



30061 D
4
20

UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE QUIMICA

INCORPORADA A LA U. N. A. M.

**DISEÑO DE PRACTICAS DE LABORATORIO SOBRE
TRANSFERENCIA DE CALOR POR EBULLICION
PARA EL LABORATORIO DE FISICA DE LA
UNIVERSIDAD LA SALLE**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
JOAQUIN FERNANDO GOMEZ RUIZ**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	PAGINA
PROLOGO	i
1. GENERALIDADES TEORICAS	1
1.1 Introducción, 2	
1.1.1 Fase, 2	
1.1.2 Cambio de Fase, 2	
1.1.3 Vaporización y Ebullición, 3	
1.2 Procesos de Transferencia de Calor	4
1.2.1 Transferencia de Calor, 4	
1.2.2 Teorías del Calor, 4	
1.2.3 Mecanismos de Transferencia de Calor, 6	
1.2.3.1 Conducción, 6	
1.2.3.2 Convección, 8	
1.2.3.3 Radiación, 8	
1.2.4 Procesos de Transferencia de Calor, 9	
1.2.5 Mecanismos de Cambio de Fase Líquido-vapor, 11	
1.3. Análisis Dimensional	15
1.3.1 Correlaciones para la predicción de coeficientes de transferencia de calor por ebullición, 27	

1.3.1.1	Ebullición Pelicular, 27	
1.3.1.2	Ebullición Nucleada, 29	
1.3.2	Mecanismos de Condensación, 33	
1.3.3	Correlaciones para la predicción de coeficientes de transferencia de calor por condensación, 36	
1.3.3.1	Condensación Pelicular, 36	
1.4	Flujo Máximo de Calor	40
1.5	Factores que afectan la velocidad de transferencia de calor por vaporización	44
1.6	Nomenclatura y Unidades	45
2.	DESCRIPCION DEL EQUIPO	48
2.1	Diagrama Esquemático	49
2.2	Especificaciones Técnicas	50
2.2.1	Cilindro de Ebullición/Condensación, 50	
2.2.2	Calentador, 50	
2.2.3	Medida de temperatura, 50	
2.2.4	Manómetro, 51	
2.2.5	Conte de alta presión, 51	
2.2.6	Transformador variable, 51	

2.2.7	Serpentín Condensador, 51	
2.2.8	Corte de alta temperatura, 51	
2.2.9	Medida del caudal de agua, 51	
2.2.10	Voltímetro, 52	
2.2.11	Ampérmetro, 52	
2.2.12	Conmutador, 52	
2.2.13	Servicios requeridos, 52	
2.3	Descripción del aparato	52
2.3.1	Seguridad, 53	
2.4	Instrucciones de funcionamiento	54
2.4.1	Carga, 54	
2.4.2	Purga, 55	
2.4.3	Precauciones, 55	
2.4.3.1	Durante el uso, 56	
2.4.3.2	Corte de alta temperatura Ether, 56	
2.4.3.3	Después del uso, 56	
2.4.4	Observación, 57	
2.5	Notas Adicionales	58

	PAGINA
3. EXPERIMENTACION	60
3.1 Nota	61
3.2 Experimento N° 1. Demostración visual de los tres diferentes tipos de ebullición	62
3.2.1 Objetivo, 62	
3.2.2 Secuencia, observaciones y conclusiones, 62	
3.3 Experimento N° 2. Determinación del coeficiente de transferencia de calor sobre la superficie calefactora	68
3.3.1 Objetivo, 68	
3.3.2 Secuencia, 68	
3.3.3 Observaciones, 71	
3.3.4 Tratamiento de datos, 72	
3.3.5 Comentarios, 77	
3.3.6 Análisis de resultados, 105	
3.3.7 Conclusiones y recomendaciones, 106	
3.4 Experimento N° 3. Efecto de la presión en el calor crítico en la Ebullición	109
3.4.1 Objetivo, 109	
3.4.2 Secuencia, 109	
3.4.3 Tratamiento de datos, 111	
3.4.4 Comentarios, 112	
3.4.5 Análisis de resultados, 114	
3.4.6 Conclusiones y recomendaciones, 128	

3.5	Experimento N° 4. Determinación del Coeficiente de transferencia de calor total dentro del sistema (cilindro ebullición-condensación)	133
3.5.1	Objetivo, 133	
3.5.2	Secuencia, 133	
3.5.3	Tratamiento de datos, 138	
3.5.4	Conclusiones y recomendaciones, 143	
4.	DISEÑO DE PRACTICAS	145
4.1	Práctica N° 1. Demostración visual de los diferentes tipos de ebullición	146
4.2	Práctica N° 2. Determinación del coeficiente de transferencia de calor sobre la superficie calefactora	159
4.3	Práctica N° 3. Efecto de la presión en el flujo de calor crítico en la ebullición	187
4.4	Práctica N° 4. Determinación del coeficiente de transferencia de calor total dentro del sistema (cilindro ebullición-condensación)	202
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	220
6.	BIBLIOGRAFIA	230

ANEXOS: A - Diagrama P-H para el tricloro fluoro metano
B - Propiedades físicas del tricloro fluoro metano

PROLOGO

"...la comprensión comenzó a disi
par la confusión y se empezó a re
velar el pleno poder y cabal sig-
nificado de los conceptos funda-
mentales."

La filosofía de un Ingeniero Químico es estar siempre -
orgulloso de su versatilidad y amplios conocimientos.

La necesidad de ver realizada íntegramente esta filoso-
fía implica familiarizar al estudiante con un número sufi-
ciente de conceptos fundamentales de la Ingeniería Química.

La Psicología Educativa moderna establece dos princi-
pios fundamentales para lograr un aprendizaje integral del -
estudiante. El primer principio se basa en la preparación -
de materiales didácticos, tales como libros y textos progra-
mados, y en una instrucción a un ritmo dictado por el propio
estudiante. Una de las ideas básicas consiste en que el es-
tudiante debe familiarizarse con los principios y tópicos --
fundamentales antes de enfrentarse a los conceptos más com-
plejos. El segundo principio de la Psicología Educativa -
moderna consiste en reforzar la experiencia del aprendizaje,

proporcionando una práctica detallada después de cada nuevo principio. Se sabe, por experiencia, que existe un gran abismo entre el hecho de que un estudiante comprenda algún principio y el que pueda desarrollar su habilidad para aplicarlo.

Debido a lo anterior, la Universidad La Salle ha procurado reducir ese abismo, proporcionando al estudiante equipo de laboratorio que pueda solventar esta necesidad.

Para tales efectos se ha adquirido la Unidad de Transferencia de Calor por Ebullición H652/S, que tiene la capacidad de demostrar visualmente los tipos de vaporización existentes, de determinar los coeficientes de transferencia de calor, de visualizar el efecto de la presión en el flujo de calor crítico y de mostrar el tipo de condensación pelicular.

Esto hace necesario preparar prácticas que logren un óptimo aprovechamiento de la capacidad del equipo, para que el estudiante aproveche al máximo, clarificando mejor los conceptos teóricos adquiridos.

1. GENERALIDADES TEÓRICAS

1.1 INTRODUCCION

1.1.1 FASE

Una fase es una región uniforme en un sistema, esto significa composición química uniforme y propiedades físicas -- uniformes. Por tanto, un sistema que contiene líquido y vapor tiene dos regiones de uniformidad. En la fase del vapor la densidad es uniforme a través de toda ella. En la fase líquida la densidad es uniforme a través de la misma pero -- tiene un valor diferente del de la fase del vapor.

1.1.2 CAMBIO DE FASE

Un fluido puede existir como gas, vapor, líquido o sólido. El cambio de líquido a vapor es conocido como proceso de vaporización, y el cambio de vapor a líquido es conocido como proceso de condensación. Las cantidades de calor involucradas en la condensación o vaporización de un kg. de fluido son idénticas. Para fluidos puros a una presión dada, el cambio de líquido a vapor o de vapor a líquido ocurre sólo a una temperatura, que es la temperatura de saturación o de -- equilibrio. Puesto que los cambios de transferencia de calor vapor-líquido usualmente ocurren a presión constante o -- casi constante en la industria, la vaporización o condensación de un compuesto simple normalmente se efectúa isotérmicamente.

1.1.3 VAPORIZACION Y EBULLICION

La vaporización es el cambio de fase de líquido a vapor que ocurre en la interfase líquido-vapor, situada en la superficie del líquido. El calor necesario para llevar a cabo este fenómeno se transfiere por líquido sobrecalentado que fluye de la superficie calefactora a la interfase líquido-vapor. El calor se transfiere en el líquido por convección.

Se conoce como ebullición al cambio de fase de líquido a vapor, pero que a diferencia de la vaporización, este cambio ocurre sobre la superficie del calefactor formando con esto burbujas de vapor, las que ascienden a la superficie del líquido.

1.2. PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

1.2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

La ciencia de la Termodinámica trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia. 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 respectivamente. Cuando se vaporiza un kilogramo de un líquido puro o se condensa un kilogramo del mismo, el cambio de energía en los dos procesos es idéntico. La velocidad a la que cualquiera de estos procesos puede hacerse progresar con una fuente o receptor independiente es, sin embargo, inherentemente muy diferente. Generalmente, la vaporización es un fenómeno mucho más rápido que la condensación.

1.2.2 TEORIAS DEL CALOR

El estudio de la transferencia de calor se facilita mediante la comprensión de la naturaleza del calor. Sin embargo, se han descubierto diferentes manifestaciones del calor, lo que ha impedido que una sola teoría abarque a todas ellas.

Las leyes que pueden aplicarse a transiciones de masa - pueden ser inaplicables a transiciones moleculares o atómicas, y aquéllas que son aplicables a bajas temperaturas pueden no serlo a altas temperaturas. Para propósitos de ingeniería es necesario comenzar el estudio de información básica acerca de algunos fenómenos. Las fases de una sustancia simple, sólida, líquida o gaseosa, están asociadas con su contenido de energía. En la fase sólida, las moléculas o átomos están muy cercanos, dando con esto rigidez. En la fase líquida existe suficiente energía térmica para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierde rigidez. En la fase gaseosa, la presencia de energía térmica adicional resulta en una separación relativamente completa de los átomos o moléculas, de manera que pueden permanecer en cualquier lugar de un espacio cerrado.

Para una sustancia en sus diferentes fases, sus varias propiedades térmicas tienen diferente orden de magnitud. Por ejemplo, el calor específico es muy - - -

bajo para los sólidos, alto para los líquidos y generalmente de valores intermedio para los gases. Asimismo, en cualquier cuerpo que absorba o pierda calor, deben guardarse especiales consideraciones respecto a si el cambio es de calor latente, o sensible, o de ambos. Más aún, se conoce que una fuente caliente es capaz de generar grandes excitaciones subatómicas, a tal grado que emite energía sin presentar contacto directo con el receptor, y éste es el principio fundamental de la radiación. Cada tipo de intercambio presenta peculiaridades específicas.

1.2.3 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Existen tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aún cuando muchas de las aplicaciones en ingeniería son combinaciones de dos a tres. Estas son: conducción, convección y radiación.

1.2.3.1 Conducción. La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo tal como una pared. La dirección del flujo de calor será en ángulos rectos a la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. Supóngase que una fuen

te de calor existe a la izquierda de la pared y que existe un receptor de calor en la superficie de la derecha. Es conocido y después se confirmará por una derivación, que el flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y al área (A) de la misma. Si t es la temperatura en cualquier punto de la pared y x es el grueso de la pared en dirección del flujo de calor, la cantidad de flujo de calor (dQ) está dada por:

$$dQ = kA \left| -\frac{dt}{dx} \right|$$

El término $(-dt/dx)$ se llama gradiente de temperatura y tiene un signo negativo si se supuso 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. Esta conductividad se evalúa experimentalmente. La conductividad térmica de los sólidos tiene un amplio rango de valores numéricos dependiendo de si el sólido es un buen conductor de calor, tal como un metal, o un mal conductor como el asbesto. Aún cuando la conducción

de calor se asocia generalmente con la transferencia de calor a través de los sólidos, también es aplicable a gases y líquidos, con sus limitaciones.

- 1.2.3.2 Convección. La convección es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido, por medio de mezcla. Este tipo de transferencia de calor puede ser descrito en una ecuación que imita la forma de la ecuación de conducción y está dada por:

$$dQ = h A dt$$

La constante de proporcionalidad h es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación, y debe ser evaluado experimentalmente; se llama coeficiente de transferencia de calor. Cuando se integra esta ecuación toma la siguiente forma:

$$Q = h A \Delta t$$

y se le conoce como la Ley del Enfriamiento de Newton.

