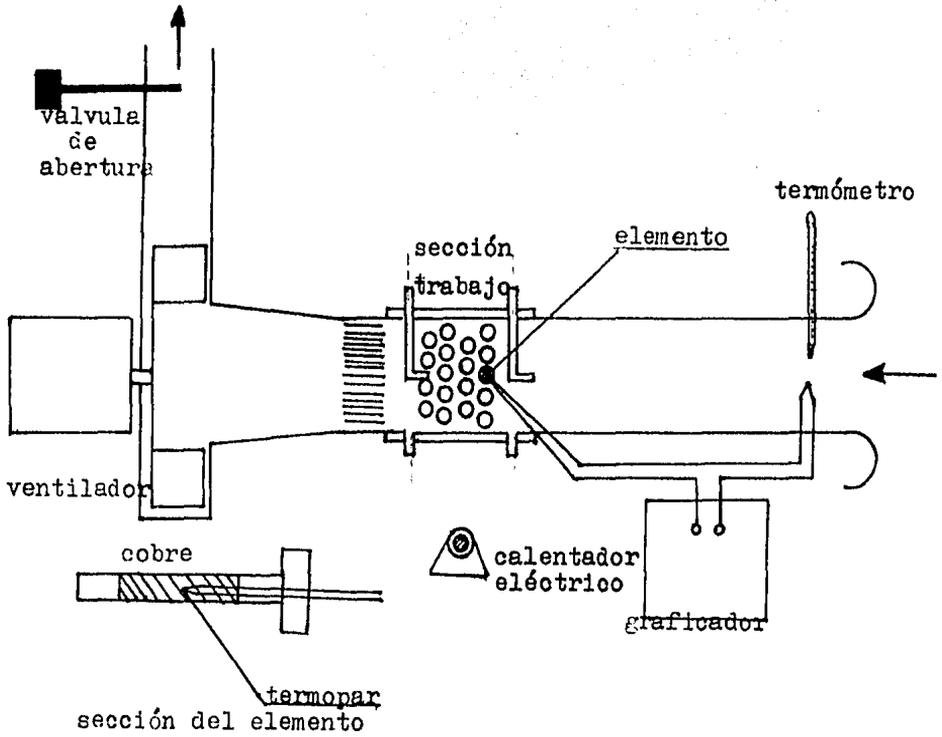


Figura 12.

Se disponen de orificios fijos que permiten leer en el manómetro la presión estática. La velocidad arriba del banco de tubos es sensiblemente constante y se mide la presión estática en la boca de campana.

La presión dinámica en el aparato alcanza un máximo de 75 mm de agua. El manómetro inclinado tiene un intervalo de esta magnitud, para una mayor precisión, - puede usarse un micromanómetro electrónico.

El aparato se monta en una estructura tubular de acero en posición horizontal, tiene un gabinete integral con interruptor principal, una estación de botones (paro-arranque del ventilador) y un interruptor de control para la resistencia de calentamiento.

Los termopares en el elemento de cobre y a la entrada de aire son de cobre y constantán (aleación de cobre-niquel), se cuenta con una tabla T-5 para este tipo de termopar para relacionar los microvolts a grados de temperatura, para las curvas de enfriamiento que se obtienen.

Dentro de un intervalo de 0 - 50°C de diferencia de temperatura, la característica de los termopares es aproximadamente lineal de:

$$1^{\circ}\text{C} = 0.041 \text{ mV} \quad \text{ó} \quad 1 \text{ mV} = 24.4^{\circ}\text{C}.$$

El equipo debe conectarse a un suministro de energía eléctrica de 125 Volts a 60 ciclos, debe asegurarse que el ventilador gire en la dirección correcta, esta es, en la dirección de las manesillas del reloj viendo el motor por su parte final.

3.2 Técnica Experimental:

Esencialmente la técnica experimental en nuestro trabajo tiene como propósito la producción de curvas de enfriamiento de la transferencia de calor: del elemento de cobre al aire; al variar la posición del elemento en la sección-trabajo y la cantidad de flujo de aire que pasa por el banco de tubos. Analizando cada una de las curvas obtenidas y por medio de un tratamiento matemático podemos obtener el coeficiente de transferencia de calor.

Primeramente se colocan las varillas plásticas en la sección-trabajo formando así el banco de 18 tubos. En la parte superior de la sección se encuentran 6 agujeros en uno de estos colocamos el tubo "pitot" con el que podrá detectarse el flujo de aire en la parte superior del banco de tubos; los otros 5 agujeros se tapán con elementos plásticos más pequeños de color negro.

Una de las ramas del manómetro deberá conectarse con la parte superior del tubo "pitot", el medidor debe conectarse en la sección-trabajo en posición horizontal. La otra rama del manómetro deberá conectarse a la toma de presión estática localizada en la tapa inferior de la sección-trabajo.

La válvula de compuerta de entrada de aire se colocará dentro del intervalo de 10 al 100 % de abertura dependiendo del flujo que se desee en cada experimento.

En el graficador figura 13 se obtendrán las curvas de enfriamiento, por lo cual debe seleccionarse la sensibilidad con la que se desee trabajar. En este trabajo, se encontró que 2 mV daba una curva de mayor confiabilidad; la velocidad con que corre la carta, para nosotros fue de 1 mm/s. Se conectan los cables de manera que se registre la diferencia de temperatura entre el elemento de cobre y el aire de entrada. Finalmente se calibra a cero el graficador para empesar la corrida; esta calibración se efectúa estando los dos termopares a la misma temperatura (temperatura ambiente) y mediante la varilla correspondiente se lleva a cero la puntilla del graficador.

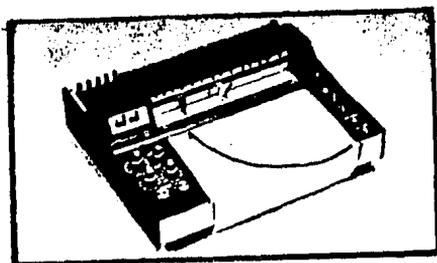


Figura 13.

Se conecta el interruptor y se calienta el elemento de cobre insertándolo en la resistencia eléctrica, cuando la puntilla del graficador a recorrido la distancia correspondiente de la carta (12.5 cm), la temperatura del elemento corresponde aproximadamente a 60°C equivalente al voltaje de 2 mV seleccionado para trabajar y se reemplaza una de las varillas plásticas por el elemento caliente en la posición seleccionada dentro de la sección-trabajo. Se ponen en funcionamiento el ventilador y el botón ó perilla del graficador para que corra la carta automáticamente, lo más rápido posible y simultáneamente para obtener la curva de enfriamiento desde el principio a la máxima ΔT .

SECCION TRABAJO

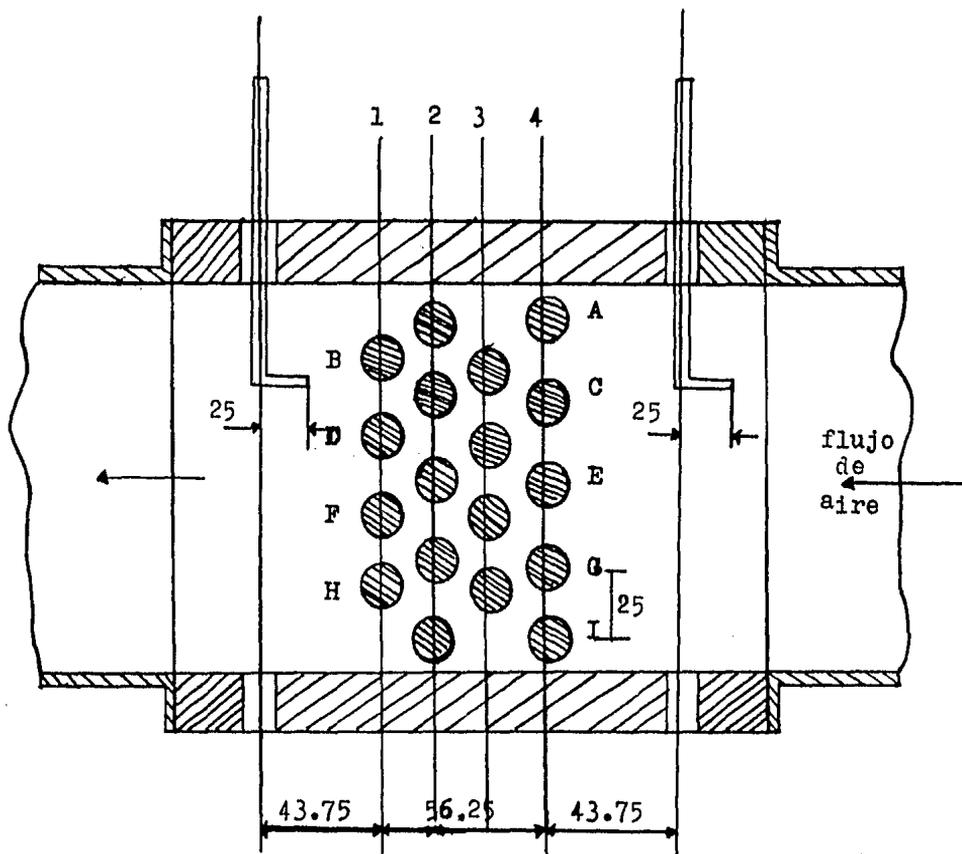


Figura 14

Como ya se dijo la sección-trabajo figura 14, consta de un banco de 18 tubos distribuidos en 4 columnas, dos de ellas la 1 y 3 con 4 tubos en los renglones - representados por las letras B, D, F, H y las otras dos columnas son la 2 y 4 con 5 tubos en los renglones A, C, E, G, I, como puede observarse el elemento de cobre puede ocupar cualquiera de estas posiciones identificadas como: 1B, 1D, 1F 1H; 2A, 2C, 2E, 2G, 2I; 3B, 3D, 3F, 3H; 4A, 4C, 4E, 4G, 4I; obteniendo para cada una de estas posiciones la curva de enfriamiento correspondiente. También puede variarse el flujo de aire que pasa a través de la sección-trabajo, controlando el % de abertura de la válvula del 10 al 100% por lo que pueden hacerse muchas - corridas y establecer la influencia de estos parámetros en el coeficiente de - transferencia de calor .

3.3 Secuencia de cálculo para obtener el coeficiente de transferencia de calor, los números adimensionales Prandtl, Nusselt y Reynolds.

Se considera que las pérdidas totales de calor del elemento de cobre cilíndrico se transfieren al aire y que los gradientes de temperatura dentro del elemento son despreciables, de tal manera que el termopar incrustado en el centro nos dá una indicación verdadera de la temperatura de la superficie efectiva. Una - cierta cantidad de calor es conducida del elemento hacia las piezas de extensión plásticas. La extensión de éste efecto ha sido determinada haciendo pruebas comparativas usando elementos de cobre de diámetro idéntico pero de longitud variable. De estas pruebas el área adicional equivalente representada por las extensiones plásticas se han calculado y se ha determinado la longitud verdadera del elemento para dar una longitud efectiva la que será usada en los cálculos. Esta corrección es del orden de 8.4 mm por lo que tendremos:

$$l_1 = l + 0.0084$$

y podremos calcular el área superficial efectiva del elemento:

$$A_1 = \pi d l_1$$

De la definición del coeficiente de transferencia de calor, la rapidez de - transmisión de calor del elemento al aire esta dada por:

$$q = h A_1 (T - T_a) \quad (1b)$$

donde:

h = es el coeficiente de transferencia de calor ($J/ms^{\circ}C$)

A_1 = es el área efectiva del elemento (m^2)

T = temperatura del elemento ($^{\circ}C$)

T_a = temperatura del aire ($^{\circ}C$)

En un período de tiempo dt la caída de temperatura estará dada por:

$$- q dt = mc dT \quad (2b)$$

que es el calor perdido por el elemento, si ahora despejamos q nos queda:

$$q = - mc dT/dt \quad (3b)$$

donde:

m = es la masa del elemento (Kg)

c = es el calor específico del elemento de cobre ($J/Kg^{\circ}C$)

Si ahora igualamos las ecuaciones (1b) y (3b) tendremos:

$$hA_1 (T - T_a) = - mc dT/dt$$

reacomodando los términos de esta ecuación nos queda:

$$- \frac{dT}{(T - T_a)} = \frac{hA_1 dt}{mc} \quad (4b)$$

integrando la ecuación (4b) tendremos:

$$\ln (T - T_a) - \ln (T_0 - T_a) = - \frac{hA_1 t}{mc} \quad (5b)$$

donde:

T = es la temperatura del elemento

T_a = es la temperatura del aire

T_0 = es la temperatura del elemento al tiempo cero.

Si de la Ec. (5b) graficamos, $\ln (T - T_a)$ contra t nos dará una línea recta con pendiente $- hA_1/mc$ y por lo tanto si conocemos los valores de A_1 , m , c , entonces podemos calcular el coeficiente de transferencia de calor h .

En la práctica es más conveniente graficar el $\log_{10} (T - T_a)$ contra t , entonces dado que el $\ln N = 2.3026 \log_{10} N$, el coeficiente de transferencia de calor está relacionado con la pendiente M de ésta línea por la expresión:

$$h = - 2.3026 \frac{mc}{A_1} M \quad (6b)$$

Con el fin de establecer la velocidad efectiva del aire pasando en el elemento, es necesario calcular la velocidad de la corriente ascendente de la presión dinámica.

La velocidad V_1 desarrollada por un gas de densidad ρ , que se expande libremente bajo la influencia de una diferencia de presión ΔP , cuando ΔP es lo suficientemente pequeña como en el caso estudiado, la compresibilidad será despreciable y está dada por:

$$\frac{\rho V_1^2}{2} = \Delta P \quad (7b)$$

La presión dinámica H_1 , se mide en centímetros de agua y como, 1 cm H_2O es igual a 98.1 N/m^2 , la Ec. (7b) se convierte en:

$$\frac{\rho V_1^2}{2} = 98.1 H_1 \quad (8b)$$

La densidad del aire bajo la presión P_a y la temperatura T_a está dada por:

$$\frac{P_a M_o}{\rho} = RT_a \quad (9b)$$

donde la constante de los gases $R = 8314 \text{ (m}^3 \text{ (N/m}^2) / \text{Kgmol } ^\circ\text{K)}$

Si ahora de la Ec. (8b) despejamos V_1 tendremos:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \times 98.1 H_1}{\rho}} \quad (10b)$$

Y de la Ec. (9b) despejamos a la densidad :

$$\rho = \frac{P_a M_o}{RT_a} \quad (11b)$$

Sustituyendo la ecuación (11b) en la ecuación (10b) nos queda:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \times 98.1 H_1 RT_a}{P_a M_o}}$$

si sustituimos el valor de R y $M_o = 29 \text{ Kg/Kgmol}$ la ecuación anterior se reduce a la siguiente:

$$V_1 = 237.2 \sqrt{\frac{h \cdot Ta}{Pa}} \quad (12b)$$

Esta Ec. (12b), es útil cuando los cálculos de la velocidad efectiva a través del banco de tubos se hacen en base al área mínima de flujo. Cuando todos los tubos están instalados, ésta área mínima aparece en un plano transversal incluyendo una columna de 5 tubos, de tal manera que los tubos tienen un diámetro de 1.25 cm y una anchura de la sección-trabajo de 12.5 cm, el área efectiva es la mitad del área de la sección de trabajo y por lo tanto:

$$V = 2 V_1 \quad (13b)$$

Cuando un elemento simple está siendo estudiado, el área de flujo es 9/10 de área total de la sección de trabajo y tenemos:

$$V = 10/9 V_1 \quad (14b)$$

La teoría de la transferencia de calor convectiva predice que el coeficiente de transferencia de calor h es una función de V y de las variables independientes: d , ρ , C_p , μ , K .

El análisis dimensional muestra que las relaciones entre h y las variables independientes pueden ser expresadas en la siguiente forma:

$$\frac{hd}{K} = f \left(\frac{Vd\rho}{\mu}, \frac{C_p\mu}{K} \right)$$

Estos grupos adimensionales son conocidos respectivamente como:

$$\text{Número de Nusselt} = hd/K \quad (15b)$$

$$\text{Número de Reynolds} = Vd\rho/\mu \quad (16b)$$

$$\text{Número de Prandtl} = C_p\mu/K \quad (17b)$$

En la práctica del número de Prandtl es prácticamente constante para los gases bajo un intervalo bastante amplio de condiciones y la rapidez de transferencia de calor es efectivamente una función del número de Reynolds.