- 1.2.3.3 Radiación. La radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor. Cuando la ra-

diación se emite desde una fuente hacia un receptor, parte de la energía se absorbe por éste y parte es reflejada. Basándose en la segunda ley de la termodinámica, Boltzmann estableció que la velocidad a la cual una fuente emite calor es:

$$dQ = \sigma \epsilon dAT^4$$

Esta ecuación se conoce como la Ley de la Cuarta Potencia, T es la temperatura absoluta, σ es una constante adimensional, ϵ es un factor peculiar a la radiación y se llama emisividad. La emisividad, igual que la conductividad térmica k , ó el coeficiente de transferencia de calor h , debe determinarse experimentalmente.

1.2.4 PROCESOS 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, tratados generalmente de manera independiente. Los procesos de transferencia de calor se relacionan con las formas de intercambio térmico, tales como los que ocurren en un 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, el potencial por el cual la transferencia de calor se lleva a cabo. Un problema típico de procesos de transferencia de calor involucra las cantidades de calor que deben transferirse, las formas 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 a la fuente del receptor, y la cantidad de energía mecánica que debe disiparse para facilitar la transferencia de calor. Puesto -- que la transferencia de calor se considera un intercambio en un sistema, la pérdida de calor por un cuerpo debe ser igual al calor absorbido por otro dentro de los confines del mismo sistema.

1.2.5 MECANISMOS DE CAMBIO DE FASE LIQUIDO-VAPOR

El cambio de fase de líquido a vapor se lleva a cabo -- por diferentes mecanismos, los cuales son:

- Vaporización Convectiva
- Ebullición Nucleada
- Ebullición Pelicular

La vaporización Convectiva se caracteriza porque el calor es transferido por el líquido sobrecalentado hasta la superficie en donde se encuentra la interfase líquido-vapor, en la cual se lleva a cabo la vaporización.

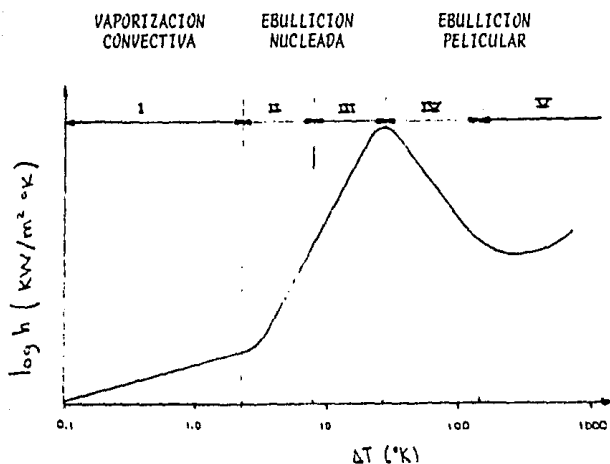
Las dos clases principales de ebullición son (1) ebullición nucleada y (2) ebullición pelicular. El primer tipo se observa por ejemplo cuando se calienta agua para preparar el o café, ésta es ebullición nucleada. En esta clase de ebullición el cambio de fase crea una multitud de burbujas. -- Cuando el flujo de calor se incrementa, estas burbujas son lo suficientemente grandes para formar una película continua de vapor en la superficie caliente, creando el régimen conocido como ebullición pelicular.

Una ilustración interesante de la ebullición pelicular

es el fenómeno de Leidenfrost, que consiste en vertir pequeñas cantidades de agua sobre la superficie de un plato caliente, las gotas comienzan a balancearse de arriba a abajo y de un lado a otro.

Leidenfrost explicó este comportamiento mediante el hecho de que al momento en que las gotas tocan la superficie caliente, se forma una película de vapor entre las gotas y la superficie, la cual mueve a la gota. Dado que la capa de vapor formada es relativamente un buen aislante del calor entre la gota y la superficie caliente, la transferencia de calor comienza a decrecer. La película de vapor se adelgaza hasta que la gota tiene contacto nuevamente con la superficie caliente, y el agua se vuelve a evaporar, repitiéndose este fenómeno hasta que el agua contenida en la gota se ha evaporado completamente.

Podemos ilustrar los mecanismos comunes de ebullición, considerando el caso de un alambre de platino sumergido en agua, a través del cual pasa una corriente eléctrica. En ese caso se obtendrían resultados tales como los mostrados en la siguiente gráfica, en la que se muestra el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor, en la ebullición, a diferentes gradientes de temperatura (temperatura del alambre menos temperatura del líquido).



COMPORTAMIENTO DE LA CURVA $\log h$ $\log T$

Se puede obtener el flujo de calor como función de la temperatura del alambre porque (1) conocemos el área superficial del alambre, (2) podemos medir el poder eléctrico de entrada y (3) conocemos la temperatura del alambre porque sabemos sus características de resistencia como una función de la temperatura.

Podemos observar que a diferencias de temperaturas pequeñas, la transferencia de calor se lleva a cabo entre partes relativamente calientes y frías del fluido por medio de mezclas; esto es, el líquido que se encuentra en el fondo del recipiente se calienta y se vuelve menos denso que antes, debido a su expansión térmica. El líquido adyacente al fondo

también es menos denso que la porción superior fría y por lo tanto asciende. La transferencia de calor del líquido caliente del fondo del recipiente al resto, se hace por convección natural ó convección libre, ó si produce cualquier agitación, el proceso se lleva a cabo por convección forzada, - al llegar a la superficie se lleva a cabo la vaporación en la interfase líquido-vapor.

El mecanismo observado en el rango de temperatura de -- 100 a 150°C es el de ebullición nucleada. Las burbujas de vapor se forman en sitios sobre la superficie caliente del alambre. Conforme la temperatura de la superficie va aumentando, las burbujas se forman en más y más sitios hasta que forman una película de vapor que envuelve al alambre. Esta película de vapor aleja al líquido del alcance de la superficie y el calor suministrado para evaporar al líquido, tiene que pasar a través de la película de vapor, como sabemos, el vapor es relativamente un buen aislante del calor. El mecanismo es ahora ebullición pelicular. Entre la ebullición nucleada y la pelicular existe una zona de transición. En la ebullición pelicular el cambio de fase se lleva a cabo en la interfase líquido-vapor.

1.3. ANÁLISIS DIMENSIONAL

El método de correlacionar cierto número de variables - en una sola ecuación, expresando un efecto, se conoce como - análisis dimensional. Ciertas ecuaciones que describen fenómenos físicos pueden obtenerse racionalmente de leyes básicas derivadas de experimentos. Un ejemplo de esto es el tiempo de vibración de un péndulo a partir de la segunda ley de Newton y la constante gravitacional. Otros efectos pueden describirse por ecuaciones diferenciales, y el curso o extensión del fenómeno se puede deducir por medio del cálculo. En la física elemental se encuentran numerosos ejemplos de este tipo. Hay otros fenómenos en los que no se tiene suficiente información para permitir la formulación, ya sea de las ecuaciones diferenciales o de una noción clara del fenómeno al cual se le pueden aplicar leyes fundamentales. Este último grupo debe ser estudiado experimentalmente, y la correlación de las observaciones es un acercamiento empírico a la ecuación. Las ecuaciones que pueden obtenerse teóricamente son también obtenidas de modo empírico pero lo contrario no es cierto.

Bridgman ^{1/} ha presentado la prueba más extensa de los principios matemáticos en los que se basa el análisis dimen-

1/ Bridgman, P.W., "Dimensional Analysis", Yale University Press, New Haven, 1931.



Dirección General de Bibliotecas

Fecha	Idioma	g	clave U.	N° de matriz	f. cat.	Iden.	Registro de Tesis	
\$05000							Año en que se presenta la tesis: 1986	
\$10000	Autor:	GOMEZ		Reiz	JACOIN FERNANDO			
\$10000	Autor:	Apellido paterno		Apellido materno	Nombre(s)			
\$10000	Autor:	Apellido paterno		Apellido materno	Nombre(s)			
\$2451	Título:	DISEÑO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO SOBRE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN PARA EL LABORATORIO DE QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD LA SALLE						
	Subtítulo:	DISEÑO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO						
\$26000	Lugar de Edición:							
\$30000	Número de páginas:	123	Ilustraciones:	SI	NO	Idioma:	Español	
Grado:	L	M	D	E	Carrera:			Ingeniería Química
Facultad o escuela:								
Universidad:								UNIVERSIDAD LA SALLE
Temas que trata la tesis:								EL DISEÑO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO SOBRE TRANSFERENCIAS DE CALOR POR CONDUCCIÓN PARA EL LABORATORIO DE QUÍMICA
Grado del asesor de tesis:	L	M	D	E	Nombre del asesor:			Antonio Valente B.
\$65000								
\$60000								
\$40000								
\$60000								
\$10000								

sional. Debido a que éste opera únicamente con las dimensiones de las variables, no se pueden producir resultados numéricos directos a partir de las variables, sino que se producen módulos por medio de los cuales los datos observados pueden combinarse y establecerse la influencia relativa de las variables.

Como tal, es una de las bases fundamentales del estudio empírico. Establece que cualquier combinación de números y dimensiones, tales como cinco kilogramos o cinco metros, poseen dos aspectos indistinguibles, uno el de la pura magnitud (numérico) y otro cuantitativo (dimensional).

Las dimensiones fundamentales son cantidades tales como longitud, tiempo y temperatura, que son directamente medibles. Dimensiones derivadas son aquellas que se expresan en términos de las dimensiones fundamentales, tales como velocidad o densidad. Los resultados finales de un análisis dimensional pueden quedar establecidos como sigue: si una variable dependiente teniendo dimensiones dadas depende de alguna relación dentro de un grupo de variables, las variables individuales del grupo deben relacionarse de tal manera que las dimensiones netas del grupo sean idénticas con aquellas de la variable dependiente. Las variables independientes pue-

den estar también relacionadas de tal manera que las variables dependientes se definan por la suma de varios grupos de diferentes variables, en que cada grupo tenga las dimensiones netas de la variable dependiente.

Como una ilustración muy simple, se puede considerar la ecuación de continuidad, la que frecuentemente es escrita de la siguiente forma:

$$w = \frac{ua}{v}$$

donde

w = razón de flujo de fluido, peso/tiempo

u = velocidad del fluido en el conducto.
longitud/tiempo

a = área transversal del conducto, longitud al cuadrado.

v = volumen específico, longitud al cubo/
peso

Las variables u , a y v deben relacionarse de tal manera que sus dimensiones netas sean las mismas que aquellas de la variable dependiente w , es decir, peso/tiempo. Una ecuación que comprenda números puros y dimensiones, debe estar correcta respecto a ambas. Comprobando solamente las dimensiones para el ejemplo anterior se tiene:

$$\frac{\text{PESO}}{\text{TIEMPO}} = \frac{\text{longitud}}{\text{tiempo}} \times \text{longitud}^2 \times \frac{1}{\frac{\text{longitud}^3}{\text{peso}}} = \frac{\text{PESO}}{\text{TIEMPO}}$$

Se puede apreciar que las dimensiones del lado izquierdo son idénticas con las dimensiones netas del grupo solamente cuando las variables de éste se arreglan en la forma particular indicada por la fórmula. Las tres variables independientes dan un resultado en peso/tiempo únicamente cuando se arreglan de la manera, ua/v , contrariamente, se puede deducir que la forma de una ecuación se determina únicamente por sus dimensiones; la forma que produce igualdad dimensional - representa la necesaria inter-relación entre las variables. Cualquier ecuación física puede escribirse y evaluarse en términos de una serie de potencias que contengan todas las variables. Si no se conociera la forma en la ilustración anterior y se deseara encontrar la correlación que debe existir entre las variables w , u , a y v , se podría expresar por una serie de potencias.

$$\theta(w, u, a, v) = \alpha w^b u^c a^d v^e + \alpha' w^{b'} u^{c'} a^{d'} v^{e'} + \dots = 0$$

Los factores α y α' son constantes adimensionales de proporcionalidad. Puesto que las dimensiones de todos los tér-

minos consecutivos de las series son idénticos, no es necesario considerar ningún otro término además del primero. Según esto, se puede escribir:

$$\vartheta'(w^b u^c a^d v^e) = 1$$

donde ϑ' indica la función. Haciendo arbitrariamente $b = -1$ de manera que w no aparezca en la ecuación final elevada a un exponente fraccionario:

$$w = \alpha u^c a^d u^e$$

Sustituyendo dimensiones,

$$\frac{\text{PESO}}{\text{TIEMPO}} = \alpha \left(\frac{\text{longitud}}{\text{tiempo}} \right)^c \times (\text{longitud}^2)^d \times \left(\frac{\text{longitud}^3}{\text{peso}} \right)^e$$

Si un grupo de variables independientes establecen igualdad numérica con una variable dependiente, lo mismo sucede con sus dimensiones. Los exponentes c , d y e , deben asumir los valores necesarios para efectuar la igualdad dimensional entre el lado derecho y el izquierdo. El resto de la solución es meramente evaluar c , d y e , por simple álgebra. Sumando los exponentes de las dimensiones de ambos lados y recordando que un exponente cero reduce un número a la unidad,

$$\text{Sumatoria de longitud: } 0 = c + 2d + 3e$$

$$\text{Sumatoria de peso : } 1 = -e$$

$$\text{Sumatoria de tiempo : } -1 = -c$$

Resolviendo por la incógnita, d resulta ser $+1$. Los tres ex-
ponentes son entonces:

$$c = +1$$

$$d = +1$$

$$e = -1$$

Sustituyendo esto en nuestra ecuación tenemos que:

$$w = \alpha u^{+1} a^{+1} v^{-1} = \alpha \frac{ua}{v}$$

Ya que ésta es una correlación exacta, el valor de la cons-
tante de proporcionalidad α es igual a 1 y por lo tanto

$$w = \frac{ua}{v}$$

Así, por métodos puramente algebraicos se ha establecido la
forma correcta de la ecuación.