Tabla T-5. PROPIEDADES DEL AIRE

Temperatura		densidad	viscosidad	conductividad
°C	°K	(Kg/m ³)	(Kg/m s)	(J/m s °C)
17	290.15	0.9370	1.7912 x 10 ⁻⁵	0.02545
17.5	290.65	0.9354	1.7936 x 10 ⁻⁵	0.02549
18	291.15	0.9338	1.7961 x 10 ⁻⁵	0.02553
18.5	291.65	0.9322	1.7985 x 10 ⁻⁵	0.02557
19	292.15	0.9306	1.8009 x 10 ⁻⁵	0.02560
19.5	292.65	0.9290	1.8034 x 10 ⁻⁵	0.02564
20	293.15	0.9274	1.8058 x 10 ⁻⁵	0.02568
20.5	293.65	0.9258	1.8084 x 10 ⁻⁵	0.02572
21	294.15	0.9243	1.8106 x 10 ⁻⁵	0.02575
21.5	294.65	0.9127	1.8130 x 10 ⁻⁵	0.02579
22	295.15	0.9212	1.8154 x 10 ⁻⁵	0.02583

$$C_{pa} = 996.45 \text{ (J/Kg}^\circ\text{C)}$$

DIMENSIONES DEL ELEMENTO DE COBRE:

$$m = 0.01065 \text{ Kg}$$

$$l = 0.0951 \text{ m}$$

$$d = 0.01238 \text{ m}$$

$$c = 380 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C.}$$

Tabla T-6. Temperaturas en °C para el termopar (IPTS - 68)

Temp	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Temp
microvolts											
0	0	39	78	117	156	195	234	273	312	351	0
10	391	430	470	510	549	589	629	669	709	749	10
20	789	830	870	911	951	992	1032	1073	1114	1155	20
30	1196	1237	1279	1320	1361	1403	1444	1486	1528	1569	30
40	1611	1653	1695	1738	1780	1822	1865	1907	1950	1992	40
50	2035	2078	2121	2164	2207	2250	2294	2337	2380	2424	50
60	2467	2511	2555	2599	2643	2687	2731	2775	2819	2864	60
70	2908	2953	2997	3042	3087	3131	3176	3221	3266	3312	70
80	3357	3402	3447	3493	3538	3584	3630	3676	3721	3767	80
90	3813	3859	3906	3952	3998	4044	4091	4137	4184	4231	90
100	4277	4324	4371	4418	4465	4512	4559	4607	4654	4701	100
110	4749	4796	4844	4891	4939	4987	5035	5083	5131	5179	110
120	5227	5275	5324	5372	5420	5469	5517	5566	5615	5663	120
130	5712	5761	5810	5859	5908	5957	6007	6056	6105	6155	130
140	6204	6254	6303	6353	6403	6452	6502	6552	6602	6652	140
150	6702	6753	6803	6853	6903	6954	7004	7055	7106	7156	150
160	7207	7258	7309	7360	7411	7462	7513	7564	7615	7666	160
170	7718	7769	7821	7872	7924	7975	8027	8079	8131	8183	170
180	8235	8287	8339	8391	8443	8495	8548	8600	8652	8705	180
190	8757	8810	8863	8915	8968	9021	9074	9127	9180	9233	190
200	9286	9339	9392	9446	9499	9553	9606	9659	9713	9767	200
210	9820	9874	9928	9982	10036	10090	10144	10198	10252	10306	210
220	10360	10414	10469	10523	10578	10632	10687	10741	10796	10851	220
230	10905	10960	11015	11070	11125	11180	11235	11290	11345	11401	230
240	11456	11511	11566	11622	11677	11733	11788	11844	11900	11956	240
250	12011	12067	12123	12179	12235	12291	12347	12403	12459	12515	250
260	12572	12628	12684	12741	12797	12854	12910	12967	13024	13080	260
270	13137	13194	13251	13307	13364	13421	13478	13535	13592	13650	270
280	13707	13764	13821	13879	13936	13993	14051	14108	14166	14223	280
290	14281	14339	14396	14454	14512	14570	14628	14686	14744	14802	290

NOTACION

Diámetro del elemento	d	m
Longitud del elemento	l	m
Longitud efectiva del elemento	l_1	m
Area superficial del elemento	A	m^2
Area superficial efectiva del elemento	A_1	m^2
Masa del elemento	m	Kg
Calor específico del elemento de cobre (380)	c	$J/Kg^\circ C$
Presión barométrica	P_a	N/m^2
Temperatura del aire (ambiente)	T_a	$^\circ K$
Presión dinámica	H_1	$cm H_2O$
Velocidad de la corriente ascendente de la sección trabajo	V_1	m/s.
Velocidad media en el paso del elemento	V	m/s
Densidad del aire	ρ	Kg/m^3
Calor específico del aire a presión constante	C_p	$J/Kg^\circ C$
Viscosidad del aire	μ	Kg/ms
Conductividad térmica del aire	K	$J/ms^\circ C$
Coefficiente de transferencia de calor	h	$J/m^2 s^\circ K$
Temperatura del elemento	T	$^\circ K$
Velocidad de transferencia de calor al aire	q	J/s
Pendiente de la curva de enfriamiento	M	
Número de Nusselt hd/K	Nu	
Número de Prandtl $C_p \mu / K$	Pr	
Número de Reynolds $\rho V d / \mu$	Re	

4. RESULTADOS

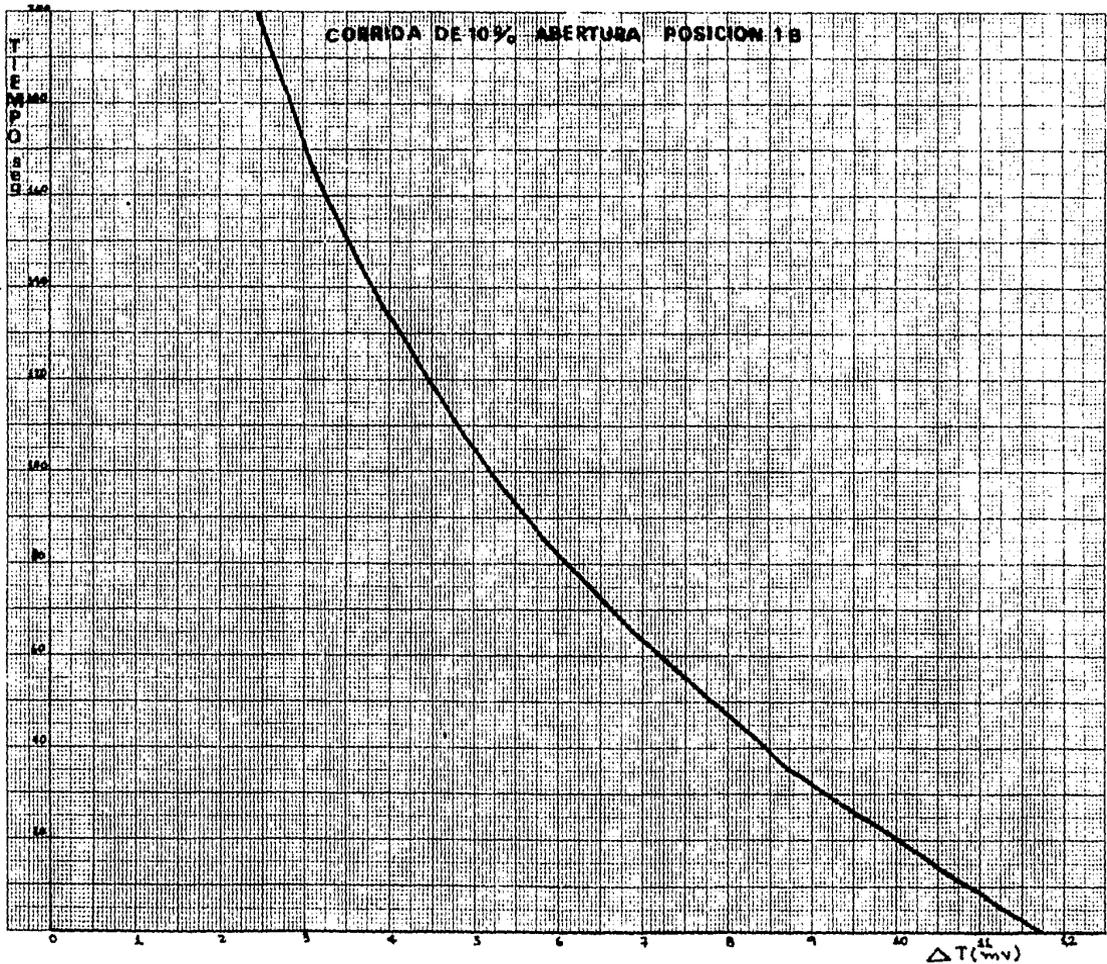
Se realizaron 162 corridas experimentales variando la posición del elemento de cobre en todas las columnas; 1B, 1D, 1F, 1H; 2A, 2C, 2E, 2G, 2I; 3B, 3D, 3F, 3H; 4A, 4C, 4E, 4G, 4I; y variando el flujo de aire del 10 al 100 % de abertura de la válvula excepto para el 90 % que ya no pudo realizarse por fallas en el -graficador.

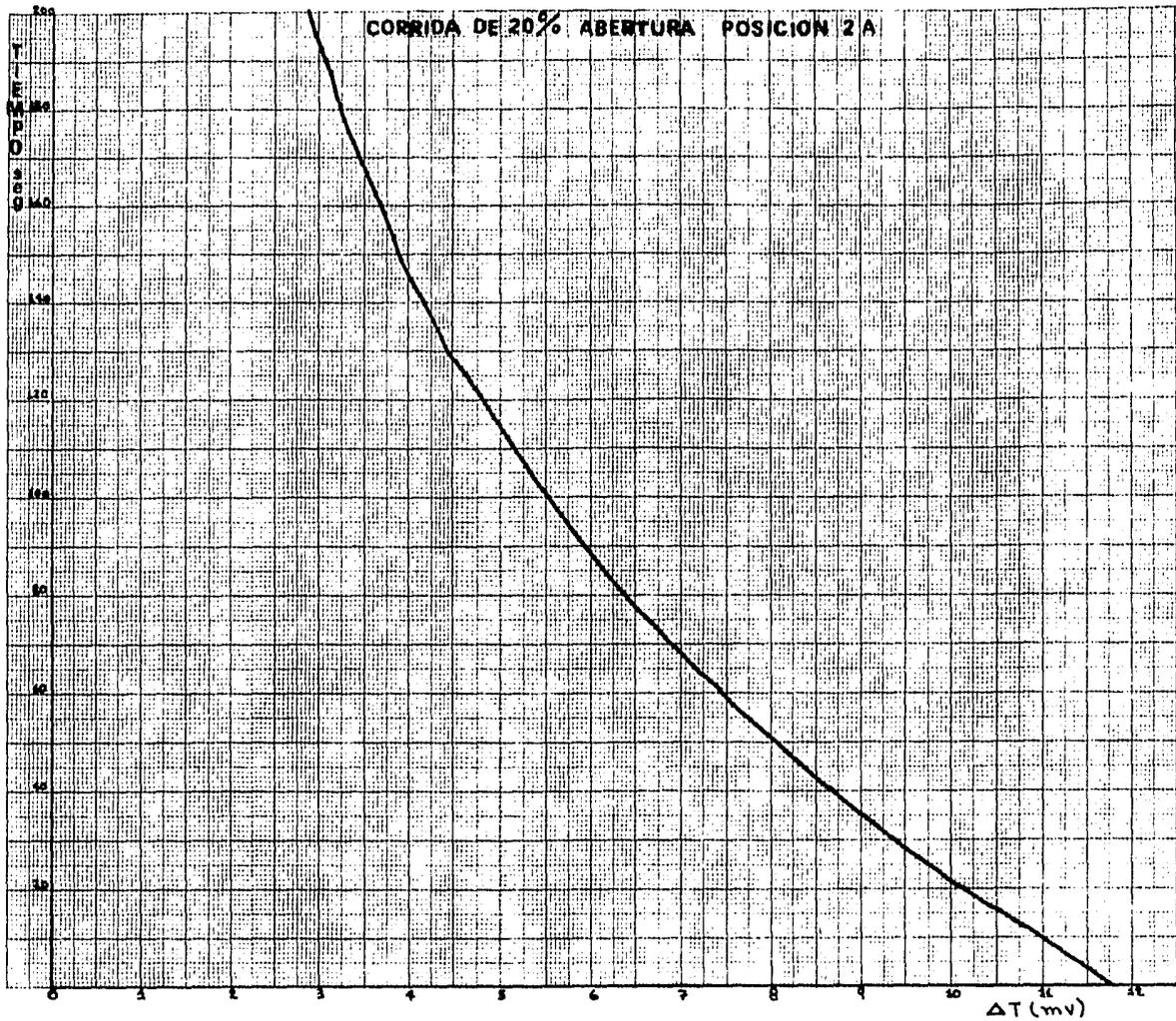
De estas 162 curvas de enfriamiento obtenidas, se escogieron nueve que corresponden a cada posición de la válvula que se presentán en éste capítulo y se adicionan sus hojas de datos correspondientes.

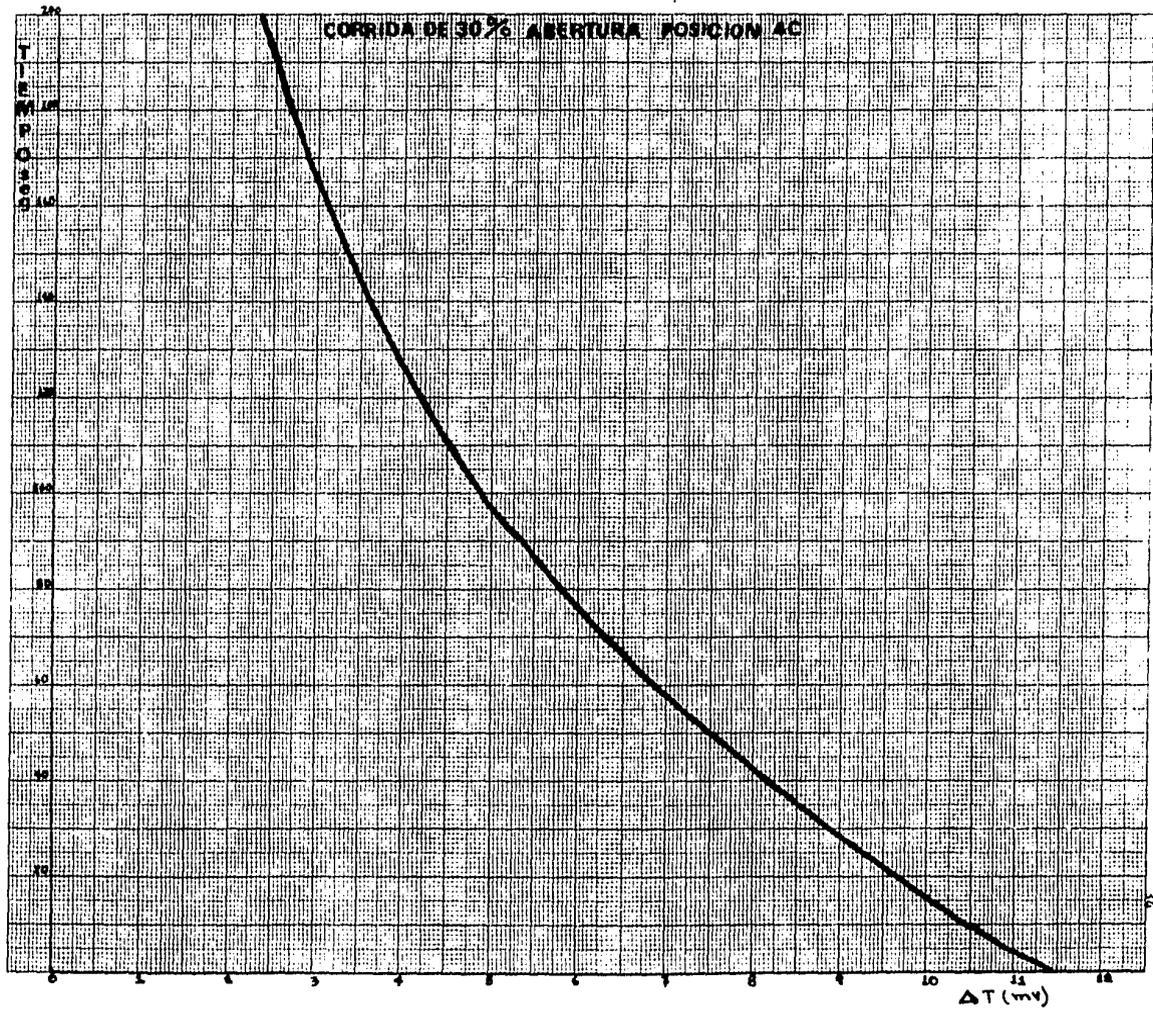
Las hojas de datos se obtienen de la siguiente manera:

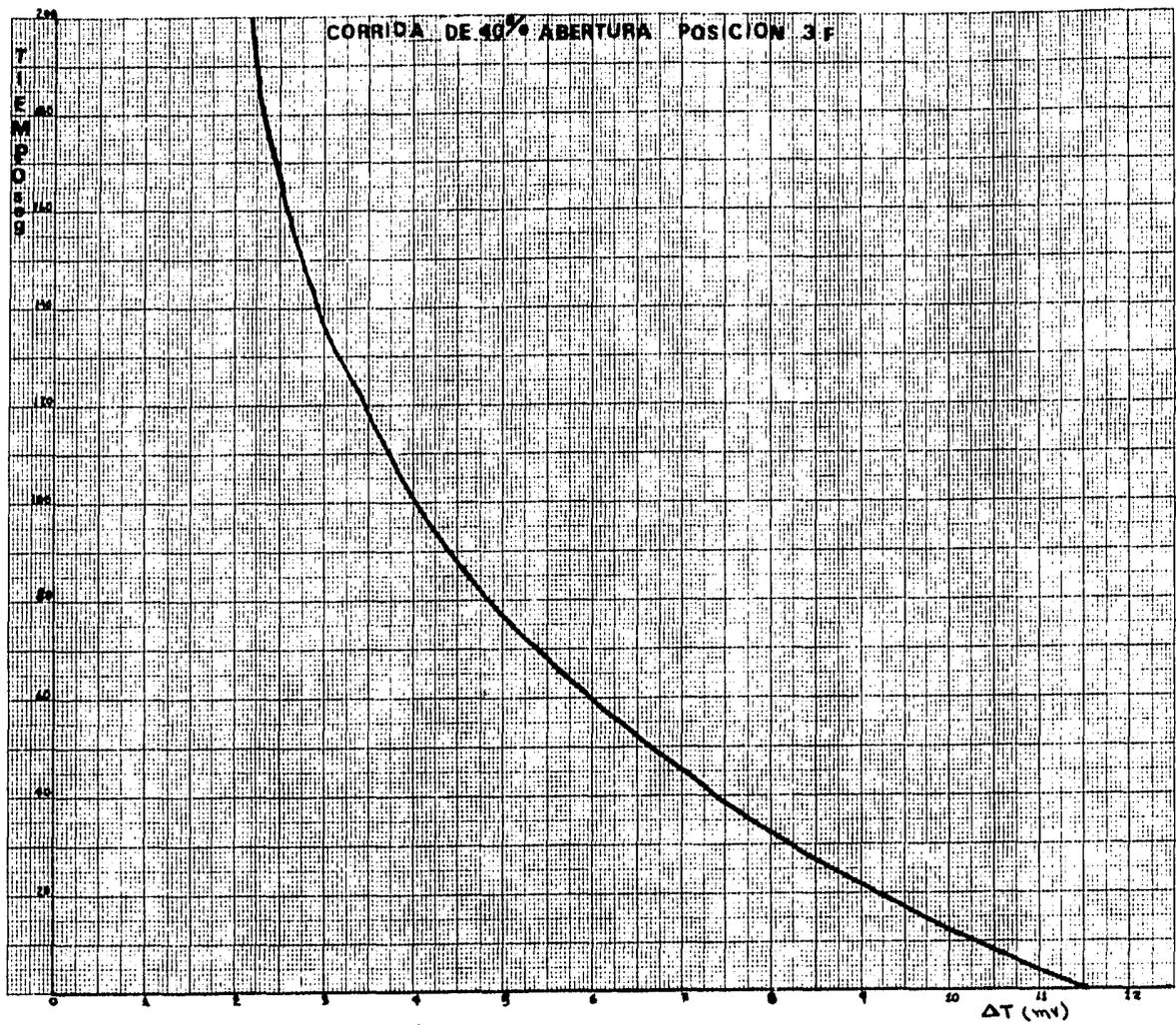
- a) La curva de enfriamiento tiene como abscisas distancia (mm) que se relaciona con milivolts y ordenadas tiempo (seg).
- b) Utilizando el factor de 1.6, éste se multiplica po la distancia en un punto X que corresponderá a un tiempo determinado, y obtenemos los microvolts.
- c) Con estos microvolts obtenidos, leemos en la tabla T-6 pagina (28) el valor de la diferencia de temperatura (ΔT) correspondientes.
- d) Sacamos $\log \Delta T$ y con los valores de t podemos hacer la gráfica de estos datos, de la línea optenida encontramos su pendiente y con esta podemos calcular el coeficiente de transferencia de calor, de acuerdo a la ecuación (6b), pagina (25), los grupos adimensionales Nu, Re y Pr, se calculán con las ecuaciones (15b), (16b), (17b) respectivamente.

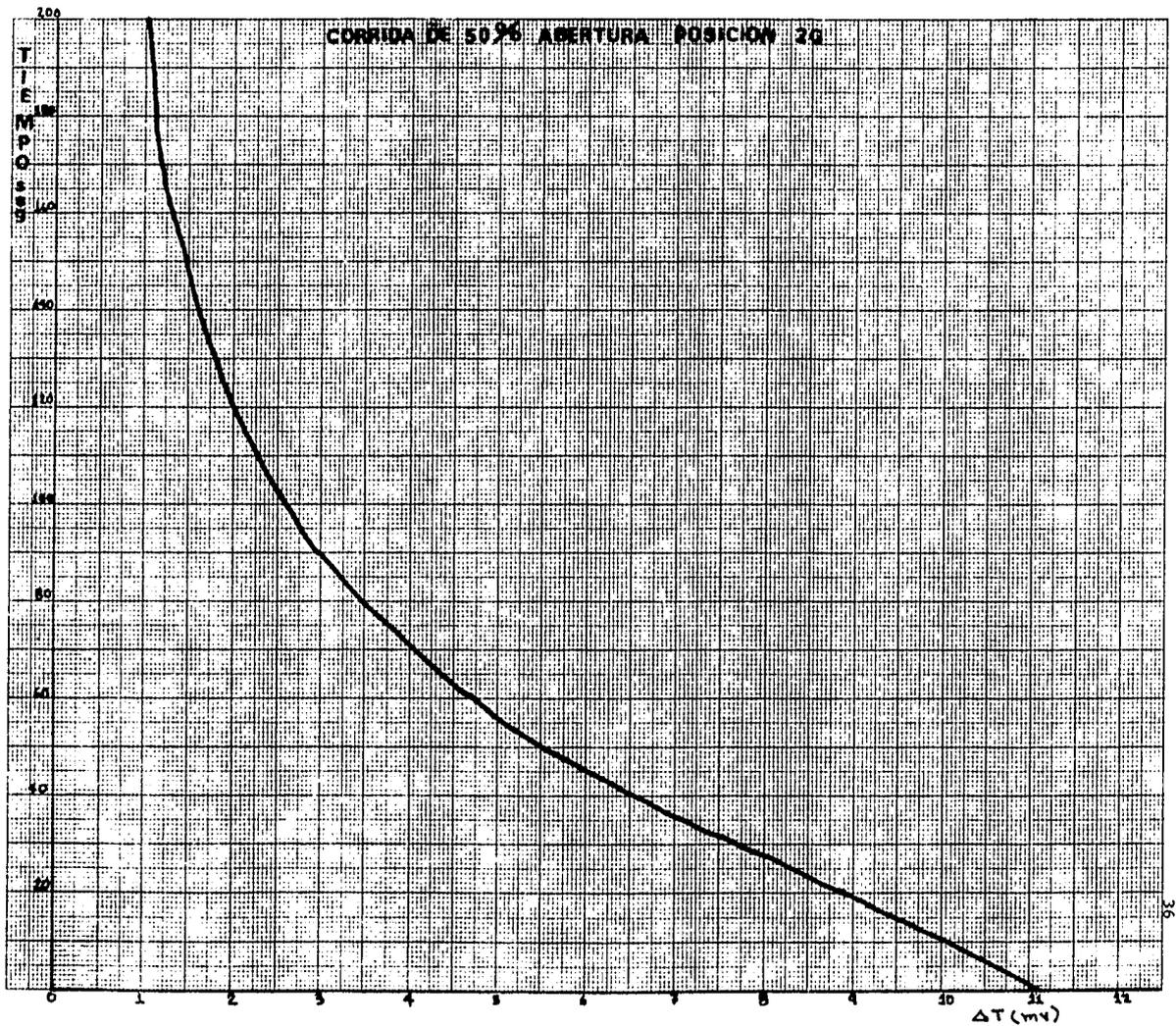
Los valores obtenidos de los puntos anteriores se resumén en las tablas de - todas las corridas realizadas, conforme a la posición del elemento de cobre y - para cada % de abertura de la válvula de regulación de flujo de aire.

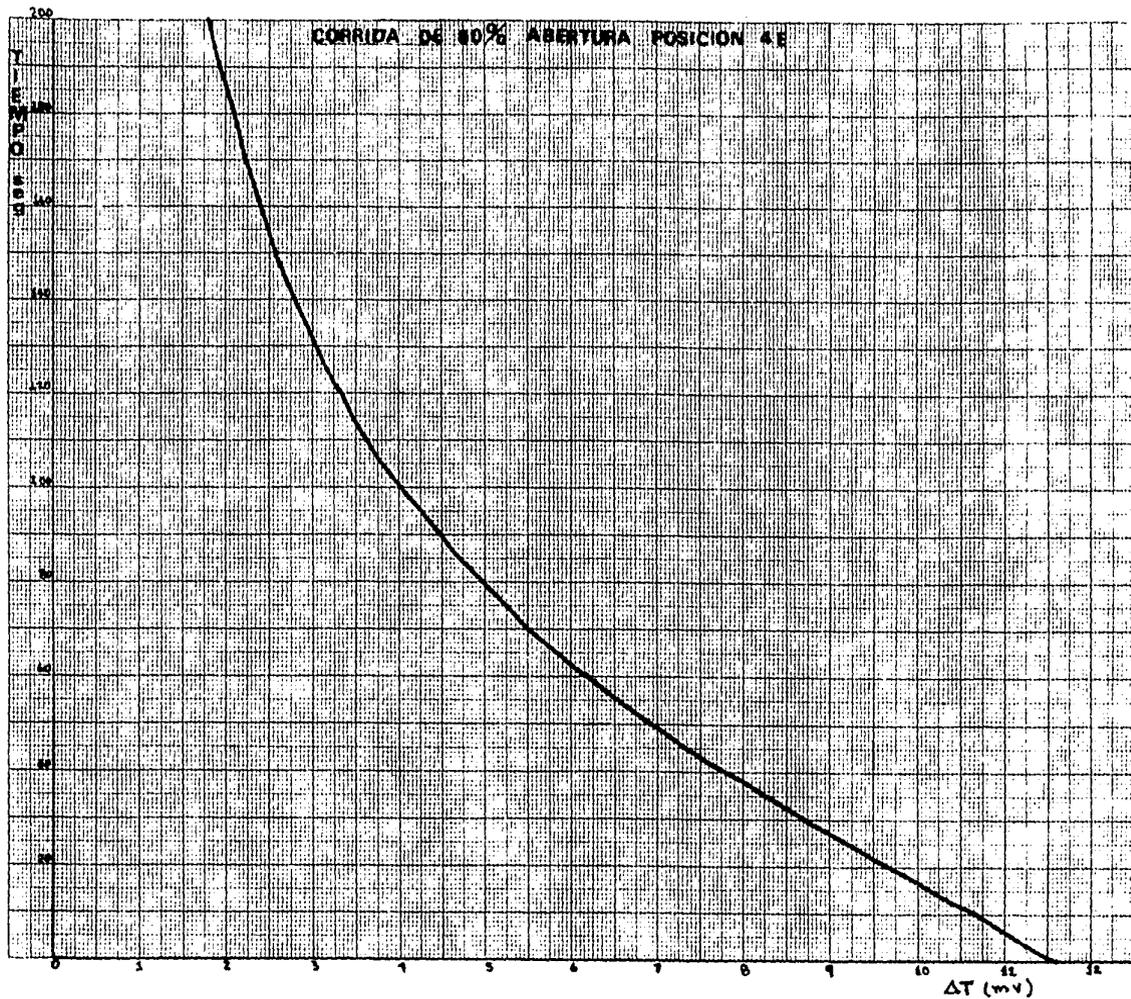


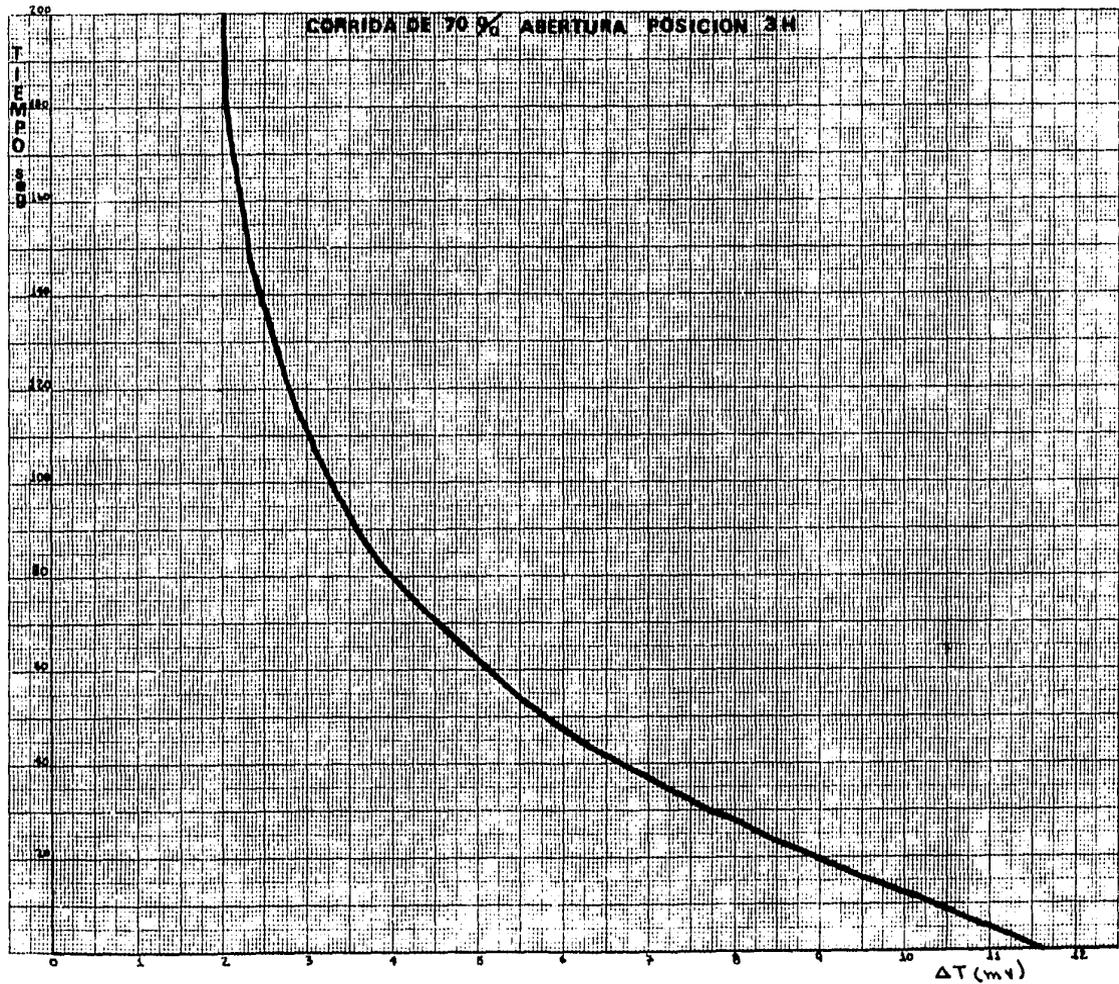


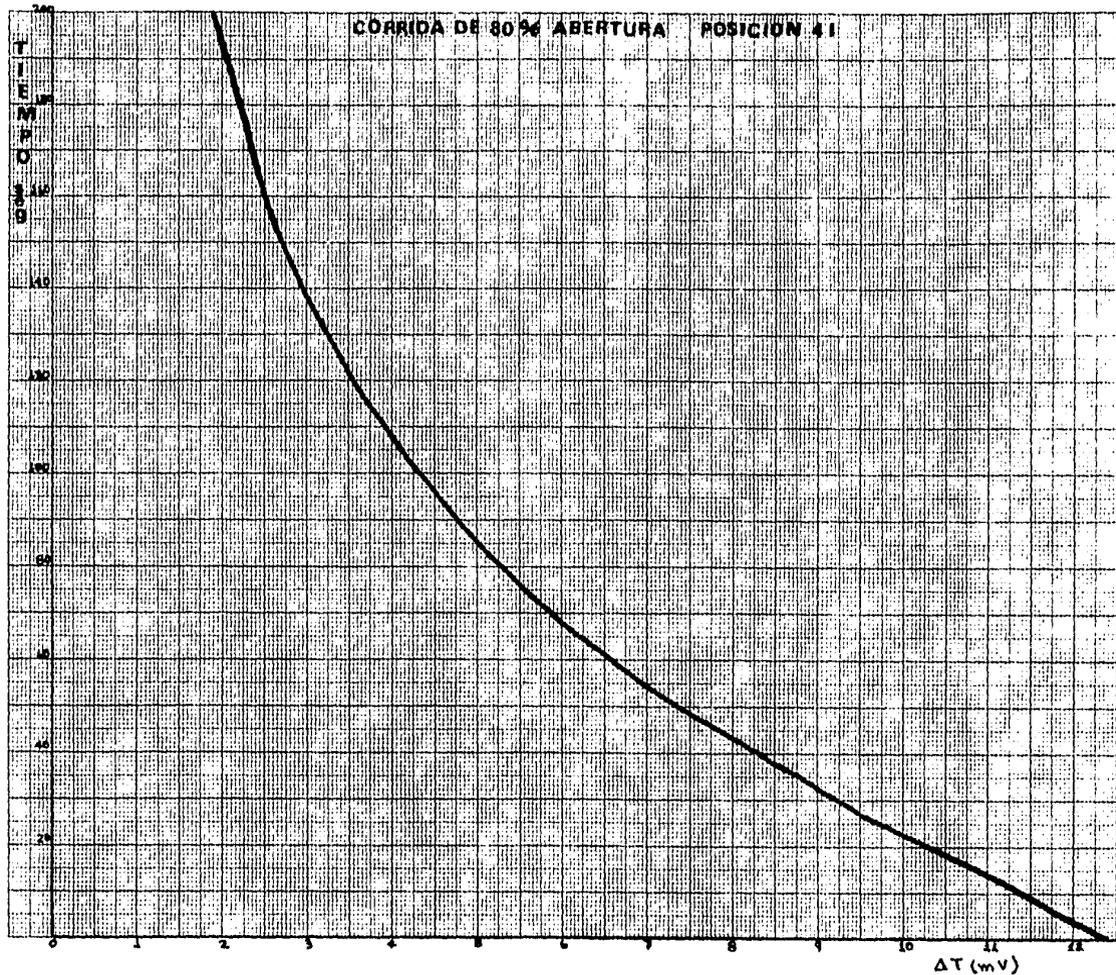




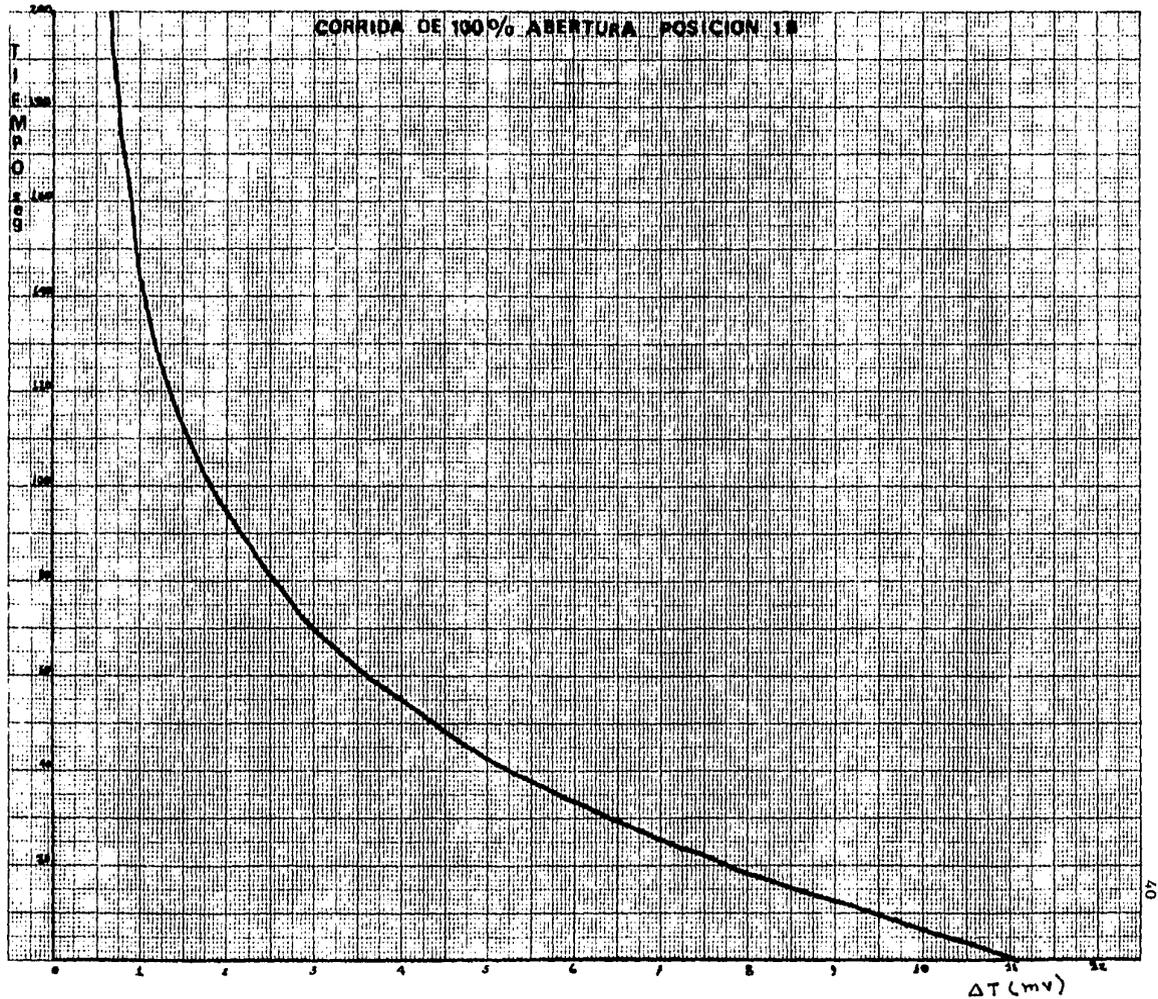








CORRIDA DE 100% ABERTURA POSICION 1B



$\Delta T (mv)$

40

DATOS DE LA CORRIDA DE 10 % DE ABERTURA, EN POSICION 1B

 $T_a = 17^\circ\text{C}$ $H_1 = 0.11 \text{ cm H}_2\text{O}$

TIEMPO (seg)	DISTANCIA (mm)	μV	ΔT ($^\circ\text{C}$)	Log ΔT
0	1175	1880	46.38	1.66
10	1090	1744	43.15	1.63
20	1005	1608	40.00	1.60
30	925	1480	36.90	1.57
40	850	1360	34.00	1.53
50	785	1256	31.51	1.50
60	725	1160	29.10	1.46
70	665	1064	26.77	1.43
80	615	984	24.85	1.40
90	565	904	22.90	1.36
100	525	840	21.25	1.33
110	485	776	19.64	1.29
120	450	720	18.30	1.26
130	415	664	17.00	1.23
140	385	616	15.70	1.19
150	355	568	14.50	1.16
160	330	528	13.42	1.12
170	310	496	12.65	1.10
180	285	456	11.65	1.06
190	270	432	11.00	1.04
200	250	400	10.20	1.01