Esto ha sido una ilustración muy elemental, en el cual todos los exponentes fueron números enteros y las variables dependientes e independientes se expresaron únicamente con tres clases de dimensiones: peso, longitud y tiempo. En los sistemas que involucran a la mecánica y al calor, es a menudo emplear otras dimensiones como temperatura y una unidad derivada del calor H , Btu ó caloría.

En ingeniería mecánica y química es costumbre usar un conjunto de sus dimensiones, las cuales son:

Fuerza	:	F
Calor	:	H
Longitud	:	L
Masa	:	M
Temperatura:		T
Tiempo	:	Θ

Sin embargo una de las alternativas importantes oscila acerca de la unidad de fuerza y la unidad de masa. La corrección del ejemplo anterior será válido ya sea que se use la libra-masa o gramo-masa, o el poundal (libra-fuerza) o la dina (gramo-fuerza), ya que el peso se trató siempre de la misma forma.

Considere un sistema en el cual la masa es una dimensión fundamental como M , L , t y Θ . De la ecuación de la aceleración, fuerza = masa \times aceleración.

$$F = ML \Theta^{-2}$$

En otro sistema de dimensiones puede ser más conveniente considerar la fuerza como dimensión fundamental, en tal caso la masa se expresa por:

$$M = FL^{-1} \Theta^2$$

Cuando algunas variables son expresadas comúnmente en unidades de fuerza, tal como la presión FL^{-2} y otras variables por unidades de masa tal como la densidad ML^{-3} , es necesario introducir una constante dimensional en la serie antes de resolver por los exponentes. La constante que relaciona a M y F tiene las dimensiones de la constante de aceleración gravitacional $L\Theta^{-2}$.

También se presenta una situación similar cuando se describe un fenómeno por el cual hay cambios de trabajo o de energía cinética en el sistema. Se debe introducir un factor de conversión que es el calor equivalente del trabajo, -

para convertir FL o H o viceversa. La constante es el equivalente de energía cinética del calor $ML^2/H\Theta^2$.

La siguiente tabla muestra alguna de las variables más comunes junto con sus dimensiones netas, así como el conjunto típico de unidades métricas y de ingeniería.

DIMENSIONES Y UNIDADES

SÍMBOLO	VARIABLE Y UNIDADES CONSISTENTES METRICAS Y DE INGENIERIA	DIMENSIONES
g	Aceleración de la gravedad, cm/seg ² , pie/h ²	L/Θ ²
A	Area o superficie, pie ² , cm ²	L ²
H	Calor, Btu, cal	H
c	Calor específico, Btu/lb°F, cal/g°C	H/MT
β	Coefficiente de expansión térmica, 1/°F, 1/°C	1/T
k	Conductividad térmica, Btu/h pie ² °F pie, -- cal/seg cm ² °C cm	H/LTΘ
K _v	Conversión de energía cinética a calor	ML ² /HΘ ²
K _m	Conversión de fuerza a masa	M/FΘ ²
ρ	Densidad, lb/pie ³ , g/cm ³	M/L ³
D	Diámetro, pie, cm	L
α	Difusividad térmica, pie ² /h, cm ² /seg	L ² /Θ
hd	Difusividad (volumétrica), pie ² /h, cm ² /seg	L ² /Θ
J	Equivalente mecánico del calor fuerza-libra pie/Btu, fuerza-gramo cm/cal	FL/H
T	Esfuerzo, fuerza-libra/pie ² , fuerza-gramo/cm ²	FL/L ²
W	Flujo de masa, lb/h, g/seg	M/Θ
F	Fuerza, fuerza-libra, fuerza-gramo	F
L	Longitud, pie, cm	L
P	Presión, fuerza-libra/pie ² , fuerza-gramo/cm ²	F/L ²
r	Radio, pie, cm	L
T	Temperatura, °F, °C	T
σ	Tensión superficial, fuerza-libra/pie fuerza- gramo/cm	F/L
Θ	Tiempo, h, seg	Θ
w _o	Trabajo, fuerza-libra pie, fuerza-g/m	FL
u	Velocidad, pie/h, cm/seg	L/Θ
G	Velocidad másica, lb/h pie ² , g/seg cm ²	M/ΘL ²
μ _g	Viscosidad, fuerza-lb h /pie ² , fuerza-g seg/cm ²	FΘ/L ²
μ	Viscosidad absoluta lb/pie h, g/cm seg	M/LΘ
v	Volumen específico, pie ³ /lb, cm ³ /g	L ³ /M

A partir del análisis dimensional de un fenómeno se encuentra que en la solución final frecuentemente se obtienen algunas variables que se hayan relacionadas entre sí de tal forma que el producto de sus dimensiones nos resulta en una adimensión, es decir sin dimensiones. Algunos de estos grupos adimensionales se les han asignado nombres en honor de los primeros investigadores en el campo de la mecánica de los fluidos y transferencia de calor. En la siguiente tabla se enlistan los grupos más comunes y el nombre asignado a cada uno de ellos:

<u>SÍMBOLO</u>	<u>N O M B R E</u>	<u>GRUPO</u>
Bi	Número de Biot	h/k
Fo	Número de Fourier	$h \Theta / \rho c \alpha^2$
G_3	Número de Graetz	wc/kL
Gr	Número de Grashof	$D^3 \rho^2 g \beta \Delta t / \mu^2$
Nu	Número de Nusselt	$h D/k$
Pe	Número de Peclet	DGc/k
Pr	Número de Prandtl	$c \mu / k$
Re	Número de Reynolds	$DG/\mu, Dv_p / \mu$
Sc	Número de Schmidt	$\mu / \rho k_d$
St	Número de Stanton	h/cG

Estos números dimensionales tienen un significado físico, por ejemplo:

El número de Reynolds es un producto de una característica de longitud (diámetro del tubo), una característica de velocidad y la densidad de un fluido dividido entre su viscosidad. El resultado es un número dimensional el cual representa el ratio o relación de fuerza inercial a fuerza viscosa existente en el fluido. Por ejemplo se puede determinar la transición entre el flujo laminar y el flujo turbulento, lo cual ocurre normalmente en tuberías comerciales a un número de Reynolds de 2,100 a 2,200.

La velocidad a la que el calor es transferido hacia o desde un líquido a un tubo, es considerablemente menor en el flujo laminar que en el turbulento, y en la práctica industrial es siempre deseable evitar condiciones tales como la baja velocidad de un líquido lo cual origina un flujo laminar.

1.3.1 CORRELACIONES PARA LA PREDICCIÓN DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR EBULLICIÓN

Los coeficientes de transferencia de calor pueden ser evaluados en base a modelos teóricos.

Un análisis dimensional poco profundo puede servirnos para determinar las variables que se involucran en un proceso determinado. Si se tiene una mayor idea de la naturaleza interior de un fenómeno se pueden establecer ecuaciones diferenciales que describan el proceso con exactitud.

Para simplificar la teoría, sólo se mostrarán algunas de las ecuaciones de diseño más comunes en su forma general:

1.3.1.1 ECUACIONES DE DISEÑO PARA LA EBULLICIÓN PELICULAR

Para la ebullición pelicular en tubos horizontales, se puede predecir el coeficiente de transferencia de calor usando las siguientes ecuaciones:

Bromley propuso:

$$h = h_c + h_r \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{h_r}{h_c} \cdot \frac{1}{(2.62 + h_r/h_c)} \right)^{1/4} \quad 1)$$

Donde el coeficiente convectivo pelicular (h_c) está dado por:

$$h_c = 0.62 \left(\frac{g \rho_v (\rho_l - \rho_v) \lambda k_v^3}{D \mu_v (\bar{T}_s - \bar{T}_l)} \right)^{1/4}$$

y el coeficiente radiante (h_r)

$$h_r = \frac{\epsilon \sigma (\bar{T}_s^4 - \bar{T}_l^4)}{(\bar{T}_s - \bar{T}_l)}$$

Para la Ebullición Pelicular alrededor de un tubo vertical el coeficiente de transferencia de calor está dado por la siguiente ecuación propuesta por Hsu:

$$h \left(\frac{\mu_v^3}{g \rho_v (\rho_l - \rho_v) k_v^3} \right)^{1/3} = 0.0020 NRe^{0.6} \quad 1)$$

$$NRe = \frac{4 \omega}{\pi D \mu_v}$$

1/ Rohsenow - Hartnett
Handbook of Heat Transfer,
Mc Graw Hill

1.3.1.2 EBULLICIÓN NUCLEADA

Para la Ebullición Nucleada generalmente se usa una ecuación no escrita explícitamente en términos de coeficiente de transferencia de calor, la cual es como se muestra:

$$\frac{C_p (T_s - T_v)}{\lambda} = C \left[\frac{g}{\mu_s \lambda} \left(\frac{4.17 \times 10^8 \sigma}{g(\rho_s - \rho_v)} \right)^{1/2} \right]^{0.33} N_{Pr_s}^{0.7} \quad 1/$$

De donde

$$N_{Pr_s} = \frac{\mu_s C_p}{k_s}$$

Para valores de C se encontró la siguiente tabla publicada por Rohsenow [W.M. Rohsenow, Trans. ASME, 74: 969 (1952)]

COMBINACION	C	2/
n-Pentano - Cromo	0.015	
Agua - Platino	0.013	
Agua - Cobre	0.013	
K ₂ MnO ₄ - Cobre	0.013	
Benceno - Cromo	0.010	
Butanol - Cobre	0.00305	
50% K ₂ CO ₃ - Cobre	0.00275	
Etanol - Cromo	0.0027	
Isopropil - Cobre	0.00225	

- 1/ Perry - Chilton - Chemical Engineers' Handbook. Mc Graw Hill
 2/ R.A. Greenkorn. Transfer Operation. Mc Graw Hill, Kogakusha

Monstinsky propuso:

$$h = 0.00658 P_c^{0.69} \left(\frac{g}{A}\right)^{0.7} \left[1.0 \left(\frac{P}{P_c}\right)^{0.17} + 4 \left(\frac{P}{P_c}\right)^{1.2} + 10 \left(\frac{P}{P_c}\right)^{10} \right] \quad //$$

Mc. Nelly propuso:

$$h = 0.225 \left(\frac{g C_r}{A \lambda}\right) \left(\frac{144 P k_e}{\sigma}\right)^{0.31} \left(\frac{P_e}{P_v} - 1\right)^{0.33} \quad //$$

Rohsenow propuso:

$$h D = C_r \left(\frac{D G}{\mu}\right)^{2/3} \left(\frac{c \mu}{k}\right)^{-0.7} \quad //$$

La constante C_r varía de 0.006 hasta 0.015 y depende de la naturaleza de la superficie.