DATOS DE LA CORRIDA DE 20 % DE ABERTURA, EN POSICION 2A

Ta = 17°C

H₁ = 0.38 cm H₂O

TIEMPO (seg)	DISTANCIA (mm)	μ V	ΔT (°C)	Log ΔT
0	1180	1880	46.25	1.665
10	1100	1760	44.80	1.651
20	1015	1624	40.30	1.605
30	940	1504	37.50	1.574
40	870	1392	34.77	1.541
50	805	1288	32.25	1.510
60	745	1192	30.00	1.480
70	690	1104	27.75	1.440
80	640	1024	25.80	1.410
90	595	952	24.00	1.380
100	555	888	22.48	1.350
110	515	824	21.00	1.320
120	480	768	19.50	1.290
130	445	712	18.00	1.255
140	420	672	17.10	1.230
150	390	624	16.00	1.200
160	370	592	15.10	1.180
170	345	552	14.10	1.150
180	325	520	13.25	1.120
190	310	496	12.64	1.100
200	290	464	11.60	1.060

DATOS DE LA CORRIDA DE 30 % DE ABERTURA, EN POSICION 4C

Ta = 18°C

H₁ = 0.58 cm H₂O

TIEMPO (seg)	DISTANCIA (mm)	μ V	Δ T (°C)	Log Δ T
0	1145	1832	45.25	1.655
10	1055	1688	41.87	1.622
20	965	1544	38.46	1.585
30	880	1408	35.13	1.545
40	820	1312	32.80	1.515
50	750	1200	30.10	1.478
60	685	1096	27.59	1.440
70	630	1008	25.41	1.405
80	580	928	23.44	1.370
90	535	856	21.66	1.335
100	490	784	19.87	1.298
110	455	728	18.23	1.260
120	420	672	17.07	1.232
130	390	624	15.87	1.200
140	360	576	14.69	1.167
150	335	536	13.66	1.135
160	310	496	12.66	1.102
170	290	464	11.87	1.070
180	270	432	11.05	1.040
190	255	408	10.44	1.020
200	235	376	9.64	0.980

DATOS DE LA CORRIDA DE 40 % DE ABERTURA, EN POSICION 3F

Ta = 21°C

H₁ = 1 cm H₂O

TIEMPO (seg)	DISTANCIA (mm)	μV	ΔT (°C)	Log ΔT
0	1155	1848	45.66	1.659
10	1030	1648	40.95	1.612
20	925	1480	36.85	1.566
30	825	1320	33.00	1.518
40	740	1184	29.74	1.473
50	665	1064	26.82	1.428
60	600	960	24.23	1.384
70	540	864	21.87	1.339
80	485	776	19.69	1.294
90	445	712	18.07	1.256
100	405	648	16.48	1.217
110	375	600	15.28	1.184
120	345	552	14.07	1.148
130	315	504	12.85	1.108
140	295	472	12.05	1.080
150	275	440	11.25	1.050
160	260	416	10.64	1.027
170	250	400	10.27	1.000
180	235	376	9.64	0.980
190	225	360	9.23	0.965
200	220	352	9.00	0.954

DATOS DE LA CORRIDAD DE 50 % DE ABERTURA, EN POSICION 2G

Ta = 20°C

H₁ = 1.3 cm H₂O

TIEMPO (seg)	DISTANCIA (mm)	μ V	Δ T (°C)	Log Δ T
0	1110	1770	43.90	1.642
10	1010	1616	40.13	1.602
20	890	1424	35.54	1.550
30	770	1232	30.87	1.489
40	655	1048	26.41	1.421
50	560	896	22.66	1.355
60	475	760	19.28	1.285
70	410	656	16.69	1.222
80	350	560	14.28	1.154
90	300	480	12.25	1.088
100	260	416	10.64	1.020
110	230	368	9.44	0.975
120	205	322	8.41	0.868
130	180	288	7.38	0.868
140	165	264	6.77	0.830
150	150	240	6.15	0.788
160	130	208	5.33	0.726
170	120	192	4.93	0.693
180	115	184	4.72	0.674
190	110	176	4.51	0.654
200	105	168	4.30	0.633

DATOS DE LA CORRIDA DE 60 % DE ABERTURA, EN POSICION 4E

Ta = 20°C

H₁ = 1.8 cm H₂O

TIEMPO (seg)	DISTANCIA (mm)	μV	ΔT (°C)	Log ΔT
0	1160	1856	45.87	1.661
10	1070	1712	42.44	1.627
20	970	1552	38.87	1.589
30	875	1400	34.93	1.543
40	780	1248	31.28	1.495
50	695	1112	27.95	1.446
60	620	992	25.00	1.397
70	555	888	22.46	1.351
80	500	800	20.28	1.307
90	450	720	18.28	1.262
100	405	648	16.48	1.217
110	365	584	15.00	1.176
120	335	536	13.66	1.135
130	305	488	12.46	1.095
140	280	448	11.46	1.059
150	260	416	10.64	1.027
160	240	384	9.85	0.99
170	225	360	9.10	0.96
180	210	336	8.62	0.93
190	195	312	8.00	0.90
200	185	296	7.59	0.88

DATOS DE LA CORRIDA DE 70 % DE ABERTURA, EN POSICION 3H

Ta = 19.5°C H₁ = 2 cm H₂O

TIEMPO (seg)	DISTANCIA (mm)	μV	ΔT (°C)	Log ΔT
0	1170	1872	46.18	1.664
10	1030	1648	40.95	1.612
20	890	1424	35.54	1.550
30	770	1232	30.87	1.489
40	665	1064	26.82	1.428
50	575	920	23.23	1.366
60	510	816	20.69	1.315
70	450	720	18.28	1.162
80	395	632	16.08	1.167
90	360	576	14.69	1.167
100	235	520	13.25	1.122
110	300	480	12.25	1.088
120	280	448	11.46	1.059
130	260	416	10.64	1.027
140	245	392	10.03	1.001
150	235	376	9.64	0.984
160	225	360	9.23	0.965
170	215	344	8.82	0.945
180	210	336	8.62	0.945
190	205	328	8.41	0.924
200	200	320	8.21	0.914

DATOS DE LA CORRIDA DE 80 % DE ABERTURA, EN POSICION 4I

Ta = 19°C

H₁ = 2.2 cm H₂O

TIEMPO (seg)	DISTANCIA (mm)	μV	ΔT (°C)	Log ΔT
0	1240	1968	48.46	1.685
10	1145	1832	45.25	1.655
20	1030	1648	40.95	1.612
30	920	1472	36.76	1.565
40	825	1320	33.00	1.518
50	730	1268	29.33	1.467
60	650	1040	26.21	1.416
70	580	928	23.44	1.369
80	520	863	21.05	1.323
90	465	744	18.87	1.275
100	420	672	17.08	1.233
110	380	608	15.48	1.189
120	345	552	14.08	1.148
130	315	504	12.87	1.109
140	290	464	11.87	1.074
150	265	424	10.85	1.035
160	245	392	10.05	1.002
170	230	368	9.44	0.974
180	220	352	9.00	0.954
190	200	320	8.20	0.914
200	190	304	7.80	0.872

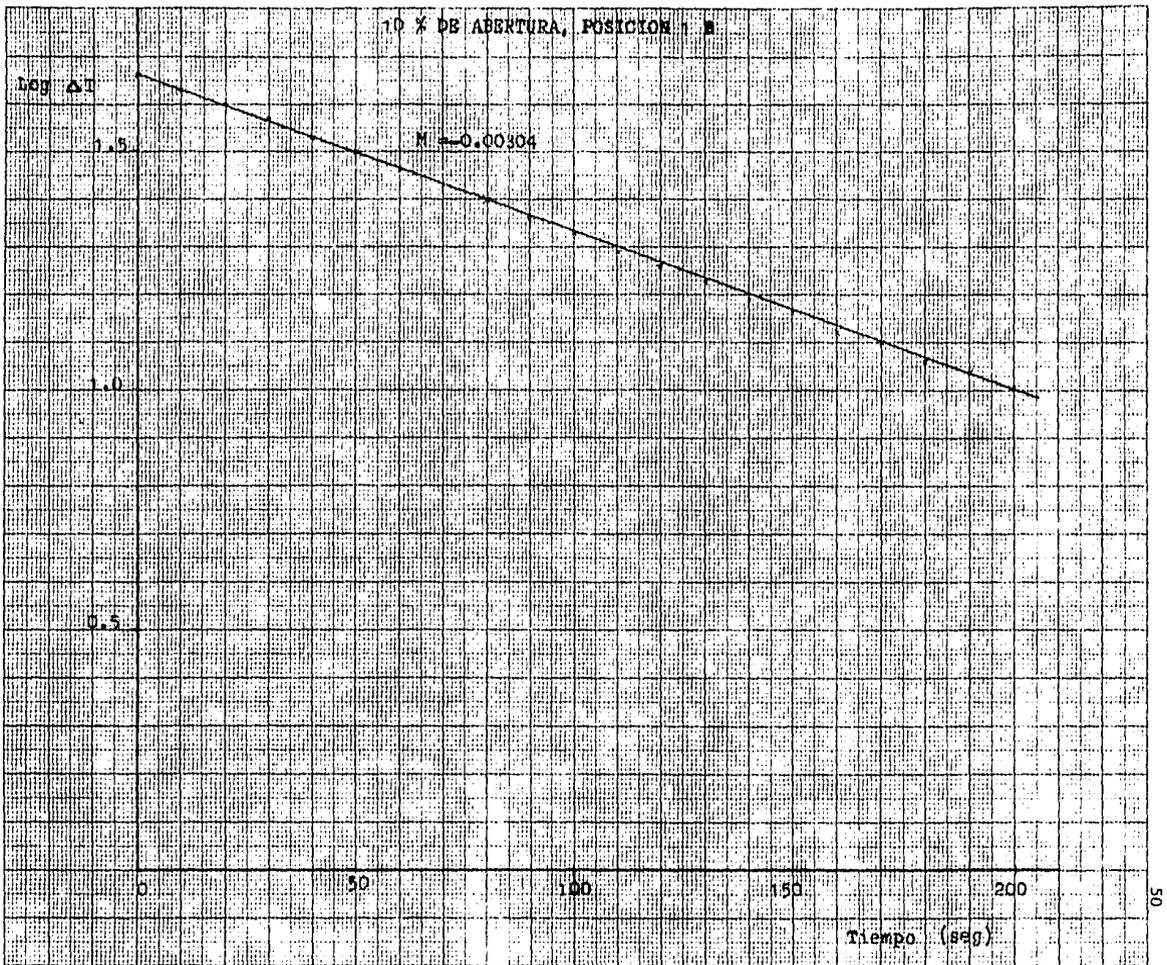
DATOS DE LA CORRIDA DE 100 % DE ABERTURA, EN POSICION 3D

Ta = 17°C

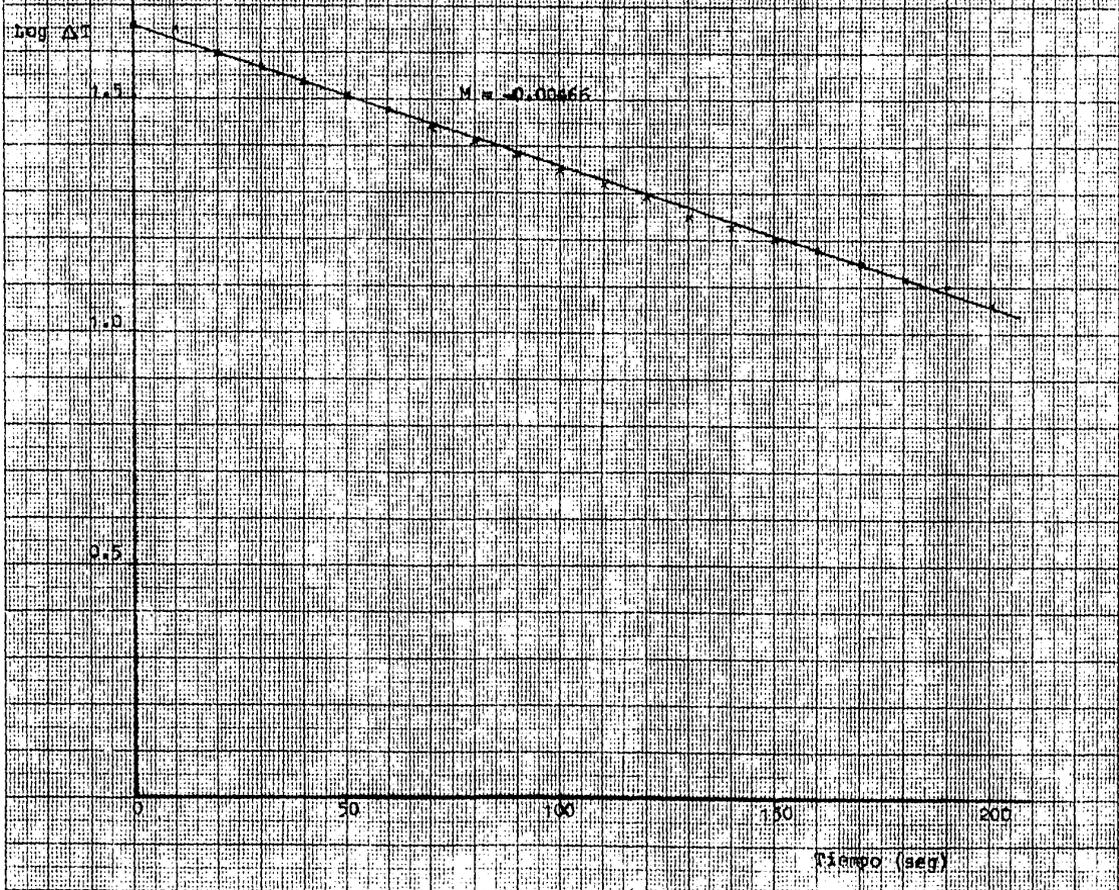
H₁ = 3 cm H₂O

TIEMPO (seg)	DISTANCIA (mm)	μV	ΔT (°C)	Log ΔT
0	1115	1784	44.10	1.644
10	950	1520	37.80	1.580
20	785	1256	31.48	1.498
30	650	1040	26.20	1.418
40	530	848	21.46	1.331
50	440	704	17.87	1.252
60	365	584	14.87	1.172
70	305	488	12.46	1.095
80	260	416	10.62	1.023
90	220	352	9.00	1.023
100	190	304	7.80	0.890
110	165	264	6.77	0.830
120	140	224	5.75	0.760
130	125	200	5.13	0.710
140	110	176	4.41	0.644
150	100	160	4.10	0.612
160	95	152	3.90	0.591
170	85	136	3.48	0.541
180	80	128	3.28	0.515
190	75	120	3.08	0.488
200	75	120	3.08	0.488