Forster y Zuber propusieron:

$$Nu_b = 0.0015 N_{Re}^{0.62} N_{Pr}^{1/3} \quad //$$

1/ Perry Chilton. Chemical Engineers' Handbook. Mc Graw Hill

La cual toma la siguiente forma:

$$\frac{C_p \sqrt{\pi \alpha}}{k \rho v} \frac{W}{A} \left(\frac{2\sigma}{\Delta p} \right)^{1/2} \left(\frac{P_1}{\Delta p g} \right)^{1/4}$$

$$= 0.0015 \left[\frac{P_1}{\mu} \left(\frac{C_p \Delta T \sqrt{\pi \alpha}}{\lambda \rho v} \right)^2 \right]^{0.62} \left(\frac{C \mu}{k} \right)^{1/2}$$

Donde $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ del líquido

$\Delta p =$ Presión de vapor - Presión saturación

CORRELACIONES DE AUTORES SOVIETICOS

Estos autores propusieron la siguiente correlación:

$$Nu_n = A Pr^{n_1} \cdot Pe^{n_2} \cdot K_p^{n_3} \cdot Ke^{n_4} \cdot Ar^{n_5} \quad 1/$$

para la cual cada uno propuso los siguientes valores:

AUTOR	A	" ₁	" ₂	" ₃	" ₄	" ₅
Kichigan-Tobilevich	1.04×10^{-4}	0	0.7	0.7	0	0.125
Kutateladze	7×10^{-4}	-0.35	0.7	0.7	0	0
Borishanskiy-Minchenko	8.7×10^{-4}	0	0.7	0.7	0	0
Kruzhilin-Averin	0.082	-0.5	0.7	0	0.377	0
Labuntsov	0.125	-0.32	0.65	0	0.35	0

1/ Rohsenow - Hartnett. Handbook of Heat Transfer. Mc Graw Hill

En donde:

$$Nu_n = \frac{h}{k_e} \left(\frac{g_0}{g} \frac{\sigma}{(\rho_1 - \rho_0)} \right)^{1/2}$$

$$Pe = \frac{(g/A)}{\alpha_e \rho_0 h_{12}}$$

$$K_e = \frac{(\rho_0 h_{12})}{j C_e T_0 \rho_0 (g \sigma (\rho_1 - \rho_0) / g_0)^{1/2}}$$

$$K_p = \frac{P}{(g \sigma (\rho_1 - \rho_0) / g_0)^{1/2}}$$

$$Ar = \frac{g}{j^2} \left(\frac{g_0}{g} \frac{\sigma}{(\rho_1 - \rho_0)} \right)^{3/2} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_1} \right)$$

1.3.2 MECANISMOS DE CONDENSACION

La condensación tiene lugar a diferentes velocidades de transferencia de calor por cualquiera de los siguientes mecanismos físicos, en forma de gota y en forma de película.

El coeficiente de película en la condensación está influido por la textura de la superficie en la cual tiene lugar la condensación y también por la posición de la misma (vertical u horizontal).

1.3.2.1 CONDENSACION EN FORMA DE GOTA Y PELICULA

Cuando un vapor puro saturado entra en contacto con una superficie fría, se condensa y puede formar gotitas en la superficie. Estas gotitas pueden no exhibir afinidad alguna por la superficie y en lugar de cubrirla se desprenden de ella, dejando superficie descubierta en la cual se pueden formar sucesivas gotitas de condensado. Cuando la condensación ocurre por este mecanismo se le llama condensación en forma de gota. Sin embargo, generalmente suele aparecer una inconfundible película de condensado sobre la superficie a medida que el vapor se condensa. Esta película cubre a la

superficie y por lo tanto el vapor restante se condensará so
bre la superficie de la película de condensado. Esta conden
sación es en forma de película.

Los dos mecanismos son independientes de la cantidad de vapor condensante, por centímetro cuadrado de superficie. - Se debe hacer énfasis en que la condensación en forma de película no es una transición de la condensación en forma de gota debido a la rapidez a la cual el condensado se forma so
bre la superficie.

Debido a la resistencia que ofrece la película de condensado al paso de calor a través de ella, los coeficientes de transferencia de calor para la condensación en forma de gotas son de cuatro a ocho veces mayores que para la condensación en forma de película. El vapor de agua es el único vapor puro conocido que se condensa en forma de gota, y se requieren condiciones especiales para que esto ocurra. La condensación por gota también tiene lugar cuando varias sustancias se condensan simultáneamente en una mezcla, y donde la mezcla de condensado no es miscible. Durante varios períodos en la operación normal de un condensador suele ser -- que el mecanismo inicial de condensación sea en forma de película y cambiar posteriormente a la forma en gota y un tiem

po más tarde volver a invertir el mecanismo. Debido a la -- falta de control no es costumbre en los cálculos para el dí -- ñeño de condensadores considerar la gran ventaja que ofrecen los altos coeficientes de transferencia de calor obtenidos - experimentalmente en la condensación en forma de gota.

La presión de saturación del vapor en el cuerpo del mis -- mo, es mayor que la presión de saturación del condensado en contacto con la superficie fría. Esta diferencia de presio -- nes provee el potencial necesario para mover al vapor del -- cuerpo de éste a mayor velocidad. Comparada con la pequeña resistencia a la transferencia de calor por difusión del va -- por al condensado, la película del condensado en la superfi -- cie fría constituye la resistencia controlante. Es la lenti -- tud con la que el calor de condensación pasa a través de esta película, lo que determina el coeficiente de condensación.

La expresión para una ecuación de los coeficientes de - condensación se puede obtener del análisis dimensional donde el coeficiente promedio (h) es una función de las propieda -- des de la película de condensado ($k, \rho, g, \mu, L, \Delta t$ y λ). - Nusselt derivó teóricamente las correlaciones del mecanismo de condensación en forma de película, y los resultados que - obtuvo están en excelente concordancia con los experimenta -- les.

1.3.3 CORRELACIONES PARA LA PREDICCIÓN DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDENSACION

Para simplificar la teoría sólo se presentarán algunas de las ecuaciones de diseño más comunes en su forma general.

1.3.3.1 CONDENSACIÓN PELICULAR

Para la condensación en tubos verticales, el coeficiente de transferencia de calor medio está dado por las siguientes ecuaciones:

Rohsenow propuso para

$$h_a \left(\frac{v^2}{k^3 g} \right)^{1/3} = 1.47 Re_x^{-1/3} \quad \text{1/}$$

Donde

$$Re_x = \frac{4 X_e (v) \rho}{\mu}$$

X_e = Espesor de película

Colburn propuso:

Para

$$\frac{h}{c_b} \frac{c \mu}{k} = \frac{5.35}{4 \Gamma / \mu} \quad \text{1/}$$

$$\text{Donde } G = \frac{\Gamma}{(3 \mu \Gamma / \rho g)^{1/3}} = \left(\frac{W_f^2 \rho^2 g}{29.6 D^2 \mu} \right)^{1/3}$$

Nusselt propuso:

$$\frac{hL}{k} = 0.923 \left(\frac{L^3 \rho^2 g \lambda}{k \mu \Delta t} \right)^{1/4} = 0.925 \left(\frac{L^3 \rho^2 g}{\mu \Gamma^2} \right)^{1/3} \quad \text{1/}$$

Forma adimensional:

$$h = 330 \left(\frac{k^3 \rho^2 D'}{z_b W_F} \right)^{1/3} \quad //$$

Donde:

Para vapor a presión atmosférica:

$$k = 0.394 \quad \rho = 60 \quad z_b = 0.28$$

$$h = 3050' \frac{D'}{W_F} \quad //$$

Para vapores orgánicos a punto de ebullición normal:

$$k = 0.08 \quad \rho = 45 \quad z_b = 3.25$$

$$h = 472' \frac{D'}{W_F} \quad //$$

Para flujo con $Re_x > 2000$ Rohsenow propuso:

Donde

$$Re_x = \frac{\rho (v) x}{\mu}$$

$$h_a \left(\frac{v^2}{k^3 g} \right)^{1/3} = 0.0077 N_{Re}^{0.4} \quad \text{1/}$$

Para condensación en tubos horizontales, el coeficiente de transferencia de calor medio está dado por las siguientes ecuaciones:

Colburn propuso:

Para

$$N_{Re} < 2100$$

$$\frac{h}{cG} \frac{c\mu}{k} = \frac{4.4}{4 \Gamma^{1/4}} \quad \text{1/}$$

Donde

$$G = \frac{\Gamma}{(3\mu^2/\rho^2 g)^{1/3}} = \frac{Wk^2 \rho^{2/3}}{12 L^3 \mu} \quad \text{1/}$$

Nusselt propuso:

$$\frac{hD}{k} = 0.73 \frac{D^2 \rho^2 g}{k \mu \Delta T}^{1/3} = 0.16 \frac{D^2 \rho^2 g}{\mu \Delta T}^{1/3} \quad \text{1/}$$

Forma adimensional:

$$h = 534 \left(\frac{k^3 \rho^2 L}{z_b W_F} \right)^{1/3} \quad //$$

Donde:

Para vapor a presión atmosférica:

$$h = 4920 \left(\frac{L}{W_F} \right)^{1/3} \quad //$$

Para vapores orgánicos a punto de ebullición normal:

$$h = 766 \left(\frac{L}{W_F} \right)^{1/3} \quad //$$

Los coeficientes de condensación pueden ser afectados sustancialmente por la presencia de gases no condensables.

Por esta razón todos los condensadores en columnas de destilación están provistos con algún tipo de venteo para gases no condensables.

4 FLUJO MÁXIMO DE CALOR

Un criterio útil sobre el comportamiento durante la vaporización es que el máximo flujo de calor se define como ---
 $(Q/A)_{\max}$ o $(U\Delta t)_{\max}$.

1/ Perry-Chilton. Chemical Engineers' Handbook. Mc Graw Hill

Este representa el número de BTU por hora que se transfieren por pie cuadrado de superficie con el máximo flujo obtenible correspondiente al flujo de calor a la diferencia crítica de temperatura. Una cantidad mayor que $(Q/A)_{max}$ BTU/Hrft no puede ser forzada a través de la superficie calefactora, debido a la presencia de la película de gas.

Cuando se emplea un (Δt) mayor que el crítico, se logran coeficientes de vaporización menores y el flujo de calor decrece similarmente.

Se deduce que las grandes diferencias de temperatura favorables para la conducción y convección pueden ser en realidad un impedimento para la ebullición.

El flujo máximo de calor puede calcularse en las siguientes correlaciones propuestas por los siguientes autores:

ZUBER-TRIBUS (SI)

$$\Phi_{max} = \frac{\pi h_{13} \rho_3}{24} \left(\frac{30 (\rho_1 \cdot \rho_3)}{\rho_3^2} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_1}{\rho_1 + \rho_3} \right)^{0.5} \quad //$$

1/ Roshenow-Hartnett. Handbook of Heat Transfer. Mc Graw Hill

ZUBER-TRIBUS 1/

$$Q_{max} = 0.13 \rho_v h_{fg} \left(\frac{\sigma(\rho_l - \rho_v) g g_0}{\rho_v^2} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l}{\rho_l + \rho_v} \right)^{0.5}$$

ZUBER-TRIBUS 2/

$$Q_{max} = 0.18 \rho_v h_{fg} \left(\frac{\sigma(\rho_l - \rho_v) g g_0}{\rho_v^2} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l}{\rho_l + \rho_v} \right)^{0.5}$$

KUTATELADZE 2/

$$Q_{max} = 0.16 \rho_v h_{fg} \left(\frac{\sigma(\rho_l - \rho_v) g g_0}{\rho_v^2} \right)^{0.25}$$

CHANG-SNYDER 2/

$$Q_{max} = 0.145 \rho_v h_{fg} \left(\frac{\sigma(\rho_l - \rho_v) g g_0}{\rho_v^2} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l + \rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5}$$

1/ Propuesta originalmente por los autores2/ Modificación sugerida por Rohsenow en Hartnett.

Handbook of Heat Transfer Mc Graw Hill.

ROHSENOW-GRIFFITH

$$Q_{MAX} = 143 \rho_v h_{fg} \left(\frac{g}{g_0} \right)^{0.45} \left(\frac{P_2 - P_v}{\rho_v} \right)^{0.6} \quad //$$

KUTATELADZE-ZUBER

$$Q_{MAX} = 0.18 g_c^{0.25} \rho_v h_{fg} \left(\frac{\sigma (P_2 - P_v)}{\rho_v^2} \right)^{0.25} \quad //$$

MONSTINSKI

$$Q_{MAX} = 803 P_c \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0.35} \left(1 - \frac{P}{P_c} \right)^{0.9} \quad //$$

1/ Rohsenow-Hartnet. Handbook of Heat Transfer. Mc Graw Hill

1.5

FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE CALOR
POR VAPORIZACION

Se ha encontrado que los cuatro siguientes factores --- afectan la velocidad de transferencia de calor por vaporización de los recipientes y han entorpecido, en gran parte, la posibilidad de obtener una ó dos correlaciones simples aplicables a la mayoría de líquidos.

- Naturaleza de la superficie y distribución de las burbujas.
- Propiedades del líquido como:
 - Tensión superficial
 - Coeficiente de expansión
 - Viscosidad
- Influencia de la diferencia de temperatura sobre la evolución y vigor de las burbujas.
- Presión

Puesto que la interferencia es causada por la acumulación de burbujas de vapor, la presión en el sistema es importante al definir el tamaño de las burbujas individuales.

La influencia de las viscosidades y tensiones superficiales de los líquidos en sus respectivos coeficientes atmosféricos como función de valores absolutos de las propiedades

no han sido correlacionados.

1.6

NOMENCLATURA Y UNIDADES

- A : Superficie de transferencia de calor (ft^2)
 c : Calor específico a presión constante ($\text{BTU}/\text{lb}^\circ\text{F}$)
 c_l : Calor específico a presión del líquido ($\text{BTU}/\text{lb}^\circ\text{F}$)
 C_r : Coeficiente de proporcionalidad (Adimensional)
 D : Diámetro (ft)
 D' : Diámetro (in)
 g : Aceleración de la gravedad ($4.18 \times 10^8 \text{ft}/\text{hr}^2$)
 g_c : Factor de conversión ($4.18 \times 10^8 \text{lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_m \cdot \text{hr}^2$)
 G : Masa velocidad ($\text{lb}/\text{hr ft}^2$)
 h : Coeficiente individual de transf. calor ($\text{BTU}/\text{hrft}^2^\circ\text{F}$)
 h_a : Coeficiente pelicular aritmético ($\text{BTU}/\text{hrft}^2^\circ\text{F}$)
 h_c : Coeficiente pelicular convectivo ($\text{BTU}/\text{hrft}^2^\circ\text{F}$)
 h_r : Coeficiente de transf. calor por radiación
 ($\text{BTU}/\text{hrft}^2^\circ\text{F}$)
 k : Conductividad térmica ($\text{BTU}/\text{hrft}^2(^\circ\text{F}/\text{ft})$)
 k_l : Conductividad térmica del líquido ($\text{BTU}/\text{hrft}^2(^\circ\text{F}/\text{ft})$)
 L : Longitud de la superficie de transf. calor (ft)
 N_{Nu} : Núm. de Nusselt (hL/k) (Adimensional)
 N_{Pr} : Núm. de Prandtl ($c_p \mu$) (Adimensional)
 N_{Re} : Núm. de Reynolds (G/μ) (Adimensional)

- P : Presión absoluta (lb_{wt}/ft²)
 P_c : Presión crítica (lb_{wt}/ft²)
 q : Flujo de calor (BTU/hr)
 $(q/A)_{max}$: Flujo máximo de calor en vaporización nucleada (BTU/hrft²)
 t_1 : Temperatura del líquido (°F)
 t_3 : Temperatura de la superficie (°F)
 t_{sv} : Temperatura del valor saturado (°F)
 U : Coeficiente promedio de transf. calor (BTU/hrft²°F)
 v : Velocidad en dirección y (ft/hr)
 w : Velocidad en dirección z (ft/hr)
 W : Flujo másico total (lb/hr)
 W_p : Flujo en peso (lb/hr tubo)
 x_e : Espesor de la película (ft)
 z_b : Viscosidad a la temperatura bulk (cp)
 α : Difusividad térmica (ft²/hr)
 Γ : Flujo másico de la película de la superficie (lb/hrft)
 λ : Calor latente de vaporización ó condensación (BTU/lb)
 μ : Viscosidad (lb/hrft)
 μ_l : Viscosidad líquido (lb/hrft)
 μ_v : Viscosidad vapor (lb/hrft)
 ν : Viscosidad cinemática (ft²/hr)
 ρ : Densidad (lb_{masa}/ft³)

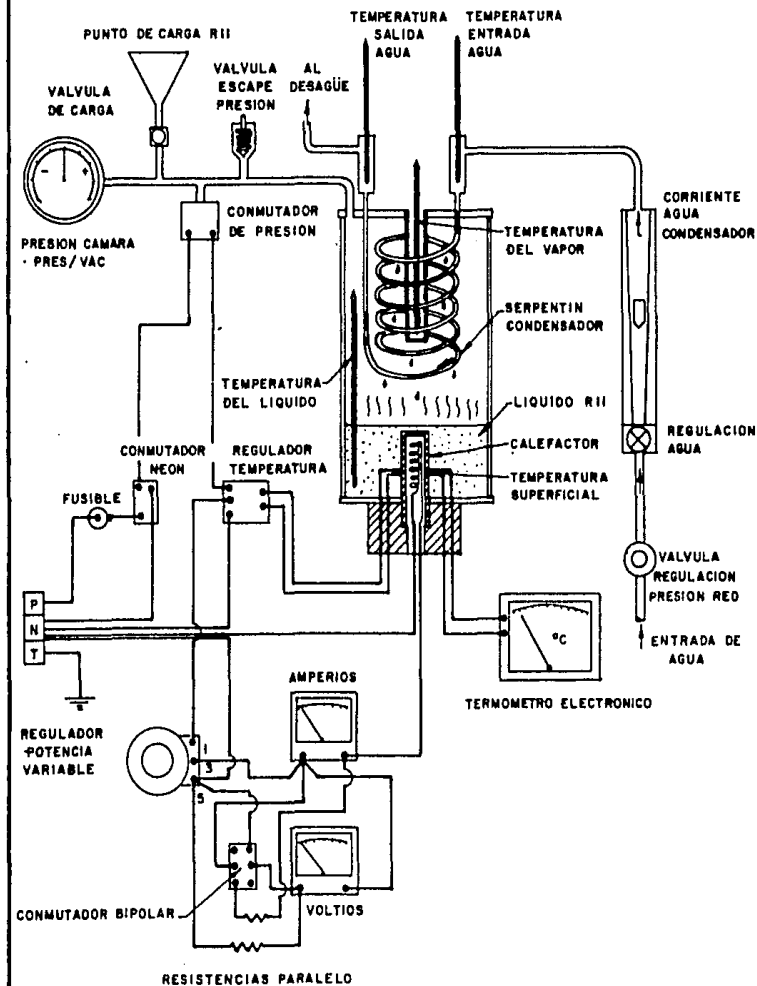
ρ_l : Densidad líquido ($\text{lb}_{\text{masa}}/\text{ft}^3$)

ρ_v : Densidad vapor ($\text{lb}_{\text{masa}}/\text{ft}^3$)

σ : Tensión superficial entre un líquido y su vapor
($\text{lb}_{\text{fuerza}}/\text{ft}$)

2. DESCRIPCION DEL EQUIPO

2.1 DIAGRAMA ESQUEMATICO



2.2 ESPECIFICACIONES TECNICAS

2.2.1 CILINDRO DE EBULLICION/CONDENSACION

Tubo de cristal de 305 mm de longitud, 75 mm de diámetro exterior y 66,6 mm diámetro interior. Dotado de tapas de latón niquelado, juntas de PTFE y válvula de alivio de presión ajustada a 100 Kpa (manómetro).

2.2.2 CALENTADOR

Manguito de cobre de pared gruesa conteniendo el elemento, dotado con termopar. Area superficial efectiva 13 cm² -- aprox.

Condiciones de funcionamiento normal: 300 W a 140 V.

2.2.3 MEDIDA DE TEMPERATURA

Termómetros de mercurio en vidrio 0-50°C, para medir:

- (i) Temperatura del líquido en ebullición
- (ii) Temperatura del vapor
- (iii) Temperatura del agua de refrigeración del condensador a la entrada.
- (iv) Temperatura del agua de refrigeración del condensador a la salida.

Termómetro electrónico Comark con escalas de -60°C a $++10^{\circ}\text{C}$; 0 a 60°C ; 0 a 170°C y 0 a 400°C , para medir la temperatura del manguito metálico.

2.2.4 MANOMETRO

Margen de $-1,0$ a $+1,0$ Barias para la presión del vapor.

2.2.5 CORTE DE ALTA PRESION

Para interrumpir el suministro de energía cuando la presión del vapor exceda 90 kPa (manómetro) (0,9 Bar).

2.2.6 TRANSFORMADOR VARIABLE

Berco Controls Ltd., Rotary Regavolt 0-2 Amps.

2.2.7 SERPENTIN CONDENSADOR

Tubo de cobre niquelado - área superficial $0,032\text{ m}^2$.

2.2.8 CORTE DE ALTA TEMPERATURA

Regulador Pye Ether 'Mini' - para limitar la temperatura del manguito y el elemento metálico a 225°C aprox.

2.2.9 MEDIDA DEL CAUDAL DE AGUA

Rotámetro - con válvula - para el control y la medida del caudal de agua de refrigeración del condensador.

2.2.10 VOLTIMETRO 0 a 150 V

2.2.11 AMPERIMETRO 0 a 2 A

2.2.12 CONMUTADOR PARA AUMENTAR EL MARGEN

Para duplicar el margen del voltímetro y del amperímetro.

2.2.13 SERVICIOS REQUERIDOS

Corriente eléctrica.

110 ó 240 V Monofásica CA.

Suministro de agua fría y desague (1 litro/minuto máx.)

2.3 DESCRIPCIÓN DEL APARATO

La unidad está constituida alrededor de un cilindro de cristal resistente que contiene vapor y líquido saturados. - (Se suministra R1) como estándar, pero pueden emplearse --- otros fluidos con propiedades adecuadas y compatibles con -- los materiales de construcción).

Un manguito de cobre que contiene un "elemento de alta densidad de vatios" va insertado en el extremo inferior del cilindro, transmitiéndose calor desde éste al líquido en ebullición. La corriente del calentador se suministra desde un

transformador infinitamente variable. Un serpentín enfriado por agua en la parte superior del cilindro condensa el vapor producido y lo devuelve al líquido en ebullición. La temperatura y presión del proceso de ebullición se regulan por la temperatura y caudal del agua de refrigeración del condensador.

Un termopar en la pared del calentador y un termómetro en el líquido permiten observar continuamente la diferencia de temperatura metal-líquido. Se ha introducido equipo de protección para evitar que se produzcan temperaturas superficiales peligrosamente altas cuando la entrada de calor crítico es alcanzada, pudiéndose llevar la ebullición desde la forma nucleada a la pelicular rápidamente y a voluntad.

2.3.1 SEGURIDAD

Un conjunto de cilindro de cristal y tapa terminal ha sido probado hidráulicamente a 2MPa (2MN/m^2) del manómetro sin fallo alguno.

Los siguientes dispositivos de seguridad se hallan incorporados como estándar:

(a) Conmutador de luz de aviso de neón.

- (b) Fusible de seguridad montado en el panel, de 10 amp.
- (c) Conmutador de corte de presión, ajustado para interrumpir el circuito calentador cuando la presión del vapor excede la indicación del manómetro 90 kPa (90 kN/m²).
- (d) Válvula de alivio de presión mecánica ajustada para descargar cuando la presión del vapor excede 100 kPa ---- (100 kN/m²) en el manómetro.
- (e) Corte de alta temperatura ajustado para interrumpir la fuente de alimentación del calentador cuando la temperatura del metal exceda 225°C.
- (f) Pantalla de plástico claro, para proteger el cilindro de cristal contra golpes accidentales.

2.4 INSTRUCCIONES DE FUNCIONAMIENTO

2.4.1 CARGA

Abrir la válvula de carga, tirar ligeramente del vástago de la válvula de alivio de presión (de modo que esté ---- abierto y actúe como respiradero) y verter luego líquido R11 en el embudo hasta que el nivel del líquido en el cilindro - esté 20-30 mm por encima de la parte superior del calefactor. Soltar la válvula de alivio de presión y cerrar la válvula de carga.

2.4.2 PURGA

Conectar el suministro eléctrico y ajustar la potencia del calefactor a unos 150 vatios.

El líquido comenzará a hervir fuertemente y cuando la presión alcance unos 30 kPa (30 kN/m²) del manómetro, o el líquido exceda 25°C, tirar del vástago de la válvula de alivio de presión y eliminar todo el aire del cilindro. Puede ser necesario repetir esto antes de expulsar todo el aire.

Conectar el suministro de agua (para reducir la presión) y desconectar el suministro eléctrico.

La unidad está ahora lista para su uso.

2.4.3 PRECAUCIONES

Antes de comenzar verificar que:

- (i) El agua de refrigeración está conectada y lista para su uso.
- (ii) La presión y temperatura del R11 están de acuerdo con los de las condiciones de saturación. Si no fuera así, es probable que haya aire presente, debiendo llevarse a cabo la operación de purga.

- (iii) El suministro eléctrico está debidamente conectado y la unidad está propiamente fija a la superficie.
- (iv) Si va montado un termómetro electrónico operado por ba tería, comprobar el estado de la misma.

2.4.3.1 DURANTE EL USO

Regular la presión de saturación al valor deseado por:

- (i) Variación del caudal del agua de refrigeración.
- (ii) Variación de la energía suministrada al calentador.

2.4.3.2 CORTE DE ALTA TEMPERATURA ETHER

Por ningún concepto deberá ajustarse este regulador de modo que la temperatura indicada en el termómetro electrónico Comarx exceda 225°C.

Para funcionamiento normal se aconseja que el regulador se ajuste para el corte a 200°C.

2.4.3.3 DESPUES DEL USO

Siempre:

- (i) Apagar la fuente de alimentación y desconectarla de la red.