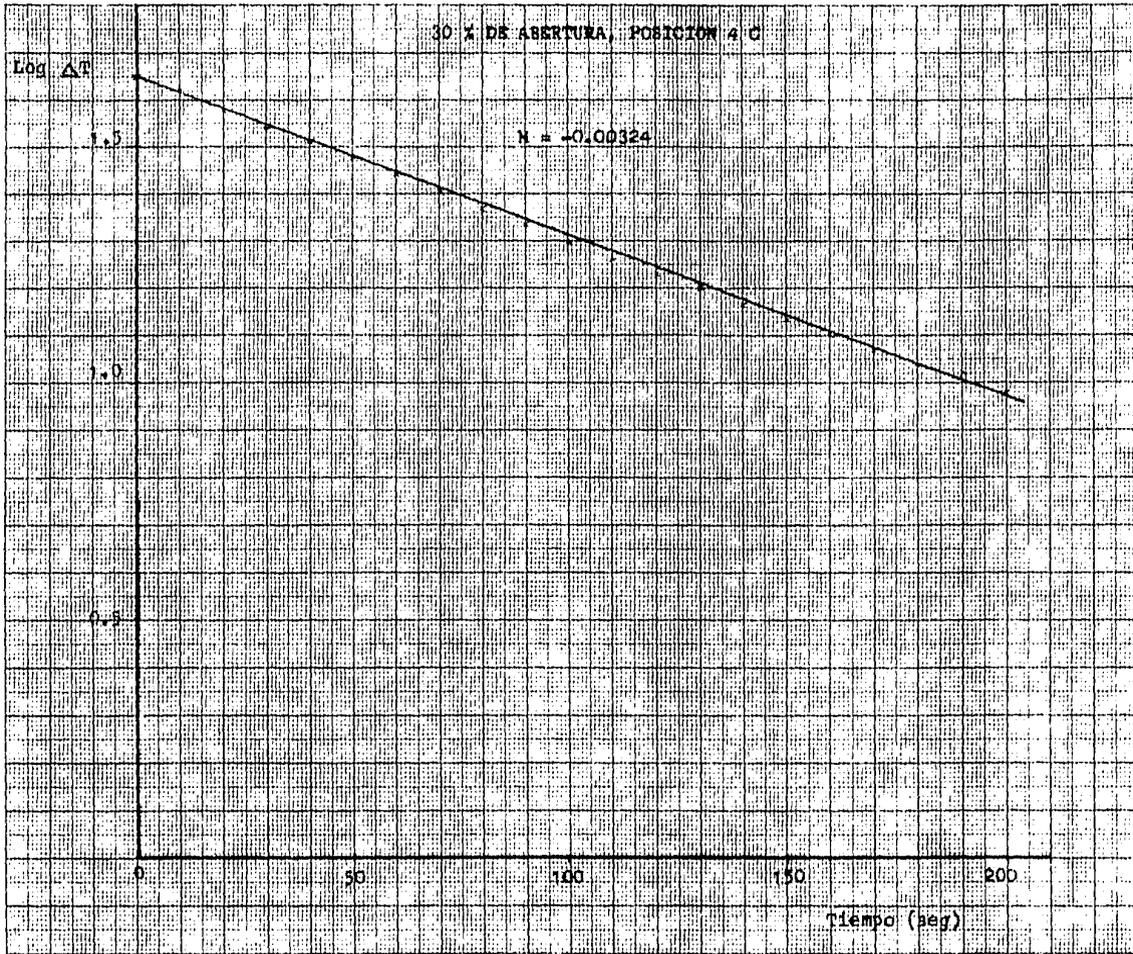
10 % DE ABERTURA, POSICION 1 B



20 X DE ABERTURA, POSICION 2-A



30 % DE ABERTURA, POSICION 4 C



40% DE ABERTURA, POSICION 3 F

Log ΔT

1.5

$M = -0.00418$

1.0

0.5

0

50

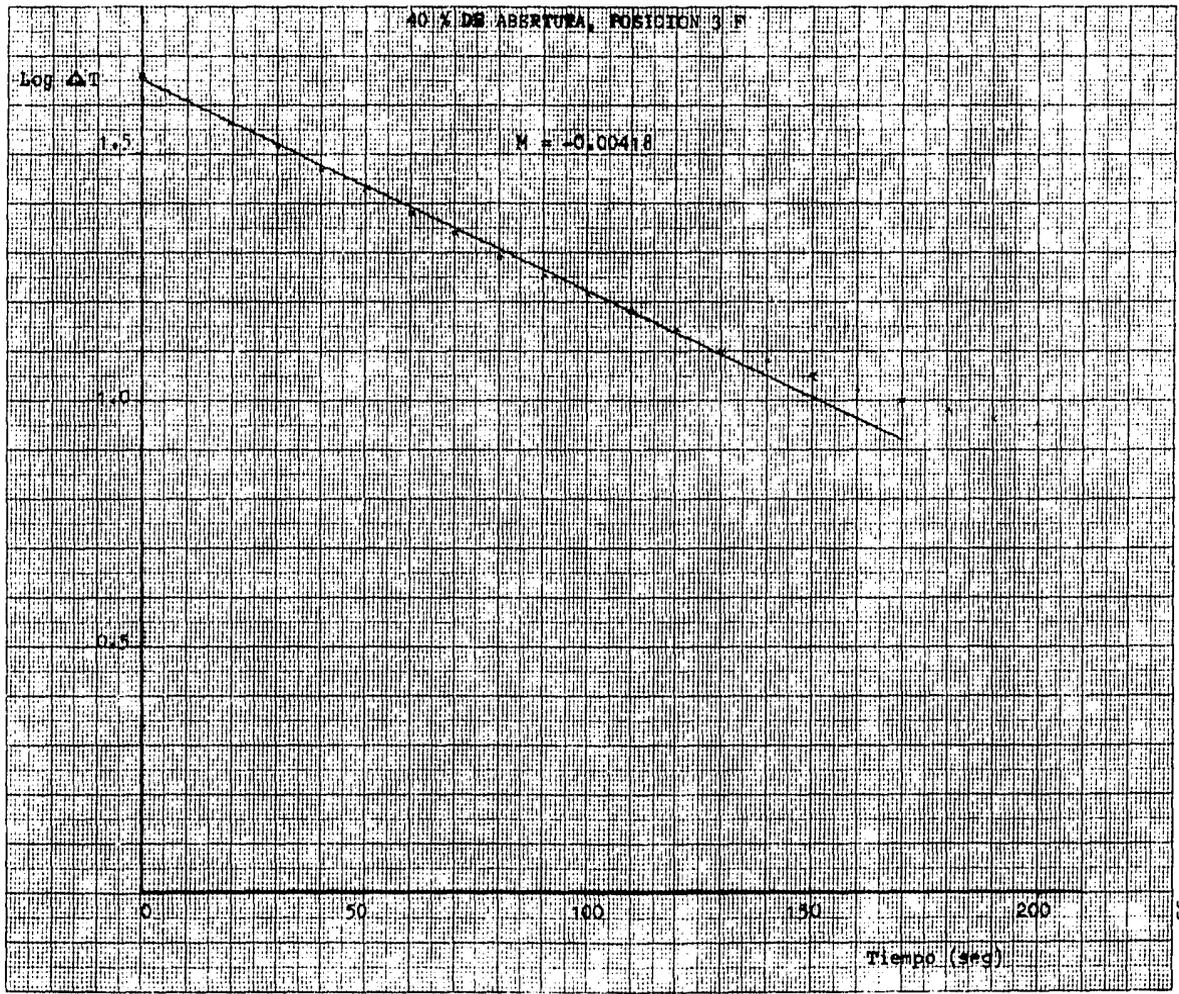
100

150

200

Tiempo (seg)

53



50 K DE ABERTURA, POSICION 2 G

Log A.T

1.5

$M = -0.00598$

1.0

0.5

0

50

100

150

200

Tiempo (seg)

6.0 % DE ABERTURA, POSICION A: 8

log ΔT

$m = -0.00427$

1.5

1.0

0.5

0

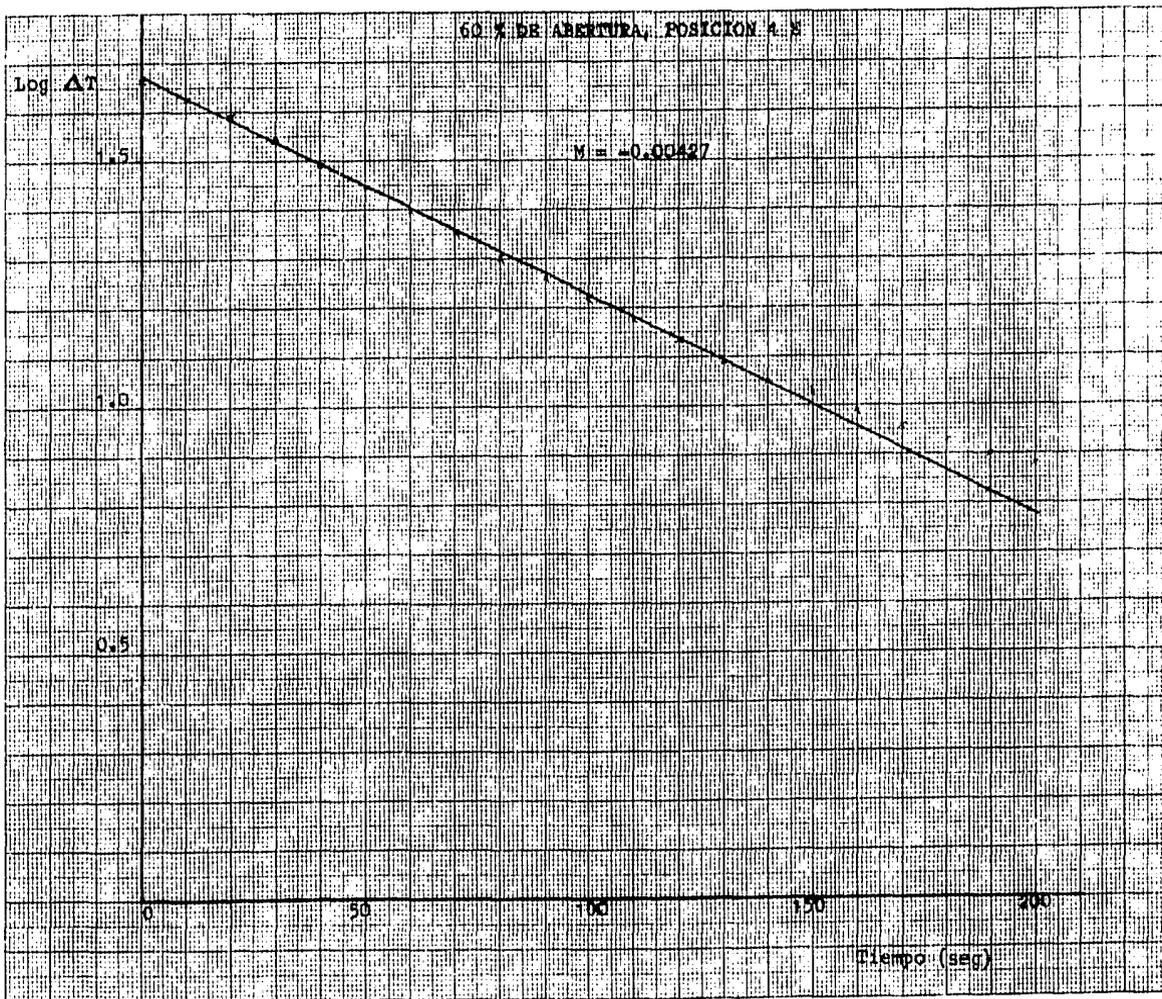
50

100

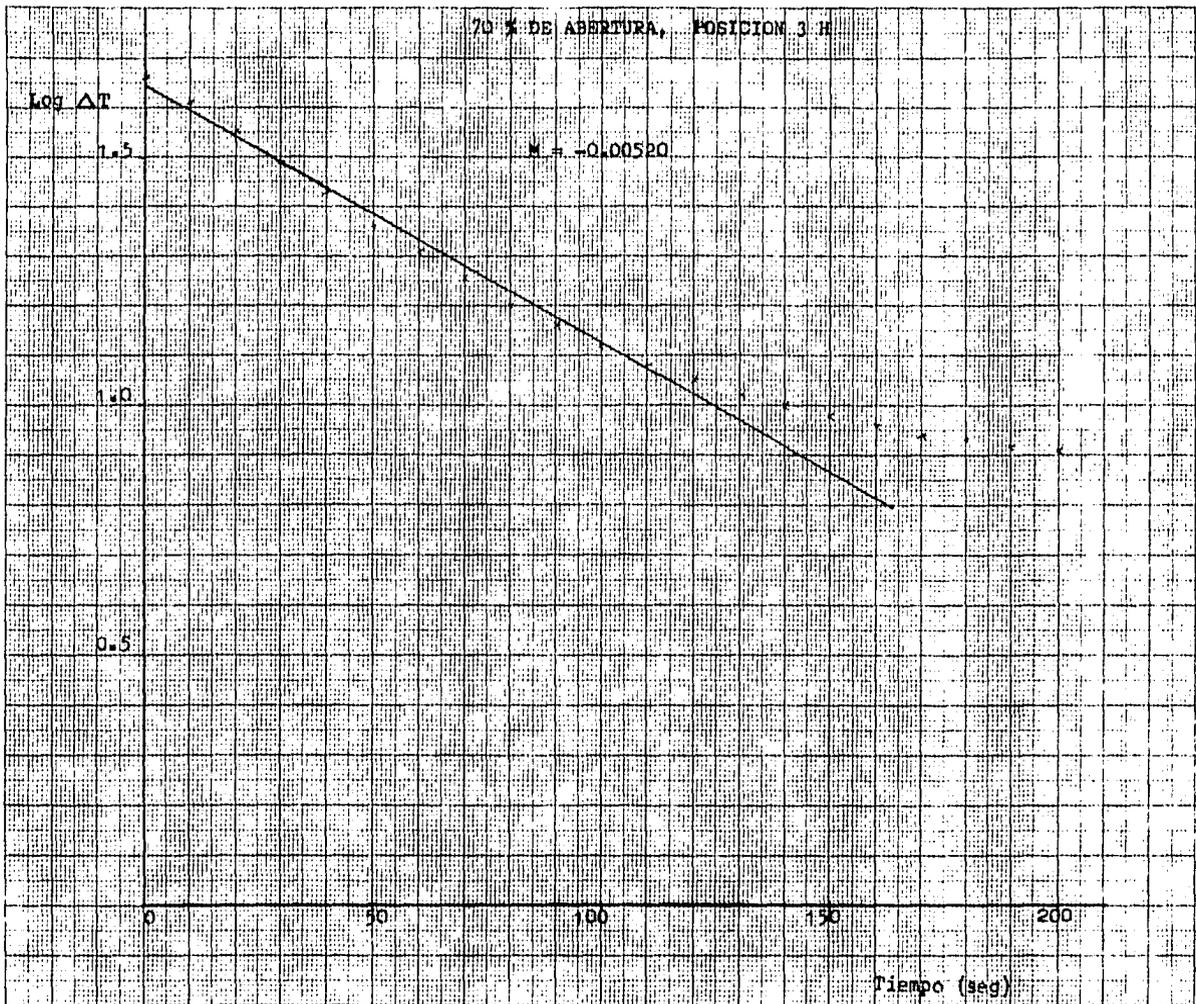
150

200

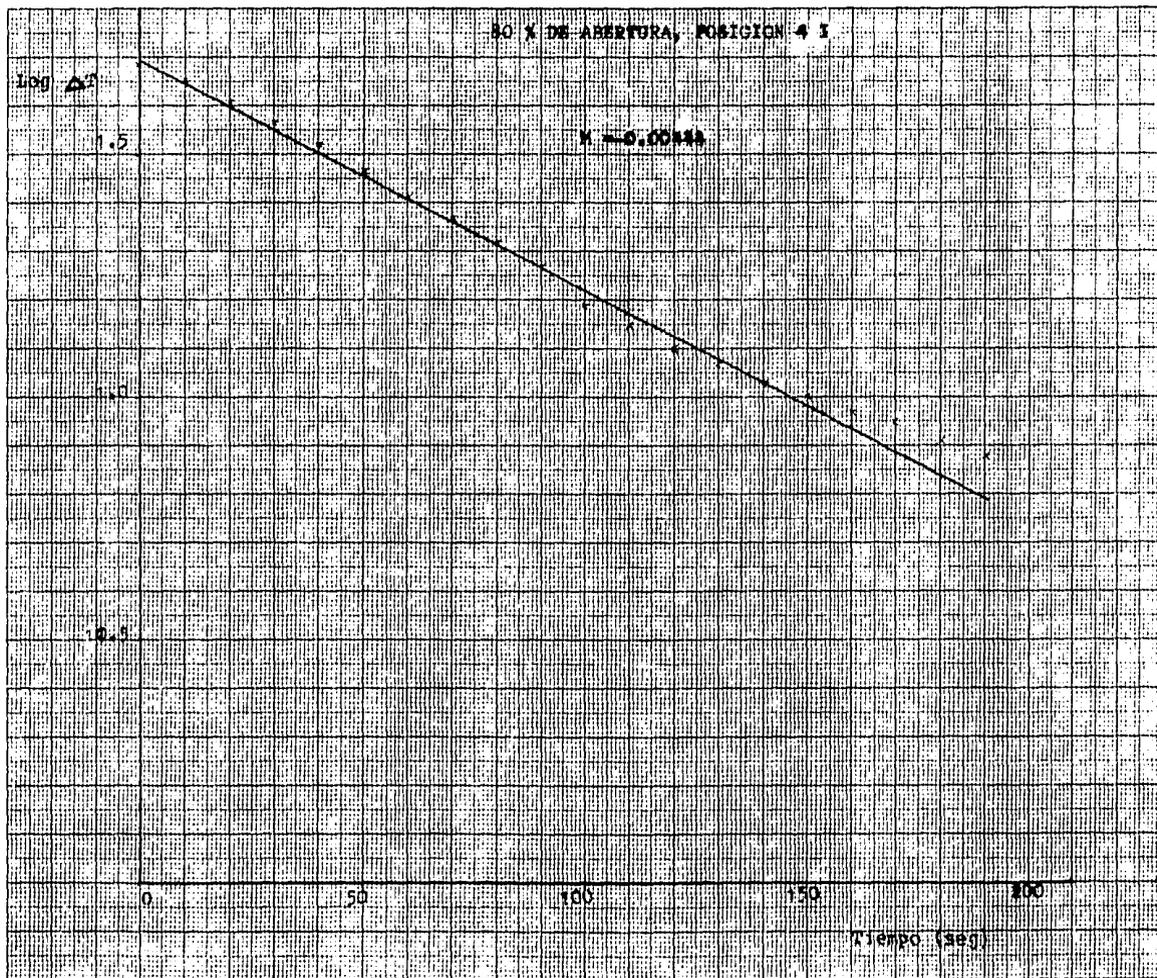
Tiempo (seg)



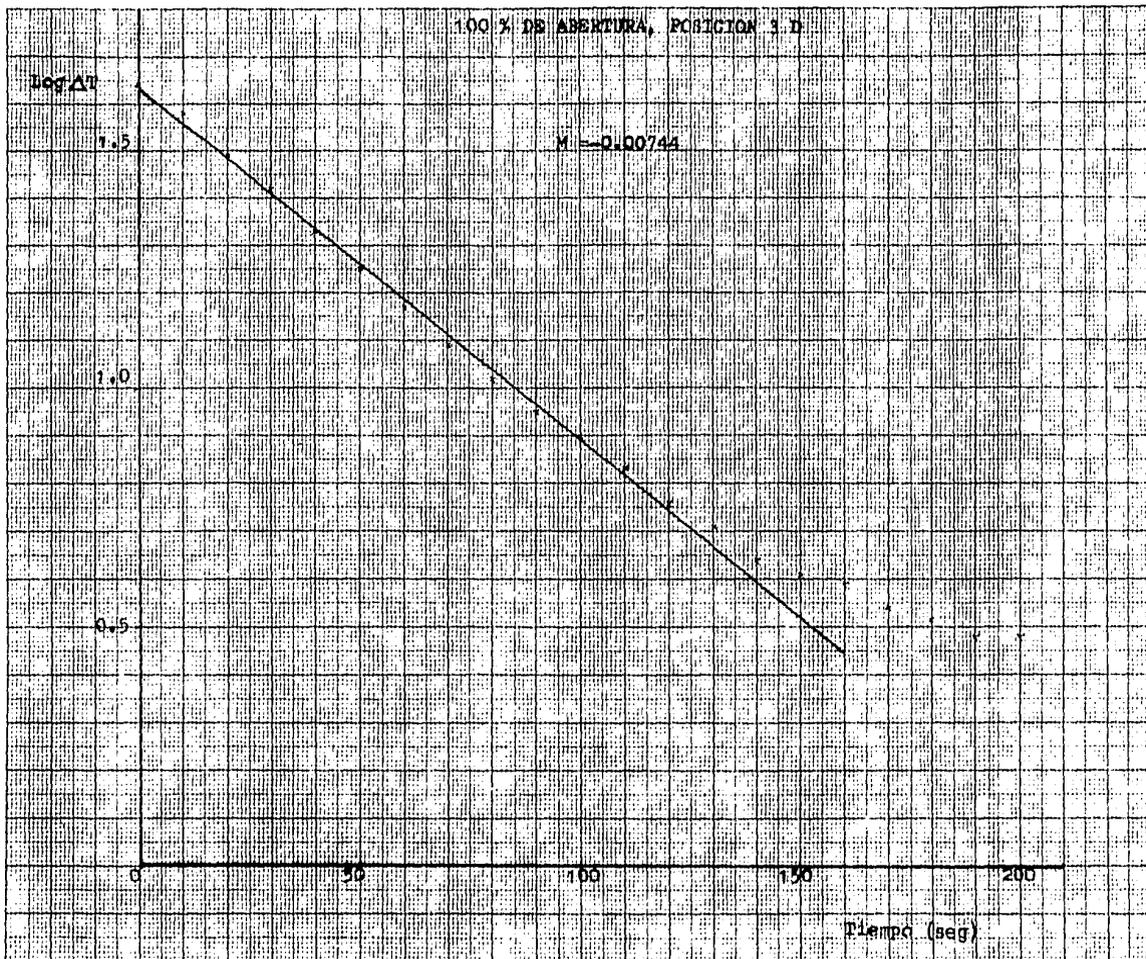
70 % DE ABERTURA, POSICION 3 H



50 X DE ABERTURA, POSICION 4 I



100 % DE ABERTURA, POSICION 1 D



TABLAS DE LOS RESULTADOS

PARA TODAS LAS CORRIDAS

REALIZADAS

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 1 B

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00304	290.15	0.11	11.05	70.37	34.13	7,122	0.70131
20 %	-0.00480	290.15	0.38	20.53	111.12	54.05	13,288	0.70131
30 %	-0.00490	291.15	0.58	25.41	113.43	55.81	16,355	0.70102
40 %	-0.00554	292.15	1.00	33.42	128.38	62.08	21,379	0.70097
50 %	-0.00701	291.65	1.30	38.07	162.32	78.83	24,432	0.70086
60 %	-0.00728	291.65	1.80	44.80	168.53	81.85	28,747	0.70086
70 %	-0.00780	291.65	2.00	47.23	180.57	87.42	30,306	0.70086
80 %	-0.00889	290.15	2.20	49.40	206.03	100.22	31,992	0.70131
100 %	-0.00979	291.15	3.00	57.84	224.00	108.45	37,114	0.70086

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 1 D

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00275	290.15	0.11	11.05	63.66	30.96	7,154	0.70131
20 %	-0.00488	290.15	0.38	20.53	113.02	54.97	13,289	0.70131
30 %	-0.00513	291.15	0.58	25.41	118.76	57.59	16,355	0.70102
40 %	-0.00558	292.15	1.00	33.42	129.31	62.53	21,379	0.70097
50 %	-0.00663	292.25	1.30	38.11	153.50	74.23	24,379	0.70097
60 %	-0.00688	291.65	1.80	44.80	159.27	74.32	28,747	0.70086
70 %	-0.00720	291.65	2.00	47.23	166.68	81.08	30,306	0.70086
80 %	-0.00856	290.15	2.20	49.40	198.16	96.16	31,992	0.70131
100 %	-0.00934	291.65	3.00	57.84	216.00	104.58	37,114	0.70086

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 1 F

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00304	291.15	0.11	11.06	70.37	34.13	7,122	0.70102
20 %	-0.00466	290.15	0.38	20.53	107.88	52.47	13,288	0.70131
30 %	-0.00493	291.15	0.58	25.41	114.13	55.34	16,355	0.70102
40 %	-0.00529	292.15	1.00	33.42	122.69	59.33	21,379	0.70097
50 %	-0.00616	292.15	1.30	38.07	142.60	68.96	24,432	0.70097
60 %	-0.00695	291.65	1.80	44.08	160.89	78.14	28,747	0.70086
70 %	-0.00739	291.65	2.00	47.23	171.31	82.94	30,306	0.70086
80 %	-0.00856	290.15	2.20	49.40	198.39	96.39	31,992	0.70131
100 %	-0.00890	291.15	3.00	57.84	206.10	99.75	37,114	0.70086

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 1 H

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00260	291.15	0.11	11.06	60.19	29.19	7,122	0.70102
20 %	-0.00480	290.15	0.38	20.53	11.12	54.05	13,288	0.70131
30 %	-0.00501	292.15	0.58	25.45	116.20	56.34	16,281	0.70097
40 %	-0.00540	292.15	1.00	33.42	125.01	60.45	21,379	0.70097
50 %	-0.00609	293.15	1.30	38.17	141.20	68.07	24,268	0.70069
60 %	-0.00660	290.15	1.80	44.69	152.79	74.32	28,941	0.70131
70 %	-0.00673	292.15	2.00	47.27	155.80	75.84	30,239	0.70097
80 %	-0.00829	290.15	2.20	49.40	192.14	93.46	31,992	0.70131
100 %	-0.00851	291.65	3.00	57.84	197.00	95.37	37,114	0.70086

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 2 A

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H _l cm H ₂ O	V _l m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00270	293.15	0.11	11.11	62.50	30.13	7,060	0.70069
20 %	-0.00466	290.15	0.38	20.53	107.88	52.47	13,289	0.70131
30 %	-0.00469	293.15	0.58	25.50	108.57	58.34	16,211	0.70069
40 %	-0.00523	293.15	1.00	33.48	121.07	58.36	21,286	0.70069
50 %	-0.00577	293.15	1.30	38.17	133.57	64.39	24,268	0.70069
60 %	-0.00642	291.15	1.80	44.76	148.85	72.18	28,810	0.70102
70 %	-0.00689	292.15	2.00	47.27	159.73	77.24	30,239	0.70097
80 %	-0.00672	290.15	2.20	49.40	155.79	75.78	31,992	0.70131
100 %	-0.00760	291.65	3.00	57.84	176.03	85.22	37,114	0.70086

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 2 C

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00290	293.15	0.11	11.10	63.14	32.36	7,059	0.70069
20 %	-0.00464	290.15	0.38	20.57	107.64	52.36	13,239	0.70131
30 %	-0.00470	293.15	0.58	25.50	109.03	52.56	16,211	0.70069
40 %	-0.00529	293.15	1.00	33.48	122.62	59.11	21,286	0.70069
50 %	-0.00600	293.15	1.30	38.17	139.13	67.07	24,268	0.70069
60 %	-0.00649	292.15	1.80	44.84	150.47	72.76	28,685	0.70097
70 %	-0.00654	292.15	2.00	47.27	151.63	73.32	30,239	0.70097
80 %	-0.00673	290.15	2.20	49.40	155.79	75.78	31,992	0.70131
100 %	-0.00760	291.65	3.00	57.84	176.00	85.21	37,114	0.70086

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 2 E

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00281	293.15	0.11	11.10	65.05	31.36	7,059	0.70069
20 %	-0.00464	290.15	0.38	20.57	107.64	52.36	13,239	0.70131
30 %	-0.00473	293.15	0.58	25.50	109.54	52.80	16,211	0.70069
40 %	-0.00510	293.15	1.00	33.48	118.06	56.91	21,286	0.70069
50 %	-0.00600	293.15	1.30	38.17	140.05	67.51	24,268	0.70069
60 %	-0.00689	291.15	1.80	44.76	159.74	77.45	28,810	0.70102
70 %	-0.00670	292.15	2.00	47.27	155.105	75.00	30,239	0.70097
80 %	-0.00670	290.15	2.20	49.40	155.33	75.55	31,992	0.70131
100 %	-0.00820	292.15	3.00	57.89	189.83	91.80	37,032	0.70095

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 2 G

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00340	291.15	0.11	11.06	78.94	38.27	7,122	0.70102
20 %	-0.00433	291.15	0.38	20.57	104.64	50.60	13,239	0.70102
30 %	-0.00465	293.15	0.58	25.49	107.64	51.89	16,211	0.70069
40 %	-0.00515	293.15	1.00	33.48	119.20	57.46	21,286	0.70069
50 %	-0.00598	293.15	1.30	38.17	138.50	66.79	24,268	0.70069
60 %	-0.00659	291.15	1.80	44.70	152.79	74.09	28,810	0.70102
70 %	-0.00674	292.65	2.00	47.31	156.03	75.33	30,171	0.70085
80 %	-0.00605	290.15	2.20	49.40	140.19	68.19	31,992	0.70131
100 %	-0.00777	292.15	3.00	57.89	180.01	87.05	37,032	0.70097

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 2 I

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00340	292.15	0.11	11.09	78.94	38.18	7,091	0.70097
20 %	-0.00447	291.15	0.38	20.57	103.50	50.05	13,239	0.70102
30 %	-0.00465	293.65	0.58	25.52	107.64	51.81	16,174	0.70061
40 %	-0.00511	293.15	1.00	33.48	118.30	57.00	21,286	0.70069
50 %	-0.00604	293.15	1.30	38.17	140.05	67.51	24,268	0.70069
60 %	-0.00643	292.15	1.80	44.84	148.85	71.98	28,685	0.70097
70 %	-0.00646	292.65	2.00	47.31	149.55	72.20	30,171	0.70085
80 %	-0.00676	291.65	2.20	49.53	156.55	75.76	31,782	0.70086
100 %	-0.00780	292.15	3.00	57.89	180.63	87.35	37,782	0.70097

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 3 B

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00285	292.15	0.11	11.09	65.90	31.86	7,091	0.70097
20 %	-0.00346	293.15	0.38	20.64	80.33	38.72	13,123	0.70069
30 %	-0.00427	294.15	0.58	25.54	99.06	47.60	16,141	0.70064
40 %	-0.00434	292.15	1.00	33.42	100.47	48.58	21,380	0.70097
50 %	-0.00490	293.15	1.30	38.17	113.66	54.76	24,268	0.70069
60 %	-0.00529	293.15	1.80	44.84	122.69	59.14	28,520	0.70069
70 %	-0.00543	291.65	2.00	47.23	125.70	60.85	30,306	0.70086
80 %	-0.00568	291.65	2.20	49.53	131.49	63.66	31,782	0.70086
100 %	-0.00763	292.15	3.00	57.89	176.63	85.41	37,032	0.70097

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 3 D

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h ₁ J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00285	292.65	0.11	11.09	65.90	31.81	7,091	0.70085
20 %	-0.00391	292.15	0.38	20.60	90.51	43.77	13,178	0.70097
30 %	-0.00385	294.15	0.58	25.54	89.35	42.95	16,140	0.70064
40 %	-0.00416	294.15	1.00	33.54	96.30	46.29	21,196	0.70064
50 %	-0.00523	294.15	1.30	38.24	121.07	58.20	24,167	0.70064
60 %	-0.00546	293.15	1.80	44.84	126.63	60.95	28,520	0.70069
70 %	-0.00530	291.65	2.00	47.23	127.32	61.83	30,306	0.70086
80 %	-0.00573	292.15	2.20	49.53	132.64	64.14	31,782	0.70097
100 %	-0.00744	292.15	3.00	57.89	172.21	83.10	37,032	0.70097

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 3 F

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00233	293.15	0.11	11.10	53.94	26.00	7,059	0.70069
20 %	-0.00375	292.65	0.38	20.62	86.81	42.00	13,151	0.70085
30 %	-0.00381	294.15	0.58	25.54	88.20	42.40	16,140	0.70064
40 %	-0.00418	294.15	1.00	33.54	96.76	46.51	21,196	0.70064
50 %	-0.00511	294.15	1.30	38.24	118.29	56.87	24,167	0.70064
60 %	-0.00526	293.15	1.80	44.84	121.86	58.74	28,519	0.70069
70 %	-0.00546	292.15	2.00	47.27	126.60	61.22	30,240	0.70097
80 %	-0.00574	292.15	2.20	49.57	132.88	64.26	31,711	0.70097
100 %	-0.00760	292.15	3.00	57.89	176.03	85.12	37,032	0.70097

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 3 R

ABERTURA	PENDEENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00276	293.15	0.11	11.10	63.89	30.80	7,059	0.70069
20 %	-0.00384	293.15	0.38	20.64	88.89	42.85	13,123	0.70069
30 %	-0.00389	294.15	0.58	25.54	90.05	43.29	16,140	0.70064
40 %	-0.00417	294.15	1.00	33.54	96.58	46.43	21,196	0.70064
50 %	-0.00500	294.15	1.30	38.24	115.75	55.65	24,167	0.70064
60 %	-0.00502	293.15	1.80	44.84	116.21	56.02	28,520	0.70069
70 %	-0.00520	292.65	2.00	47.31	120.38	58.12	30,171	0.70085
80 %	-0.00548	292.15	2.20	49.57	127.04	61.43	31,711	0.70097
100 %	-0.00763	293.15	3.00	57.99	176.06	84.60	36,870	0.70069

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 4 A

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00237	293.15	0.11	11.10	54.86	26.44	7,059	0.70069
20 %	-0.00305	293.15	0.38	20.64	70.60	34.03	13,122	0.70069
30 %	-0.00345	291.15	0.58	25.41	79.86	38.72	16,355	0.70102
40 %	-0.00397	294.15	1.00	33.54	91.90	44.16	21,196	0.70064
50%	-0.00403	294.15	1.30	38.24	93.26	44.83	24,167	0.70064
60 %	-0.00420	293.15	1.80	44.84	97.23	46.87	28,519	0.70069
70 %	-0.00432	294.15	2.00	47.42	100.19	48.16	29,969	0.70064
80 %	-0.00435	292.15	2.20	49.57	100.70	48.69	31,711	0.70097
100 %	-0.00588	293.15	3.00	57.99	136.07	65.60	36,869	0.70069

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 4 C

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00233	293.15	0.11	11.10	53.94	26.00	7,059	0.70069
20 %	-0.00305	293.15	0.38	20.64	70.60	34.00	13,122	0.70069
30 %	-0.00339	291.15	0.58	25.41	78.47	38.05	16,355	0.70102
40 %	-0.00399	294.15	1.00	33.54	92.36	44.40	21,197	0.70064
50 %	-0.00413	294.15	1.30	38.24	95.61	45.95	24,167	0.70064
60 %	-0.00420	293.15	1.80	44.84	97.23	46.87	28,520	0.70061
70 %	-0.00435	292.65	2.00	47.31	100.70	48.34	30,171	0.70085
80 %	-0.00458	292.15	2.20	49.57	106.18	51.04	31,711	0.70097
100 %	-0.00620	293.15	3.00	57.99	143.53	69.19	36,870	0.70069

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 4 E

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h ₁ J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00230	293.15	0.11	11.10	53.80	26.00	7,059	0.70069
20 %	-0.00277	293.15	0.38	20.64	64.12	30.90	13,122	0.70069
30 %	-0.00335	291.15	0.58	25.41	77.78	37.71	16,355	0.70102
40 %	-0.00380	294.15	1.00	33.54	87.97	42.27	21,197	0.70064
50 %	-0.00426	292.15	1.30	38.11	98.62	47.69	24,381	0.70087
60 %	-0.00427	293.15	1.80	44.84	98.85	47.65	28,519	0.70069
70 %	-0.00440	294.15	2.00	47.42	101.86	48.97	29,969	0.70064
80 %	-0.00480	292.15	2.20	49.57	103.85	49.92	31,711	0.70097
100 %	-0.00630	293.15	3.00	57.99	145.84	70.30	36,870	0.70069

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

POSICION 4 G

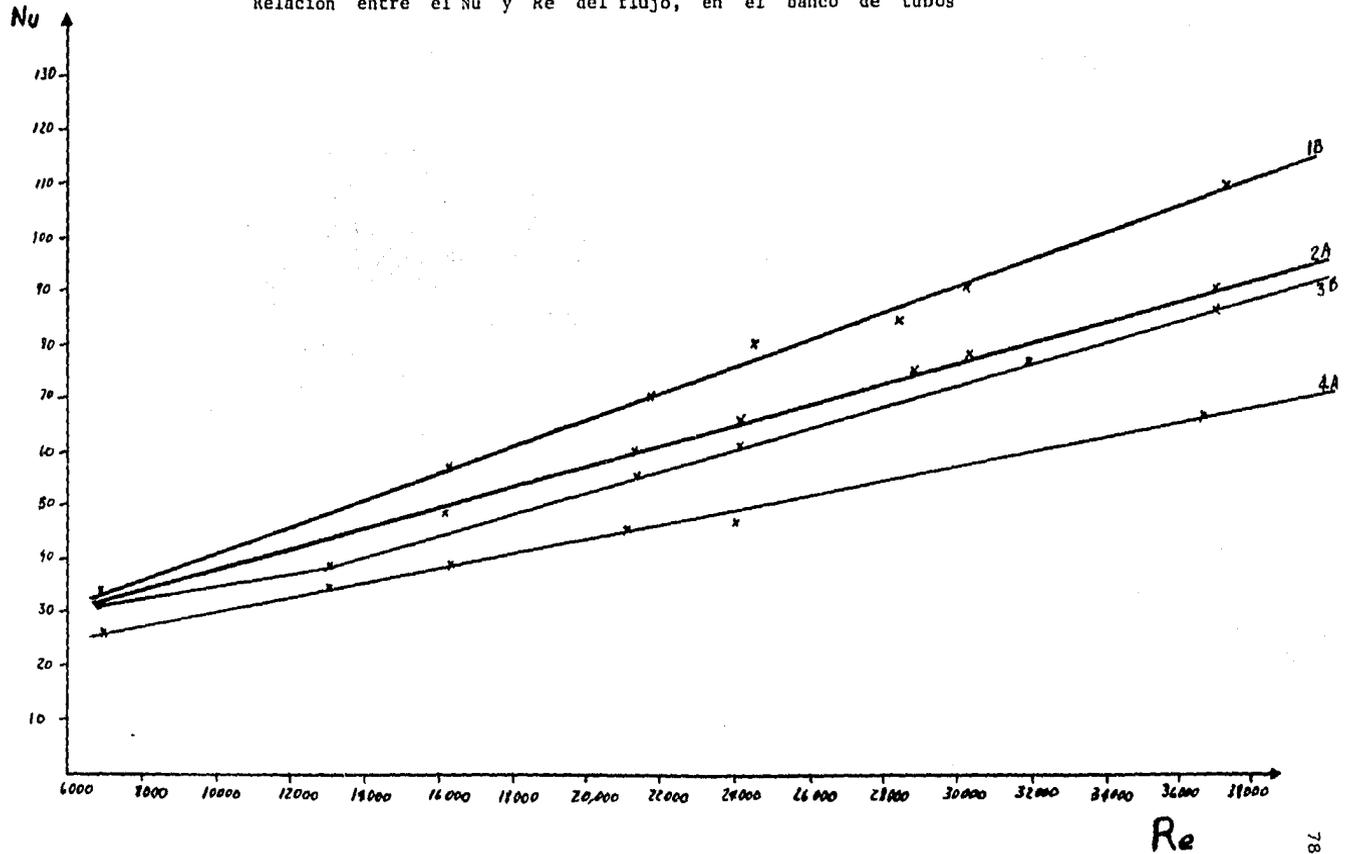
ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00237	293.15	0.11	11.10	54.86	26.44	7,059	0.70069
20 %	-0.00271	293.15	0.38	20.64	64.12	30.90	13,122	0.70069
30 %	-0.00324	291.15	0.58	25.41	75.00	36.36	16,355	0.70102
40 %	-0.00380	294.15	1.00	33.54	87.97	42.27	21,197	0.70064
50 %	-0.00407	292.15	1.30	38.11	94.22	45.29	24,380	0.70097
60 %	-0.00417	293.15	1.80	44.84	96.53	46.68	28,519	0.70069
70 %	-0.00435	294.15	2.00	47.42	100.70	48.54	29,969	0.70064
80 %	-0.00466	292.15	2.20	49.57	107.88	51.87	31,711	0.70097
100 %	-0.00578	293.15	3.00	57.99	133.80	64.50	36,870	0.70069