- (ii) Hacer circular el agua de refrigeración hasta que la presión se haya reducido a la atmosférica.
- (iii) Apagar el termómetro electrónico.

2.4.4 OBSERVACION

Bajo condiciones normales el voltímetro y el amperímetro darán lecturas directas. Sin embargo, a altas potencias (sobre unos 300 vatios) es preciso conmutar a la posición -- (voltios y amperios x 2) en el conmutador bipolar. Una vez realizado esto, las lecturas observadas en el indicador deberán multiplicarse por dos.

2.5 NOTAS ADICIONALES

Se ha elegido R11 para su empleo con la Unidad de Transferencia de Calor por Ebullición, debido a su presión de saturación para las temperaturas previstas. Sus valores de P_{sat} y T_{eb} lo hacen adecuado para demostrar las condiciones críticas con flujos de calor moderados.

R11 es un refrigerante no tóxico, no inflamable y no corrosivo del tipo del clorofluorocarburo. Es el refrigerante empleado en plantas con compresores de flujo centrífugo o axial, utilizándose también para limpiar instalaciones frigoríficas. R11 puede adquirirse en la mayoría de los departamentos de servicio de refrigeración, y puesto que a 23°C su presión de saturación es la atmosférica, puede almacenarse normalmente en un recipiente metálico de tapón roscado.

Las fugas pueden detectarse por los métodos normales empleados para refrigerantes de fluorocarburo, como solución de jabón, lámpara de halógeno o detector de fugas electrónico.

ANTES DE EMPLEAR ALGUN OTRO FLUIDO EN LA UNIDAD DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR EBULLICION DEBEN VERIFICARSE LOS PUNTOS SIGUIENTES:

- (i) Que el fluido sea compatible con los materiales empleados en la construcción.
- (ii) Que la presión absoluta del vapor a las temperaturas previstas no exceda 200 KPa.
- (iii) Que el flujo de calor crítico esperado esté dentro de la capacidad del calefactor.

La válvula de alivio, el corte de alta presión y el corte de alta temperatura son todos ajustados y probados al realizarse el montaje y no deben ser alterados.

Para quitar líquido de la cámara de vidrio, soltar la tuerca cuadrada en el tapón de desgüe con la llave suministrada.

3. EXPERIMENTACION

3.1 NOTA:

Antes de comenzar verificar que:

- El suministro de agua de refrigeración está conectado y listo para su uso.
- La presión y la temperatura del R11 están de -- acuerdo con las condiciones de saturación. Si no es así, es probable que exista aire dentro - del cilindro, y deberá llevarse a cabo una ope- ración de purga.
- El suministro eléctrico está debidamente conec- tado y que la unidad está fija a la superficie.

Después del uso, siempre:

- Apagar la fuente de suministro eléctrico y des- conectarlo de la red.
- Hacer circular agua de refrigeración hasta que la presión dentro del cilindro sea la más cerca na a la presión atmosférica.

3.2

EXPERIMENTO N° 1"DEMOSTRACION VISUAL DE LOS TRES TIPOS DE
EBULLICION"

3.2.1 OBJETIVO: Visualizar los diferentes tipos de ebullición ---
existentes.

3.2.2 ACTIVIDADES:

- Ajustar los suministros de agua y energía a valores bajos ($w = 40$ lb/hr.; $I = 0.25$ Amp)
- Esperar a que se estabilice el sistema (aprox. 10 min) y tomar la lectura del manómetro (KPa)
- Incrementar el suministro de energía eléctrica hasta 0.30 Amp. regulando el caudal de agua de refrigeración para mantener la presión constante.
- Observar cuidadosamente al líquido que rodea al calefactor (FIG. 1); se podrán observar corrientes de líquido sobrecalentado que fluyen a la superficie en donde se lleva a cabo el -- cambio de fase líquido-vapor, pudiéndose apreciar pequeñas gotas de condensado en la super-

- *fície del serpentín, demostrando que se está -
llevando a cabo una vaporización. Observar la
diferencia de temperatura (Δt) que existe en-
tre la temperatura del calefactor y la tempera-
tura de saturación del R11. En este momento -
se lleva a cabo la vaporización convectiva.*



FIG. 1

- *Incrementar en intervalos el suministro de ener-
gía eléctrica, regulando el caudal de agua de -
refrigeración para mantener la presión constante.*

- De un momento a otro se observará la formación de pequeñas burbujas de vapor sobre la superficie del calefactor (FIG. 2). Observar la diferencia de temperatura (Δt). Aparece la ebullición nucleada.



FIG. 2

- Al seguir incrementando el suministro eléctrico se podrá apreciar que la ebullición del líquido es cada vez más intensa, hasta llegar a un máximo cuando la diferencia de temperatura (Δt) es -

aproximadamente 26°K (FIG. 3).

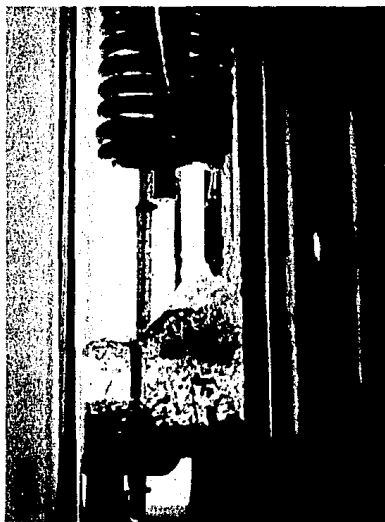


FIG. 3

- *El sistema se vuelve inestable y de inmediato se observa la formación de una película de vapor -- que rodea al calefactor (FIG. 4), actuando ésta como un aislante entre el líquido y el calefactor, ocasionando con esto que la temperatura del calefactor se dispare y que exista un abatimiento del coeficiente de transferencia de calor. - Ahora el sistema se encuentra en el régimen de ebullición pelicular.*

- La presión del sistema desciende como consecuencia de lo anterior, por lo que hay que reducir inmediatamente el caudal de agua de refrigeración para poder mantenerla constante.

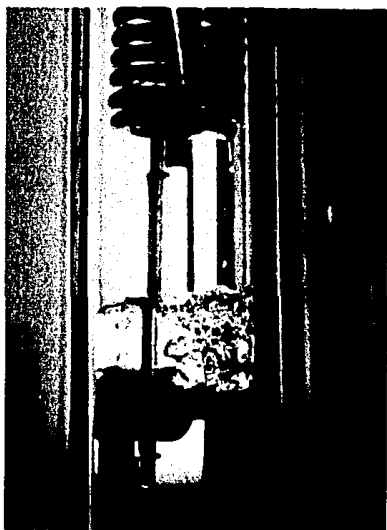


FIG. 4

- Apagar el suministro eléctrico, y mediante el control del caudal de agua de refrigeración, regular la presión del sistema y observar cuidadosamente que conforme la diferencia de temperatura (Δt) se va reduciendo, la ebullición se hace

de pronto intensa, esto es a medida que la ebullición pelicular es reemplazada por la ebullición nucleada (FIG. 5).



FIG. 5

3.3

EXPERIMENTO N° 2"DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR SOBRE LA SUPERFICIE CALEFACTORA"

3.3.1 OBJETIVO: Determinar el coeficiente de transferencia de calor sobre la superficie calefactora para cada tipo de ebullición y determinar el efecto de la presión sobre éste.

3.3.2 ACTIVIDADES:

- Encender el suministro eléctrico a un valor bajo (aprox. $I = 0.25$ Amp), manteniendo cerrado el caudal de agua de refrigeración ($m_w = 0.00$ lb/hr).
- Establecer una presión deseada.
- Variar el suministro de energía eléctrica en intervalos de 0.2 Amp, y regular el caudal de agua de refrigeración para mantener constante la presión establecida. Dejar que se estabilice el sistema y tomar las siguientes lecturas para cada intervalo:

E: Voltaje

I: Aparente

t_s : Temperatura de saturación del R11

t_m : Temperatura del calefactor

- Al llegar a las condiciones críticas (cuando el sistema es inestable y pasa de ebullición nucleada a ebullición pelicular) finalizar.
- Los resultados a diferentes presiones se muestran en la Tabla I.

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR SUPERFICIAL

TABLA I

CORRIDAS			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	E	Volet	13	25	40	54	67	85	100	117	108	120	145
	I	Amp	.2	.4	.6	.8	1.0	1.25	1.5	1.75	.8	.9	1.0
	ℓe	°C	20.6	21.1	21.7	21.7	22	22	22	23	23	23	23
Pu=15 KN/M	ℓm	°C	26	33	35	45	46	48	49	50	54	64	230
	E	Volet	61	75	87	109	118	125	129	134	114	125	137
	I	Amp	0.89	1.12	1.32	1.68	1.61	1.92	2.0	2.05	0.83*	0.92*	1.02*
Pu=175 KN/M	ℓe	°C	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	ℓm	°C	49.5	51.5	52.7	55	56	57.1	58	61	134	183	225
	E	Volet	6	19	45	60	67.5	85	102	116	139	150	
Pu=20 KN/M	I	Amp	0.1	0.3	0.7	0.9	1.0	1.25	1.5	1.7	2	22	
	ℓe	°C	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	
	ℓm	°C	26.2	33	41	44	45	46	48	49	54	230	
Pu=35 KN/M	E	Volet	34	51	68	86	102	132	145				
	I	Amp	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	2	21				
	ℓe	°C	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8				
Pu=60 KN/M	ℓm	°C	42	48	51	52	52.1	55	230				
	E	Volet	34	51	68	86	102	120	130	150			
	I	Amp	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.2			
Pu=60 KN/M	ℓe	°C	35	35	35	35	35	35	35	35			
	ℓm	°C	47	55	56.5	57	60	61	62	230			

* Cambio de Escala en el Amperímetro

3.3.3 OBSERVACIONES SOBRE LA CORRIDA (3)

DATO 1 - Se pueden observar ligeramente alrededor del mango metálico, líneas de líquido sobrecalentado que fluyen lentamente hacia la superficie, mientras que en el serpentín de condensación se observa la formación de gotas de condensado, lo que indica que se está llevando a cabo una vaporización del líquido.

DATO 3 - Se puede observar la formación de pequeñas burbujas de vapor que brotan de la superficie del mango metálico; en este momento aparece la ebullición. En el condensador se observa la formación de condensado en forma de película.

DATO 6 - Se observa la formación intensa de burbujas y en el serpentín la condensación es mayor.

DATO 10- Se observa la formación de una película de vapor alrededor de la superficie del mango metálico, y es notoria la disminución de condensado en el serpentín con respecto a datos anteriores.

3.3.4 CALCULOS:

$$h = \frac{\phi}{\Delta t}$$

donde h: Coeficiente de Trans-
ferencia de calor su-
perficial.

$$\phi = \frac{\dot{Q}}{A}$$

ϕ : Flujo de Calor

\dot{Q} : Tasa de Trans. de calor

Δt : $t_m - t_e$

$$\dot{Q} = E \times I = \text{Volts} \times \text{Amp} = \text{WATT}$$

$$\Delta t = \text{°K}$$

$$h = \text{KW/m} \text{°K}$$

$$\phi = \text{KW/m}$$

$$A = 0.0013 \text{ m}^2$$

EJ. CORRIDA (1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
E (Volts)	13	25	40	54	67	85	100	117	108	120	145
I (Amp)	.2	.4	.6	.8	1.0	1.2	1.5	1.75	0.8*	.9*	1.0*
t_e (°C)	20.6	21.1	21.7	21.7	22	22	22	23	23	23	23
t_m (°C)	26	33	35	45	46	48	49	50	54	64	230

* Cambio de Escala en el Amperímetro. Multiplicar el dato por dos.

$$\dot{Q}_1 = E_1 \times I_1 = 13 \times .2 = 2.60 \text{ W}$$

$$\phi_1 = \dot{Q}_1 / A = \frac{2.60 \text{ W}}{0.0013 \text{ m}} \times \frac{1 \text{ KW}}{1000 \text{ W}} = 2.00 \frac{\text{KW}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta t_1 = 299.1^\circ\text{K} - 293.7^\circ\text{K} = 5.4^\circ\text{K}$$

$$h_1 = 2.00 \text{ KW/m} / 5.4^\circ\text{K} = 0.370 \frac{\text{KW}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\dot{Q}_2 = 25 (.4) = 10.0 \text{ W}$$

$$\phi_2 = 10.0 / 1.3 = 7.6 \text{ KW/m}$$

$$\Delta t_2 = 306.1 - 294.2 = 11.9^\circ\text{K}$$

$$h_2 = 7.6 / 11.9 = 0.6387 \text{ KW/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\dot{Q}_3 = 24 \text{ W}$$

$$\phi_3 = 18.46 \text{ KW/m}^2$$

$$\Delta t_3 = 13.3^\circ\text{K}$$

$$h_3 = 1.388 \text{ KW/m}^2 \cdot \text{K}$$

y así sucesivamente para todos los puntos.