RESULTADOS DE LAS CORRIDAS REALIZADAS

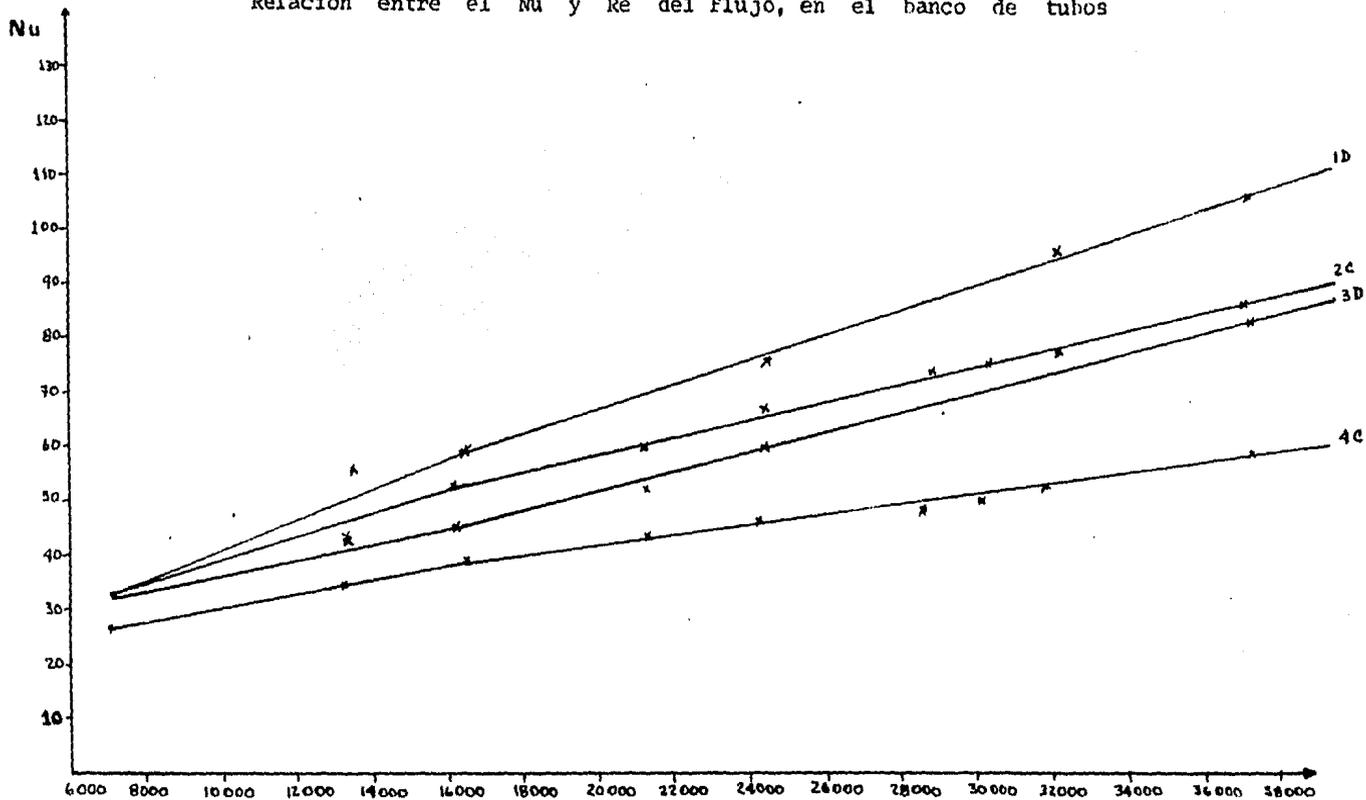
POSICION 4 I

ABERTURA	PENDIENTE	Ta °K	H ₁ cm H ₂ O	V ₁ m/s	h J/m ² °C	Nu	Re	Pr
10 %	-0.00217	293.15	0.11	11.10	50.23	24.21	7,059	0.70069
20 %	-0.00332	293.15	0.38	20.64	76.81	37.24	13,122	0.70069
30 %	-0.00356	291.15	0.58	25.41	82.41	39.73	16,355	0.70102
40 %	-0.00387	294.15	1.00	33.54	89.59	43.05	21,197	0.70064
50 %	-0.00410	292.15	1.30	38.54	95.10	45.72	24,380	0.70097
60 %	-0.00416	293.15	1.80	44.84	96.38	46.12	28,519	0.70069
70 %	-0.00440	294.15	2.00	47.42	101.86	49.11	29,969	0.70064
80 %	-0.00444	292.15	2.20	49.57	102.53	49.59	31,711	0.70097
100 %	-0.00570	293.15	3.00	57.99	131.95	63.61	36,870	0.70069

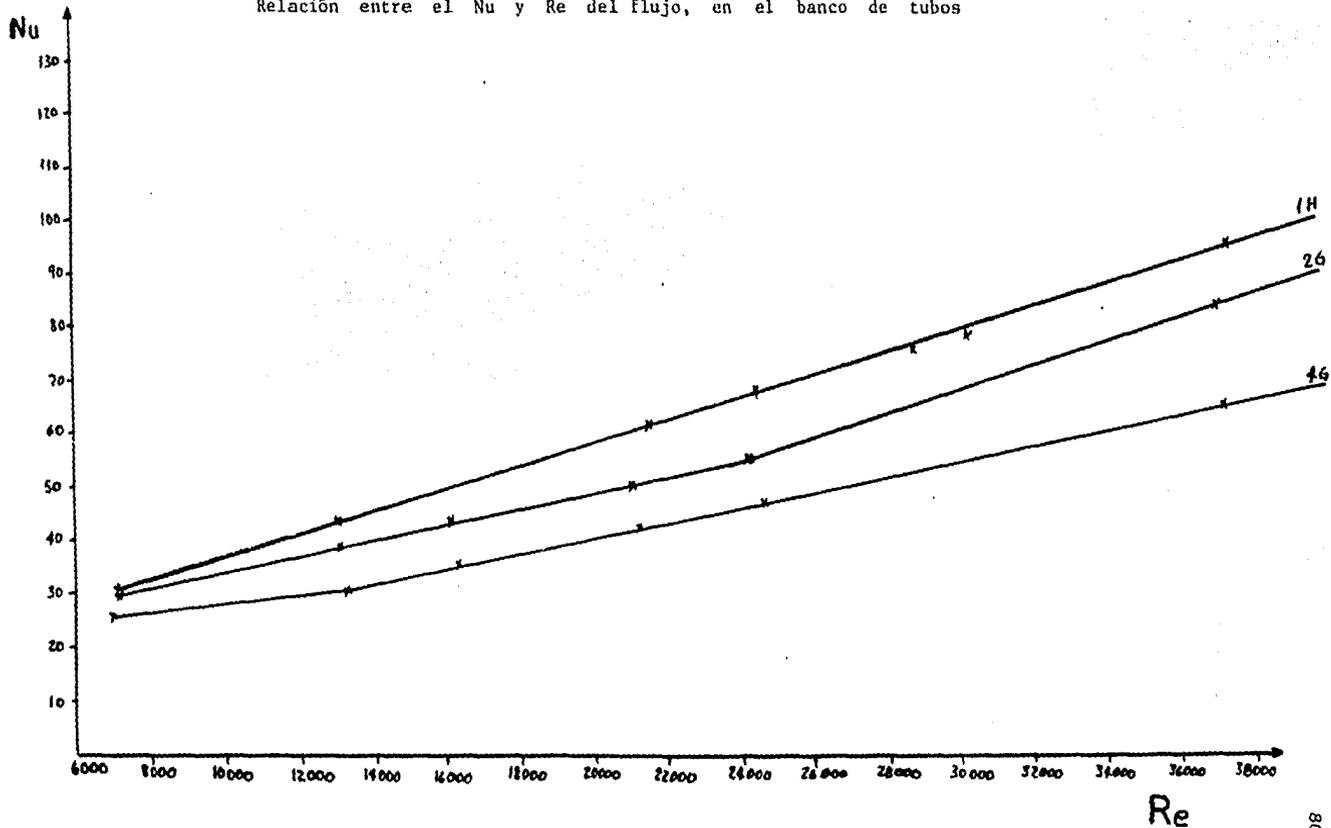
Relación entre el Nu y Re del flujo, en el banco de tubos



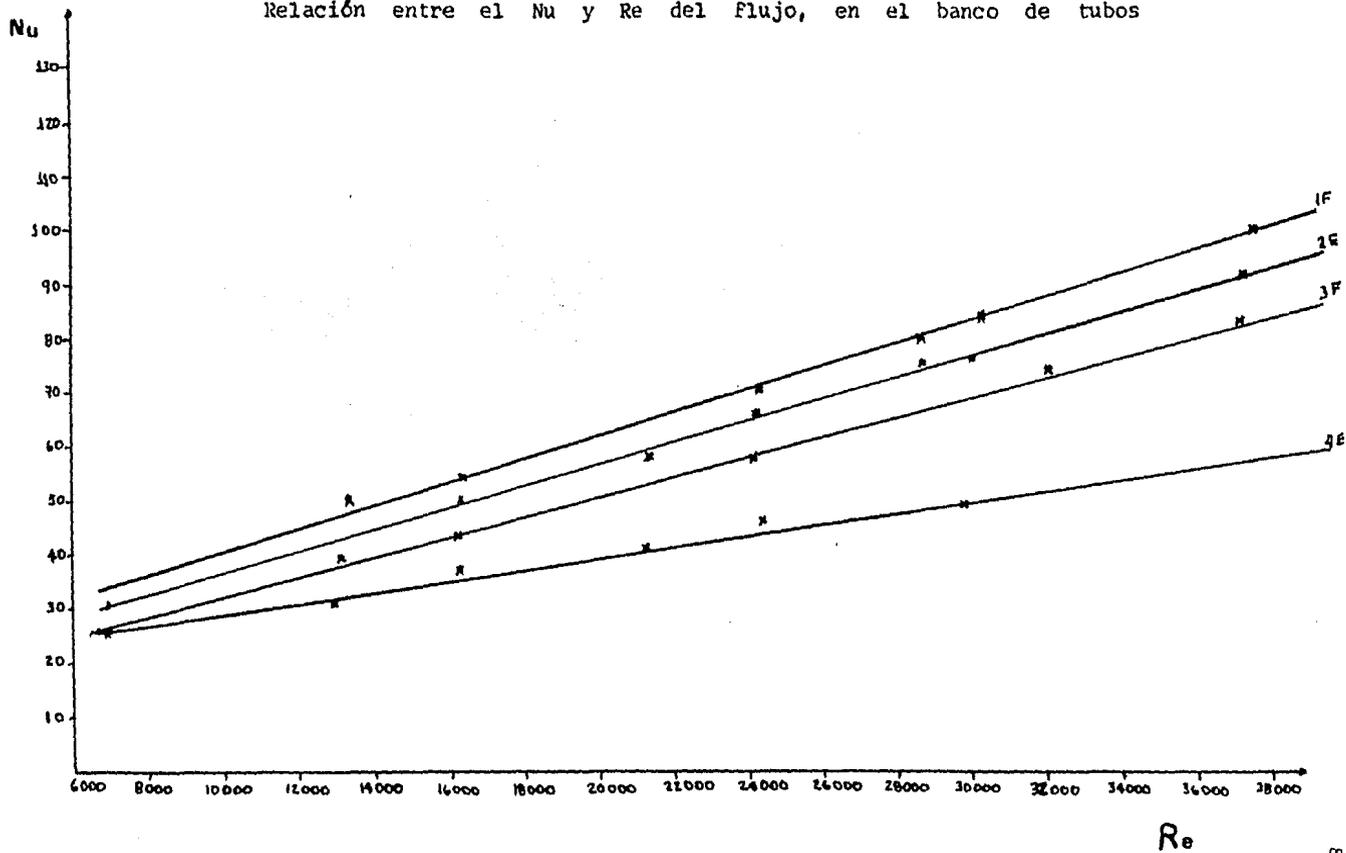
Relación entre el Nu y Re del flujo, en el banco de tubos



Relación entre el Nu y Re del flujo, en el banco de tubos

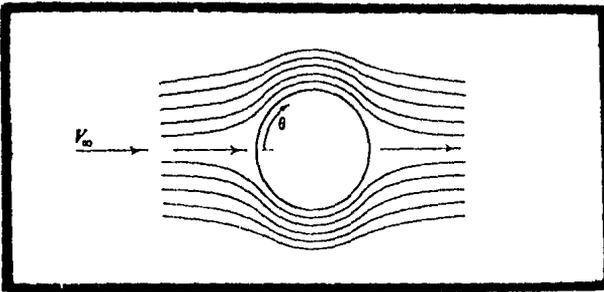


Relación entre el Nu y Re del Flujo, en el banco de tubos



5. MANUAL DE PRACTICA

"INTERCAMBIADOR DE CALOR DE FLUJO CRUZADO"



FACULTAD DE QUIMICA
DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES
Area de Ingeniería.



"INTERCAMBIADOR DE CALOR DE FLUJO CRUZADO"

1. OBJETIVOS:

Manejar el equipo correctamente así como los instrumentos que acompañan a este, como son: los manómetros, el gráficator, el tubo pitot.

Obtener el coeficiente de transferencia de calor de un elemento cilíndrico de cobre caliente que intercambia calor con el aire en un arreglo a flujo cruzado y por convección forzada.

2. INTRODUCCION:

Los cambiadores de calor utilizados por los ingenieros químicos no pueden caracterizarse por un solo diseño; ya que las variedades de cada equipo son prácticamente ilimitadas; sin embargo, la única característica en común de la mayor parte de los cambiadores de calor, es que la transferencia se hace de una fase caliente, a una fase fría y que las dos fases están separadas mediante una frontera sólida.

2. GENERALIDADES:

La transferencia de calor puede definirse como la transmisión de energía de una región a otra, por una diferencia de temperatura existente entre ellas.

La literatura sobre transferencia de calor generalmente reconoce tres modos de transmisión de calor que son: Conducción, Radiación y Convección, hablando únicamente de la conducción y de la radiación estos deberían ser clasificados como procesos de transferencia de calor, porque solamente estos dos mecanismos dependen para su operación de la existencia de una diferencia de temperatura. La convección, no cumple estrictamente con la definición de transferencia de calor, porque para su operación también depende del transportista mecánico de masa. Pero, puesto que en la convección también se efectúa transmisión de energía desde regiones de temperatura más alta a regiones de menor temperatura, ha sido aceptado el término "transferencia de calor por convección".

En muchas situaciones que se presentan en la naturaleza, el calor fluye no por uno, si no por varios de estos mecanismos que actúan en forma simultánea. Es particularmente importante en ingeniería conocer la intervención de los diferentes modos de transferencia de calor, en virtud de que en la práctica, cuando uno de los mecanismos domina cuantitativamente, se obtiene soluciones útiles aproximadas, despreciando el efecto de los otros dos en el proceso. Sin embargo, un cambio de condiciones externas exigirá que uno o ambos de los mecanismos previamente despreciados sean tomados en cuenta.

Conducción:

La conducción es un proceso mediante el cual fluye el calor desde una región de alta temperatura a una región de temperatura baja dentro de un medio (sólido, líquido ó gaseoso) o entre medios diferentes en contacto físico directo. En este mecanismo la energía se transfiere por comunicación molécula directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas.

Radiación:

La radiación es un proceso por el cual fluye calor desde un cuerpo de alta temperatura a un cuerpo de baja temperatura, cuando éstos están separados por un espacio que incluso puede ser el vacío. El término "radiación" es generalmente aplicado a todas las clases de fenómenos de ondas electromagnéticas, pero en transferencia de calor únicamente son de interés, los fenómenos que son resultado de un gradiente de temperatura, y por medio de los cuales se establece un transporte de energía a través de un medio transparente o a través del espacio. La energía transmitida en esta forma recibe el nombre de calor radiante.

Convección:

La convección es un proceso de transporte de energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. La convección tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido ó un gas.

La transferencia de calor por convección se clasifica, de acuerdo con la forma de inducir el flujo, en convección libre y convección forzada. Cuando se presenta el mecanismo de mezclado exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causados por los gradientes de temperatura, se habla de convección natural ó libre. Cuando el movimiento de mezclado es inducido por algún agente externo, tal como una bomba o agitador, el proceso se conoce como convección forzada.

La eficiencia de la transferencia de calor por convección depende básicamente del movimiento de mezclado del flujo. Como consecuencia, un estudio de la transferencia de calor por convección se basa en el conocimiento de las características del flujo del fluido.

Secuencia de cálculo para obtener el coeficiente de transferencia de calor:

Se considera que las pérdidas totales de calor del elemento de cobre cilíndrico se transfieren al aire y que los gradientes de temperatura dentro del elemento son despreciables, de tal manera que el termopar incrustado en el centro nos

dá una indicación verdadera de la temperatura de la superficie efectiva. Una cierta cantidad de calor es conducida del elemento hacia las piezas de extensión plásticas. La extensión de este efecto ha sido determinada haciendo pruebas comparativas usando elementos de cobre de diámetro idéntico pero de longitud variable. De estas pruebas el área adicional equivalente representada por las extensiones plásticas se han calculado y se ha determinado la longitud verdadera del elemento para dar una longitud efectiva la que será usada en los cálculos. Esta corrección es del orden de 8.4 mm por lo que tendremos:

$$l_1 = l + 0.0084$$

y podremos calcular el área superficial efectiva del elemento:

$$A_1 = \pi d l_1$$

De la definición del coeficiente de transferencia de calor, la rapidez de transmisión de calor del elemento al aire esta dada por:

$$q = h A_1 (T - T_a) \quad (1b)$$

donde:

h = es el coeficiente de transferencia de calor (J/ms²°C)

A_1 = es el área efectiva del elemento (m²)

T = es la temperatura del elemento (°C)

T_a = es la temperatura del aire (°C)

En un período de tiempo dt la caída de temperatura estará dada por:

$$- q dt = mc dT \quad (2b)$$

que es el calor perdido por el elemento, si ahora despejamos q (el calor) nos da:

$$q = - mc dT/dt \quad (3b)$$

donde:

m = es la masa del elemento (kg)

c = es el calor específico del elemento de cobre (J/Kg°C)

Si ahora igualamos las ecuaciones (1b) y (3b) tendremos:

$$h A_1 (T - T_a) = - mc dT/dt$$

reacomodando los términos de esta ecuación nos queda:

$$-\frac{dT}{(T - T_a)} = \frac{hA_1 dt}{mc} \quad (4b)$$

integrando la ecuación (4b) tendremos:

$$\ln(T - T_a) - \ln(T_0 - T_a) = -\frac{hA_1 t}{mc} \quad (5b)$$

donde:

T = es la temperatura del elemento

T_a = es la temperatura del aire

T₀ = es la temperatura del elemento al tiempo cero.

Si de la Ec. (5b) graficamos, $\ln(T - T_a)$ contra t nos dará una línea recta con pendiente $-hA_1/mc$ y por lo tanto si conocemos los valores de A_1 , m , c , en en tonces podemos calcular el coeficiente de transferencia de calor h .

En la práctica es más conveniente graficar el $\log_{10}(T - T_a)$ contra t , ent onces dado que el $\ln N = 2.3026 \log_{10} N$, el coeficiente de transferencia de calor está relacionado con la pendiente M de ésta línea por la expresión:

$$h = -2.3026 \frac{mc}{A_1} M \quad (6b)$$

Con el fin de establecer la velocidad efectiva del aire pasando en el elemento, es necesario calcular la velocidad de la corriente ascendente de la presión dinámica.

La velocidad V_1 desarrollada por un gas de densidad ρ , que se expande libremente bajo la influencia de una diferencia de presión ΔP , cuando ΔP es lo suficientemente pequeña como en el caso estudiado, la compresibilidad será despreciable y está dada por:

$$\frac{\rho V_1^2}{2} = P \quad (7b)$$

La presión dinámica H_1 , se mide en centímetros de agua y como, 1 cm H₂O es igual a 98.1 N/m², la Ec. (7b) se convierte en:

$$\frac{\rho V_1^2}{2} = 98.1 H_1 \quad (8b)$$

La densidad del aire bajo la presión P_a y la temperatura T_a está dada por:-

$$\frac{Pa Mo}{\rho} = RTa \quad (9b)$$

Pa y Ta, son respectivamente presión y temperatura ambiente y R es la constante de los gases; $R = 8314 \text{ (m}^3 \text{ (N/m}^2\text{) / Kgmol } ^\circ\text{K)}$.

Si ahora de la Ec. (8b) despejamos V_1 tendremos:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \times 98.1 H_1}{\rho}} \quad (10b)$$

Y de la Ec. (9b) despejamos a la densidad tendremos:

$$\rho = \frac{Pa Mo}{RTa} \quad (11b)$$

Sustituyendo la ecuación (11b) en la ecuación (10b) nos queda:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \times 98.1 H_1 RTa}{Pa Mo}}$$

si sustituimos el valor de R y Mo = 29 Kg/Kmol la ecuación anterior se reduce a la siguiente:

$$V_1 = 237.2 \sqrt{\frac{H_1 Ta}{Pa}} \quad (12b)$$

Esta Ec. (12b), es útil cuando los cálculos de la velocidad efectiva a través del banco de tubos se hacen en base al área mínima de flujo. Cuando todos los tubos están instalados, ésta área mínima aparece en un plano transversal incluyendo una columna de 5 tubos, de tal manera que los tubos tienen un diámetro de 1.25 cm y una anchura de la sección-trabajo de 12.5 cm, el área efectiva es la mitad del área de la sección de trabajo y por lo tanto:

$$V = 2 V_1 \quad (13b)$$

Quando un elemento simple está siendo estudiado, el área de flujo es 9/10 de área total de la sección-trabajo y tenemos:

$$V = 10/9 V_1 \quad (14b)$$

La teoría de la transferencia de calor convectiva predice que el coeficiente de transferencia de calor h , es una función de V y de las variables independientes; d, ρ, C_p, μ, K .

El análisis dimensional muestra que las relaciones entre h y las variables independientes pueden ser expresadas en la siguiente forma:

$$\frac{hd}{K} = f \left(\frac{Vd\rho}{\mu}, \frac{C_p\mu}{K} \right)$$

Estos grupos adimensionales son conocidos respectivamente como:

$$\text{Número de Nusselt} = hd/K \quad (15b)$$

$$\text{Número de Reynolds} = Vd\rho/\mu \quad (16b)$$

$$\text{Número de Prandtl} = C_p\mu/K \quad (17b)$$

En la práctica el número de Prandtl es prácticamente constante para los gases bajo un intervalo bastante amplio de condiciones y la rapidez de transferencia de calor es efectivamente una función del número de Reynolds.

3. DESCRIPCION DEL EQUIPO:

El aparato está diseñado para estudiar el fenómeno de transferencia de calor, asociado con el paso de aire en los tubos cilíndricos arreglados en forma separada o en bancos de varias configuraciones.

Esencialmente está constituido por una sección-trabajo, que tiene 18 espacios distribuidos en 4 columnas, por está se hace pasar aire suministrado por un ventilador. Dentro de la sección-trabajo se insertan varillas cilíndricas de material plástico (que forman el banco de tubos) colocadas en posición perpendicular a la dirección del flujo, simulando un intercambiador de calor típico de flujo cruzado.

Uno de los espacios, disponibles dentro de la sección-trabajo para varillas será ocupado por un elemento cilíndrico de cobre puro de 10 cm de longitud; cuando haya sido calentado, su temperatura se registrará por un termopar instalado en el centro del mismo.

El elemento se calienta con una resistencia eléctrica cilíndrica que se encuentra en la parte inferior de la sección-trabajo pero separada de esta; a la resistencia se suministra corriente de bajo voltaje (120 volts) desde un rectificador llevando la temperatura del elemento hasta un máximo de 80°C.

Se tiene un graficador de temperatura contra tiempo en el cual se trazarán las curvas de enfriamiento que se obtengan en cada experimentación. El potenciómetro registrará la diferencia de temperatura entre la junta caliente empotrada en el elemento de cobre y la junta fría en la corriente de aire a la entrada de la sección-trabajo. La temperatura inicial del aire es indicada por un termómetro de mercurio (de vidrio) a la entrada del aire.

El aparato incluye un ventilador centrífugo accionado por un moto eléctrico de 1 HP de tiro inducido y que tiene su entrada conectada a la sección-trabajo. El aire entra al aparato por una boca tipo campana, pasando por una zona de transición a la sección-trabajo y después a la entrada del ventilador pasando por un panal para uniformizar el flujo evitando la transmisión de remolinos del escape del ventilador hacia la sección-trabajo. El ventilador descarga a una válvula graduada de compuerta por medio de la cual se deberá regular la velocidad del aire a través del aparato.

Se dispone de un tubo "pitot" para explorar el flujo de aire de la corriente arriba del banco de tubos y que debe colocarse en dirección perpendicular tanto al flujo de aire como a los ejes del elemento. El tubo pitot puede localizarse a todo lo ancho de la sección trabajo para investigar el perfil de velocidad en la sección, en el momento deseado.

Se disponen de orificios fijos que permiten leer en el manómetro la presión estática. La velocidad arriba del banco de tubos es sensiblemente constante y se mide la presión estática en la boca de campana.

La presión dinámica en el aparato alcanza de 75 mm de agua. Se cuenta con un manómetro inclinado que tiene un intervalo de esa magnitud y para una mayor precisión, puede usarse un micromanómetro electrónico.

El aparato se monta en una estructura tubular de acero en posición horizontal tiene un gabinete integral con interruptor principal, una estación de botones (paro-arranque del ventilador) y un interruptor de control para la resistencia de calentamiento.

Los termopares en el elemento de cobre y a la entrada del aire, son de cobre y constantán (aleación de cobre-niquel) y se cuenta con una tabla para este tipo de termopar para relacionar los microvolts a grados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), para las curvas de enfriamiento que se obtienen.

Dentro de un intervalo de 0 - 50°C de diferencia de temperatura, la característica de los termopares es aproximadamente lineal de:

$$1^{\circ}\text{C} = 0.041 \text{ mV} \quad \delta \quad 1 \text{ mV} = 24.4^{\circ}\text{C}.$$

El equipo debe conectarse a un suministro de energía eléctrica de 125 Volts a 60 ciclos, debe asegurarse que el ventilador gire en la dirección correcta, esta es, en la dirección de las manecillas del reloj viendo el motor por su parte final.

4. TECNICA DE OPERACION:

- a) Colocar dentro de la sección-trabajo, las varillas plásticas que formarán el banco de tubos.
- b) En la parte superior de la sección se taparán los agujeros que no sean ocupados después de colocar el tubo "pitot", con los tapones plásticos de color negro
- c) Seleccionar el manómetro que será usado en la práctica, en el caso de ser el manómetro inclinado, instalarlo en la parte correspondiente para éste y calibrarlo adecuadamente, si se usa el micromanómetro colocarlo de preferencia en la parte de abajo para tener más seguridad y estabilidad.
- d) Colocar en la parte superior del tubo pitot una de las ramas de el manómetro (la mangera), la otra rama del manómetro deberá colocarse al orificio de toma de presión estática localizada en la tapa inferior de la sección-trabajo.
- e) Seleccionar mediante la válvula de compuerta de entrada de aire la abertura deseada dependiendo del % de aire con que se desee trabajar que puede ser de 10 a 100 %.
- f) Colocar los cables para detectar la diferencia de temperatura, en la entrada de aire y en el elemento de cobre, conectarlos al registrador, poniendo las puntas negativas en el lugar correspondientes y las positivas de igual manera, en el caso de que no esten bien conectadas la puntilla caminara hacia el lado izquierdo del graficador, debe conectarse de nuevo de tal manera que camine del lado derecho.
- g) Debe seleccionarse la sensibilidad, la velocidad con que correrá la carta en el graficador y antes de emesar la corrida experimental hay que calibrarlo a cero, cuando los dos termopares se encuentren a temperatura ambiente.
- h) Se conecta el interruptor y se calienta el elemento de cobre incertandolo en el calentador eléctrico. La temperatura de éste se ira registrando en el graficador y debe relacionarse la longitud de la carta a lo ancho con los milivols de sensibilidad escogidos para saber en que rango de temperatura se esta trabajando (ejemplo: si se trabaja con 2 mV de sensibilidad, lo ancho de la carta es de 12.5 y al relacionarlos, significa que a los 12.5 cm se tienen 2 mV que al pasarlos a °C mediante la tabla correspondiente se tienen cerca de 60°C).
- i) Una vez caliente el elemento de cobre se incerta en la sección-trabajo en la posición seleccionada, el cual va a remplazar una de las varillas plásticas.
- j) Se hace funcionar el ventilador y la perilla del registrador para que corra

la carta automáticamente y pueda graficarse la curva de enfriamiento, haga ésto lo más rápido posible para obtener una buena curva.

k) Repetir la experimentación, variando la posición del elemento y % de abertura de la válvula, para obtener varias curvas de enfriamiento, por lo menos 6.

5. TRABAJO POSTERIOR A LA REALIZACION DE LA PRACTICA:

- a) De las curvas de enfriamiento obtenidas, pase los datos obtenidos a unidades de ΔT y tiempo ($^{\circ}C$, seg), con ayuda de la tabla que relaciona los microvolts grados centigrados para el termopar utilizado.
- b) Hacer una gráfica de $\log \Delta T$ contra tiempo (seg).
- c) Calcule el coeficiente de transferencia de calor.
- d) Calcule el Número Nusselt.
- e) Calcule el Número de Reynolds.
- f) Calcule el Número de Prandtl.
- g) Hacer una gráfica de Nu contra Re , (si se trabajo en una misma columna con diferentes flujos de aire).

6. BIBLIOGRAFIA:

- 1.- José A. Manrique, Ph. D.- Transferencia de calor. Harla, S.A. de C.V. México, 1978.
- 2.- Frank Kreith.- Principios de transferencia de calor. Herrero Hermanos Sucesores S.A. México, 1978.
- 3.- Martínez Arguello Ma. Gpe.- Tesis. "Diseño de una práctica para el laboratorio de ingeniería química sobre un intercambiador de calor de flujo cruzado". México, 1985.
- 4.- William M., Mc. Adams.- Transmisión de calor. McGraw Hill. 3^a edición.

CUESTIONARIO

"INTERCAMBIADOR DE CALOR DE FLUJO CRUZADO"

Nombre del alumno (a): _____

Grupo: _____

- 1.- Explique que es la transferencia de calor.
- 2.- Cuantos y cuales son los mecanismos de la transferencia de calor.
- 3.- De algunos ejemplos donde se presente la convección forzada.
- 4.- Que es el coeficiente de transferencia de calor y como puede obtenerse.
- 5.- Que parámetros interfieren en el coeficiente de transferencia de calor y como se afecta éste.
- 6.- Como influye un flujo turbulento en el valor del coeficiente de transferencia de calor.
- 7.- Como cree usted que varien los grupos adimensionales; Nu , Re y Pr , en este experimento. Y en caso de gases de cual de ellos es función la rapidez de transferencia de calor.
- 8.- Enuncie la ecuación de Hilpert; que establece el Nusselt como función del Reynolds en el caso de flujo de aire perpendicular a un tubo único y diga como varían el exponente (n) y el coeficiente (B) de la ecuación al aumentar el Reynolds.
- 9.- En que consiste un banco de tubos colocados al tresbolillo ó escaqueado y en filas alineadas; haga un esquema para cada caso.
- 10.- Para los arreglos anteriores de tubos, si manejamos una misma corriente de aire, como se espera que varíe el coeficiente de transferencia de calor.
- 11.- Si manejamos aire a una temperatura de 93°C y un Reynolds de 1000 a 50000 que ecuación podríamos utilizar para calcular el coeficiente de transferencia

cia de calor promedio.

12.- Puede describir como funciona un ventilador centrifugo.

13.- Cual es la función de un manómetro y cuales son sus partes fundamentales.

14.- Podria decir si es factible elaborar un líquido manométrico y si éste puede sustituir a los que se utilizan para los manómetros del laboratorio.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El propósito planteado al inicio de este trabajo consistió en poner en funcionamiento un equipo de transferencia de calor, de reciente adquisición; lo cual se logró. Además se experimentó con él para proponer una práctica para el laboratorio de Momentum y Calor, denominada: "Intercambiador de calor de flujo cruzado".

Como se esperaba hipotéticamente los resultados experimentales indican que el coeficiente de transferencia de calor se incrementa al aumentar el flujo de aire y consecuentemente el número de Reynolds y el número de Nusselt se incrementan.

Por otra parte, si se analizan los valores del coeficiente de transferencia de calor, cambiando la posición del tubo de cobre en una misma columna, se observa que no hay mucha variación (ejemplo en: 1B, 1D, 1F, 1H), pero conforme se coloca el tubo corriente arriba de la zona de trabajo el coeficiente va aumentando (como puede verse en: 4A, 3B, 2A, 1B), esto es debido a la interacción de los elementos de plástico (tubos) con el aire, e incrementa la turbulencia.

El experimento es sencillo ya que se trata de la simulación de un proceso. Pero lo que se pretende es que el alumno tenga un concepto más amplio del mecanismo de transferencia de calor por convección forzada y pueda analizarlo al manejar en el equipo diferentes variables (cantidad de flujo de aire, posición del elemento) y ver los efectos de estas en el coeficiente. Debido a que dicho mecanismo es muy importante en los problemas de transferencia de calor en la ingeniería química, y con esto el alumno podrá darle una mejor interpretación en la práctica profesional.

Durante el desarrollo de esta práctica el alumno podrá trabajar con los diferentes instrumentos de medición con que cuenta dicho equipo como son: gráfico de temperatura contra tiempo, tubo pitot, manómetros diferenciales con líquidos manométricos de baja densidad y micromanómetro electrónico.

Todos los instrumentos de medición de este equipo cuenta con el instructivo correspondiente por lo que es recomendable que los profesores se familiaricen -

con estos a fin de utilizar los instrumentos adecuadamente en otras prácticas, - instruyendo a los alumnos en su correcta operación.

Se recomienda la construcción de varios elementos de trabajo con diferentes metales que sustituyan al elemento de cobre, incertando termopares en forma similar al actual y haciendo las pruebas necesarias para una correcta operación, para esto es conveniente recurrir al centro de instrumentos para optimizar su calidad.

Con la finalidad de minimizar o eliminar importaciones ya que se trata de un equipo inglés, se recomienda que en cuanto a las partes o refacciones del equipo se investigue su existencia en el mercado nacional, sustitución o fabricación de estas como puede ser: líquidos manométricos, barras plásticas, papel para el gragficador, fusibles, etc., ya que mediante el uso pueden agotarse o estropearse.

Se sugiere seguir experimentando en éste equipo para complementar este trabajo, ya que por fallas en el graficador no se pudo trabajar haciendo diverso arreglos en el banco de tubos y observar si habia variación en el coeficiente - de transferencia de calor.

BIBLIOGRAFIA

1. Colburn, A.P., Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 29, 174 - 210, (1933).
2. Comings, E.W., J. T. Clapp, y J.F. Taylor, Ind. Eng. Chem., 40, p 1076-82, (1948).
3. Donald Q. Kern.- Procesos de transferencia de Calor. Compañía Editorial Continental, S.A. México 1980.
4. Drew, T.B., y W. P. Ryan, Ind. Eng. Chem., 23, p 945-953, (1931). Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 26, p 118-147, (1931).
5. Frank Kreith.- Principios de transferencia de calor. Herrero Hermanos, Sucesores, S.A., México 1978.
6. Gibson, A.H., Phil. Mag., (6), 47, 324 (1924).
7. Grimisón. E. D., Trans. ASME? 59, p 583-594, (1937), 60, p 381-392, (1938).
8. Hilpert, R, Forsch. Gebiete Ingenieurw, 4, p 215-224 (1933).
9. Hüge, E. C., Trans. ASME, 59, p 573-581 (1937).
10. Hughes, J.A., Phil. Mag., (6), 31, 118 (1916).
11. José A. Manrique, Ph. D.- Transferencia de calor. Harla, S.A. de C.V., México 1978.
12. Kennelly, A.E., y H.S. Sanborn, Proc. Am. Phil. Soc., 53, 55-77 (1914).
13. Kennelly, A.E., C.A. Wright, y J.S. van Bylevelt, Trans. AI EE, 28, 363-393 (1909).
14. Kerr, E. W., Trans. ASME, 38, 67, (1916).
15. King, L. V., Trans. Roy. Soc. (london), A214, 373 (1914).

16. Kramers, H., *Physica*, 12, p 61-80 (1946).
17. Lohris, W. "Handbuch der Experimental Physik", 1929., Vol. 9, Pt. 1, p 299, 302,303 *Mitt. Forsch*, 322, 1 (1929).
18. M. Necati Ozisik.- *Transferencia de calor*. McGraw-Hill, México 1980.
19. Maisel, D.S., y T.K. Sherwood, *Chem. Eng. Prog.*, 46, p 131-138 (1950).
20. Maisel, D.S., y T.K. Sherwood, *Chem. Eng. Prog.*, 46, p 172-175 (1950).
21. Paltz, W. J., y C.E. Starr, *Thesis in Chemical Engineering Massachusetts - Institute of Technology*, 1931.
22. Piersón, O.L., *Trans. ASME*, 59, p 563-572 (1937).
23. Prandtl, L. *Engineering*, 123, 627 (1927); *Natl. Advisory Comm, Aeronaut., Tech. Mem.* 452 (1928).
24. Ray, B.B., *Proc, Indian Assoc. Cualtivation Sci*, 5, 95, (1920).
25. Reiher, H., *Mitt. Forsch.* 269, 1-85 (1925).
26. Rubach, H.L., *Mitt. Forsch*, 185, 1-35 (1916).
27. Thomson, A. S. T., A. W. Scott, A. Mck, Laird, y H.S. Holden, "Proceedings of the general discussion on heat transfer", pp. 177-180, *Institution of Mechanical Engineers, London y American Society of Mechanical Engineers, New York*, 1951.
28. Tucker, W.E., *S.M. Thesis in Chemical Engineering, Massachusetts. Institute of Technology*, 1936.
29. William M., Mc Adams.- *Transmisión de Calor*. McGraw-Hill. Tercera edición.