La Tabla (II) muestra los resultados de las corridas de la Tabla (I).

- Para graficar existen dos opciones:

(1) graficar en papel log-log

$$\Delta t \text{ vs } \theta \text{ y}$$

$$\Delta t \text{ vs } h$$

(2) graficar en papel milimétrico

$$\log \Delta t \text{ vs } \log \theta \text{ y}$$

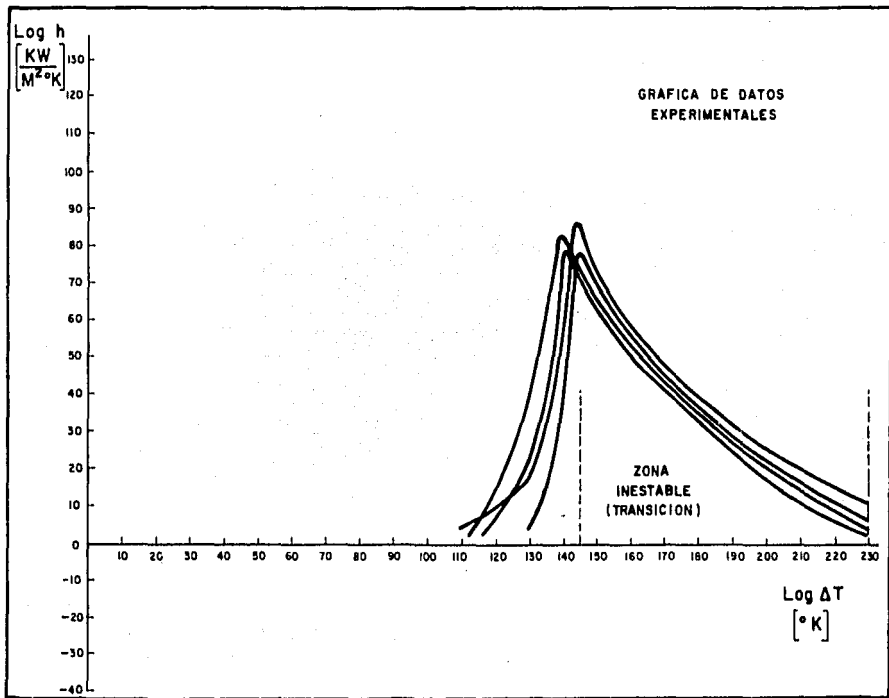
$$\log \Delta t \text{ vs } \log h$$

En la Gráfica (I) se muestran las líneas representativas de los resultados de la Tabla (II).

TABLA DE RESULTADOS

TABLA II

COPRIDA	D	UNID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	\bar{Q}	W	2.6	10.0	24.0	43.2	67.0	106.25	150.0	204.75	172.8	216.0	290.0	
	ϕ	KW/m ²	2.0	7.6	18.46	33.23	51.54	81.73	115.4	157.50	132.9	166.2	223.1	
	Pu=15	Δt	°K	5.4	11.9	13.3	23.30	24.0	26.0	27.0	27.0	31.0	41.0	207.0
	KN/m	h	$\frac{KW}{m^2 \cdot K}$	0.37	0.64	1.39	1.42	2.15	3.14	4.27	5.83	4.29	4.05	1.08
2	\bar{Q}	W	54	83	115	183	213	240	269	275	47	57	70	
	ϕ	KW/m ²	40	62	85	135	158	177	198	204	35	42	52	
	Pu=175	Δt	°K	9.5	11.5	12.7	15.0	16.0	17.1	18.0	21.0	94.0	143.0	185
	KN/m	h	$\frac{KW}{m^2 \cdot K}$	4.2	5.4	6.7	9.0	9.9	10.3	11.0	9.7	0.37	0.29	0.28
3	\bar{Q}	W	0.6	5.70	31.5	54.0	67.5	106.2	153.0	197.2	278.0			
	ϕ	KW/m ²	0.46	4.38	24.2	41.5	51.9	81.7	117.7	151.7	213.85			
	Pu=20	Δt	°K	1.2	8.0	16.0	19.0	20.0	21.0	23.0	29.0	207.8		
	KN/m	h	$\frac{KW}{m^2 \cdot K}$	0.38	0.55	1.51	2.19	2.6	3.89	5.12	5.23	1.03		
4	\bar{Q}	W	17.0	38.25	68.0	107.5	153.0	264.0	304.5					
	ϕ	KW/m ²	13.08	29.42	52.31	82.69	117.7	203.08	234.2					
	Pu=35	Δt	°K	13.20	19.20	22.2	23.2	23.3	26.2	201.2				
	KN/m	h	$\frac{KW}{m^2 \cdot K}$	0.99	1.53	2.36	3.56	5.05	7.75	1.16				
5	\bar{Q}	W	17.0	38.25	68	107.5	153.0	210.0	260.0	33.0				
	ϕ	KW/m ²	13.08	29.42	52.31	82.69	117.6	161.54	200.0	253.8				
	Pu=60	Δt	°K	12.0	20.0	21.5	22.0	25.0	26.0	27.0	195.0			
	KN/m	h	$\frac{KW}{m^2 \cdot K}$	1.09	1.47	2.43	3.76	4.71	6.21	7.41	1.30			



GRAFICA I

3.3.5 COMENTARIOS

Se puede observar que a medida que la diferencia de temperatura entre el calefactor y el líquido se va incrementando, el coeficiente de transferencia de calor aumenta hasta llegar a un máximo cuando la diferencia de temperatura es aproximadamente 25°K , al seguir incrementando esta diferencia, se puede apreciar que el coeficiente de transferencia de calor desciende súbitamente, esto es debido a que se forma una película de vapor alrededor de la superficie del calefactor, la que actúa como aislante térmico entre el líquido y el calefactor.

En las siguientes gráficas se muestran las curvas de $\log h \neq \log \Delta t$ para correlaciones presentadas en la literatura. Estas nos sirven de base para analizar y comparar los datos experimentales obtenidos.

Dentro de las correlaciones presentadas en la literatura se encuentran las siguientes:

- Ec. de Bromley (eb. pelicular)
- Ec. de Monstinsky (eb. nucleada)
- Ec. de Mc Nelly (eb. nucleada)
- Ec. de Kichigan-Tobilevich (eb. nucleada)

- Ec. de Borishansky-Minchenko (eb. nucleada)
- Ec. de Kruzhilin-Averin (eb. nucleada)
- Ec. de Labuntsov (eb. nucleada)

3.3.6 ANALISIS DE RESULTADOS

Se procederá a analizar cada una de las correlaciones teóricas, aplicándoles los datos obtenidos experimentalmente y encontrar curvas teóricas que nos sirvan de base para hacer la comparación con la curva experimental.

Para el tratamiento de las correlaciones teóricas es necesario manejar las variables correspondientes a cada una, en la dimensiones requeridas para su aplicación, por tal efecto se procedió a construir las Tablas III, IV y V, las cuales muestran las variables en las unidades pertinentes para efectuar el análisis. Asimismo la Tabla VI presenta los resultados obtenidos experimentalmente en las dimensiones tales que faciliten la comparación de los resultados obtenidos mediante la aplicación de las correlaciones teóricas y las obtenidas experimentalmente.

TABLA III

CORRIDA	DATO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ΔT °F	9.72	21.4	23.4	41.9	43.2	46.8	48.6	48.6	55.8	73.8	372.6
	$\log \Delta T$	0.99	1.33	1.38	1.62	1.64	1.67	1.69	1.69	1.75	1.87	2.87
2	ΔT °F	17.1	20.7	22.9	27.0	25.8	30.8	32.4	37.8	169.2	257.4	330.0
	$\log \Delta T$	1.23	1.32	1.36	1.43	1.46	1.49	1.51	1.58	2.23	2.41	2.52
3	ΔT °F	2.2	14.4	28.8	34.2	36.0	37.8	41.4	52.2	374.0		
	$\log \Delta T$	0.34	1.16	1.46	1.53	1.56	1.58	1.62	1.72	2.57		
4	ΔT °F	23.8	34.6	40.0	41.8	41.9	47.2	362.2				
	$\log \Delta T$	1.38	1.54	1.60	1.62	1.62	1.67	2.56				
5	ΔT °F	21.6	36.0	38.7	39.6	45.0	46.8	48.6	351.0			
	$\log \Delta T$	1.33	1.56	1.59	1.60	1.65	1.67	1.69	2.55			

TABLA IV

CORRIDA	q/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	KW/m	2.0	7.6	18.46	33.23	51.54	81.73	115.83	157.50	132.92	166.15	223.08
	BTU/hrft	634	2,410	5,853	10,536	16,342	25,914	36,583	49,938	42,145	52,681	70,732
2	KW/m	40	62	85	135	158	177	198	204	35	42	52
	BTU/hrft	12,683	19,658	26,951	42,804	50,097	56,121	62,780	64,682	11,097	13,317	16,488
3	KW/m	0.46	4.38	24.23	41.54	51.92	81.73	117.69	151.69	213.85		
	BTU/hrft	146	1,389	7,683	13,171	16,462	25,914	37,316	48,096	67,805		
4	KW/m	13.08	29.42	52.31	82.69	117.69	203.08	234.2				
	BTU/hrft	4,147	9,328	16,586	26,218	37,316	64,390	74,258				
5	KW/m	13.08	29.42	52.31	82.69	117.69	161.54	200.0	253.85			
	BTU/hrft	4,147	9,328	16,586	26,218	37,316	51,219	63,414	80,488			

TABLA V

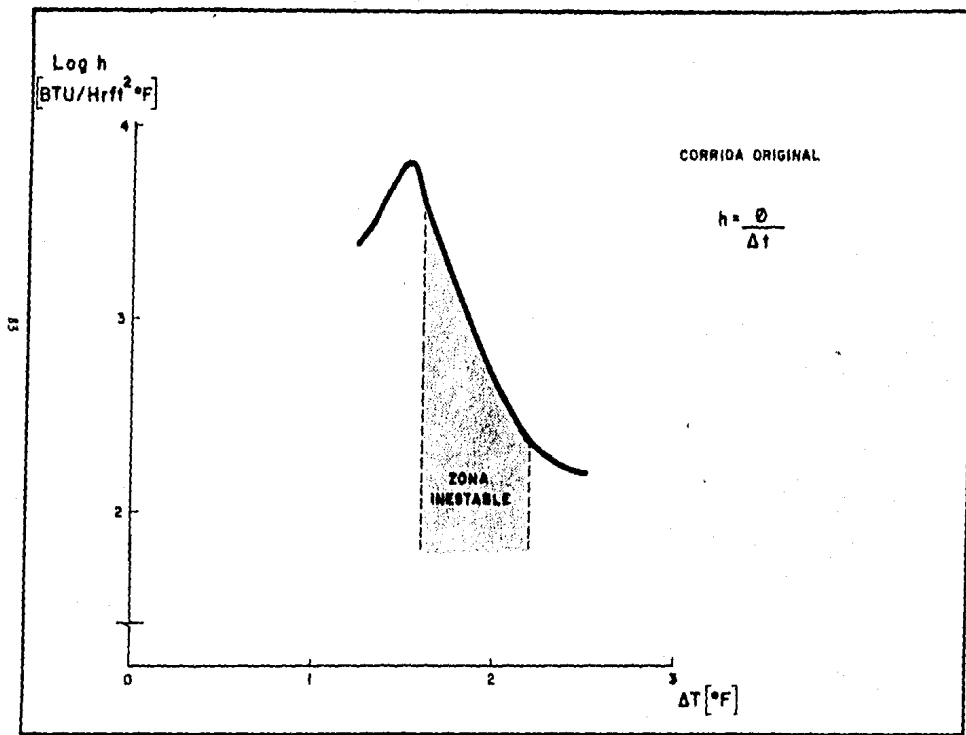
CORRIJA	t_{ad} [°C]	t_{adm} [°F]	P_1 [DIN/CM²]	P_1 [N/CM²]	P_1 [lb/IN²]	P_1 [lb/IN²]	P_1 [%CC]	h_{10} [10/IN]	h_{10} [10/IN]	σ [lb/IN²]	μ_1 [°C]	μ_{21} [°C]	μ_1 [°F]	μ_1 [°F]	C_R [DIN/CM²]	C_R [DIN/CM²]	C_R [DIN/CM²]	C_R [DIN/CM²]	ν [%]	P_2	α_1 [%]	ΔT [°F]	α_2 [%]	P [lb/IN²]
1	23	73.4	15	313.28	0.412	100.17	1.60	160	418.7	0.06	0.0110	0.46	0.027	1.11	0.39	0.24	0.007	3.766	0.011	0.115	0.07	91,746	0.10	2.18
2	40	104.0	175	3,655	0.545	86.70	1.39	173	407.4	0.03	0.0114	0.39	0.026	0.94	0.40	0.25	0.008	3.207	0.011	0.117	0.06	88,404	0.09	25.38
3	25	770	20	417.71	0.420	95.50	1.53	179	416.4	0.05	0.0111	0.43	0.027	1.04	0.39	0.24	0.007	3.548	0.011	0.114	0.07	91,641	0.10	2.90
4	26.8	83.8	35	730.99	0.458	93.81	1.50	178	414.0	0.05	0.0112	0.425	0.027	1.03	0.39	0.25	0.007	3.455	0.011	0.116	0.06	91,328	0.09	5.08
5	35	95.0	60	1,253	0.515	92.91	1.49	174	404.7	0.04	0.0113	0.41	0.027	0.99	0.39	0.25	0.007	3.425	0.011	0.113	0.05	90,806	0.09	8.70

RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

TABLA VI

CORRIDA	DAFO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	h	211.17	564.12	792.17	813.16	1,227	1,792	2,437	3,327	2,448	2,311	616.38
	Log h	2.32	2.56	2.90	2.91	3.09	3.25	3.39	3.52	3.39	3.36	2.79
2	h	2,397	3,092	3,824	5,137	5,650	5,878	6,278	5,536	211.17	165.51	159.80
	Log h	3.38	3.49	3.58	3.71	3.75	3.77	3.80	3.74	2.32	2.22	2.20
3	h	216.88	313.90	861.80	1,250	1,484	2,220	2,922	2,985	587.85		
	Log h	2.34	2.50	2.94	3.10	3.17	3.35	3.47	3.47	2.77		
4	h	565.02	873.21	1,347	2,032	2,882	4,423	662.04				
	Log h	2.75	2.94	3.13	3.31	3.46	3.65	2.82				
5	h	622.09	838.97	1,367	2,146	2,688	3,544	4,229	741.94			
	Log h	2.79	2.92	3.14	3.33	3.43	3.55	3.63	2.87			

h: BTU/Hr ft² °F



GRAFICA II

ECUACION DE BROMLEY (EB. PELICULAR)

$$h = h_c + h_r \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{h_r}{h_c} \frac{1}{(2.62 + h_r/h_c)} \right)^{0.25}$$

donde

$$h_c = 0.68 \left[\frac{g \rho_v (\rho_v - \rho_l) h_{fg} k_v^3}{D \mu (T_s - T_c)} \right]^{0.25}$$

$$h_r = \frac{\epsilon \sigma (T_s^4 - T_c^4)}{(T_s - T_c)}$$

$$h : \text{BTU}/\text{Hrft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

$$h_c : \text{BTU}/\text{Hrft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

$$h_r : \text{BTU}/\text{Hrft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

$$g : 4.18 \times 10^8 \text{ ft}/\text{Hr}^2$$

$$\rho_v : \text{lbm}/\text{ft}^3$$

$$\rho_l : \text{lbm}/\text{ft}^3$$

$$h_{fg} : \text{BTU}/\text{lbm}$$

$$k_v : \text{BTUft}/\text{Hrft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$$

$$D : \text{ft}$$

$$\mu : \text{lbm}/\text{Hrft}$$

$$T_s : ^\circ\text{F}$$

$$T_c : ^\circ\text{F}$$

$$\epsilon : \text{ft}^2/\text{Hr}$$

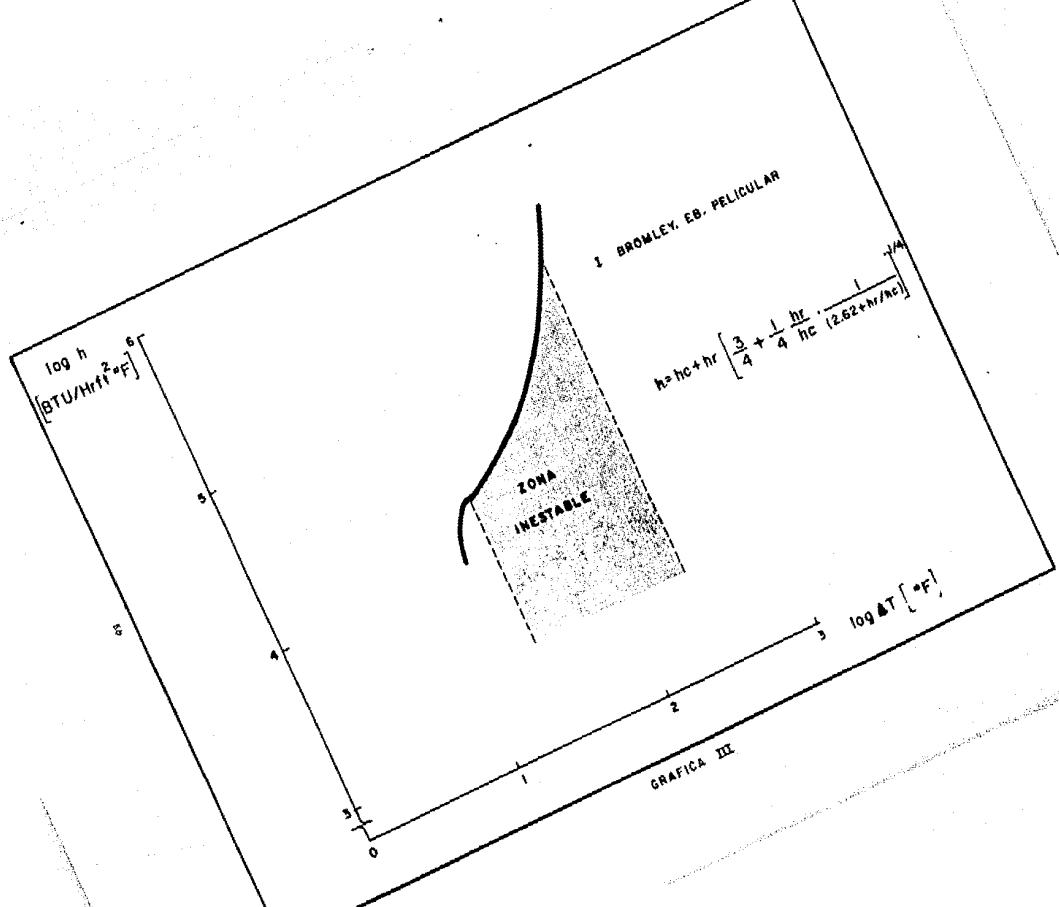
$$\sigma : \text{lbft}/\text{ft}$$

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ECUACION DE BROMLEY

TABLA VII

CORRIDA	DATO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1	h	9,748	13,882	14,885	20,795	21,474	22,882	23,611	24,358	27,525	31,904
	Log h	3.99	4.14	4.17	4.32	4.33	4.36	4.37	4.39	4.44	4.5	5.82
2	h	10,528	18,618	19,615	20,964	21,635	22,162	22,810	24,938	127,449	225,925	474,687
	Log h	4.02	4.27	4.29	4.32	4.34	4.35	4.36	4.40	5.10	5.44	5.68
3	h	4,889	7,524	10,577	11,873	12,327	12,791	13,011	13,755	14,255	16,942	512,864
	Log h	3.69	3.88	4.02	4.07	4.09	4.11	4.12	4.14	4.15	4.23	5.71
4	h	11,719	14,624	16,226	16,785	16,879	18,537	516,117				
	Log h	4.07	4.17	4.21	4.22	4.23	4.27	5.71				
5	h	17,125	22,445	23,411	23,904	26,204	27,001	27,815	581,310			
	Log h	4.23	4.35	4.37	4.38	4.42	4.43	4.44	5.76			

h: BTU/Hr ft² °F



GRAFICA III

ECUACION DE MONSTINSKI (EB. NUCLEADA)

$$h = 0.00658 P_c^{0.69} \left(\frac{q}{A} \right)^{0.7} \left[1.8 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0.11} + 4 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{1.2} + 10 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{10} \right]$$

$$h : \text{BTU}/\text{H}\lambda\text{ft}^2 \cdot \text{F}$$

$$P_c : \text{lb}/\text{in}^2$$

$$P : \text{lb}/\text{in}^2$$

$$\frac{q}{A} : \text{BTU}/\text{H}\lambda\text{ft}^2$$

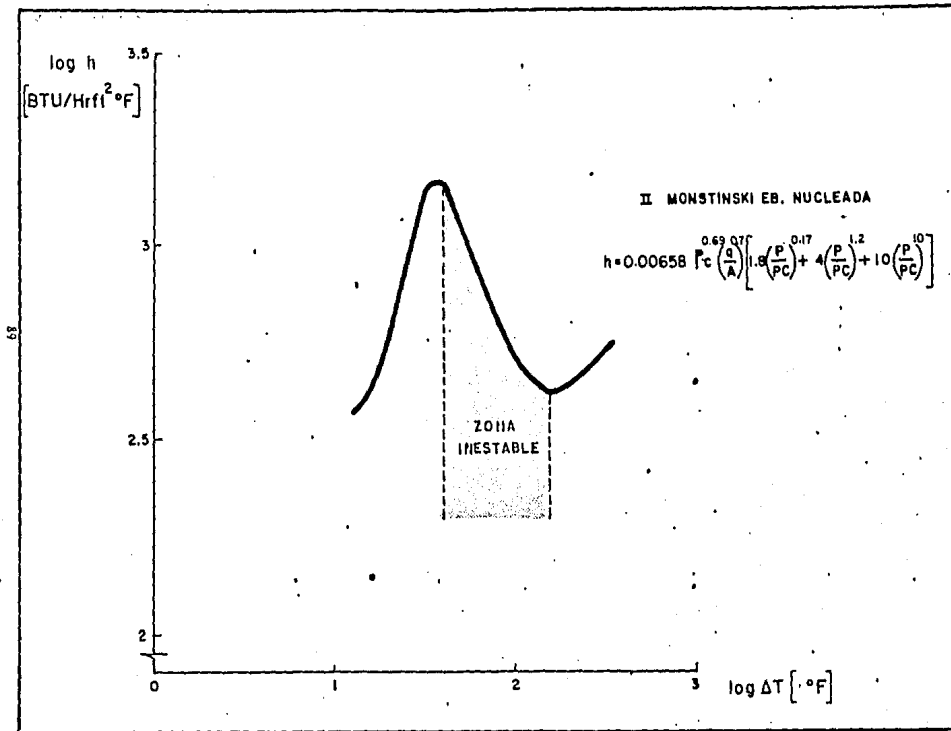
RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ECUACION DE MONSTINSKI

TABLE VIII

CORRIDA	DATO											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	h	35.6	90.6	188.7	255.3	346.1	477.9	608.4	756.5	671.8	671.8	965.2
	log h	1.6	2.0	2.2	2.4	2.5	2.7	2.8	2.9	2.8	2.9	3.0
2	h	471.65	640.97	799.40	1,105	1,234	1,336	1,445	1,475	429.54	488.03	566.73
	log h	2.67	2.81	2.90	3.04	3.09	3.13	3.16	3.17	2.63	2.69	2.75
3	h	13.39	64.85	214.74	313.18	366.10	502.96	649.21	775.42	986.15		
	log h	1.13	1.81	2.33	2.50	2.56	2.70	2.81	2.89	2.99		
4	h	154.38	272.27	407.34	561.26	718.57	1,053	1,163				
	log h	2.19	2.44	2.61	2.75	2.86	3.02	3.07				
5	h	171.01	301.61	451.24	620.16	796.00	993.55	1,154	1,363			
	log h	2.23	2.48	2.65	2.79	2.90	3.00	3.06	3.13			

88

$h: \text{BTU/HA } ft^2 \text{ } ^\circ F$



GRAFICA IV

ECUACION DE MC NELLY (EB. NUCLEADA)

$$h = 0.225 \left(\frac{9 C_e}{A \lambda} \right) \left(\frac{144 P k_e}{\sigma} \right)^{0.31} \left(\frac{\rho_e}{\mu} - 1 \right)^{0.33}$$

$$h : \text{BTU/Hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\frac{q}{A} : \text{BTU/Hr ft}^2$$

$$e : \text{BTU/lbm } ^\circ\text{F}$$

$$h_{fg} : \text{BTU/lbm}$$

$$P : \text{lb}_f/\text{in}^2$$

$$k_e : \text{BTU/Hr ft } ^\circ\text{F}$$

$$\sigma : \text{lb}_f/\text{ft}$$

$$\rho_e : \text{lbm}/\text{ft}^3$$

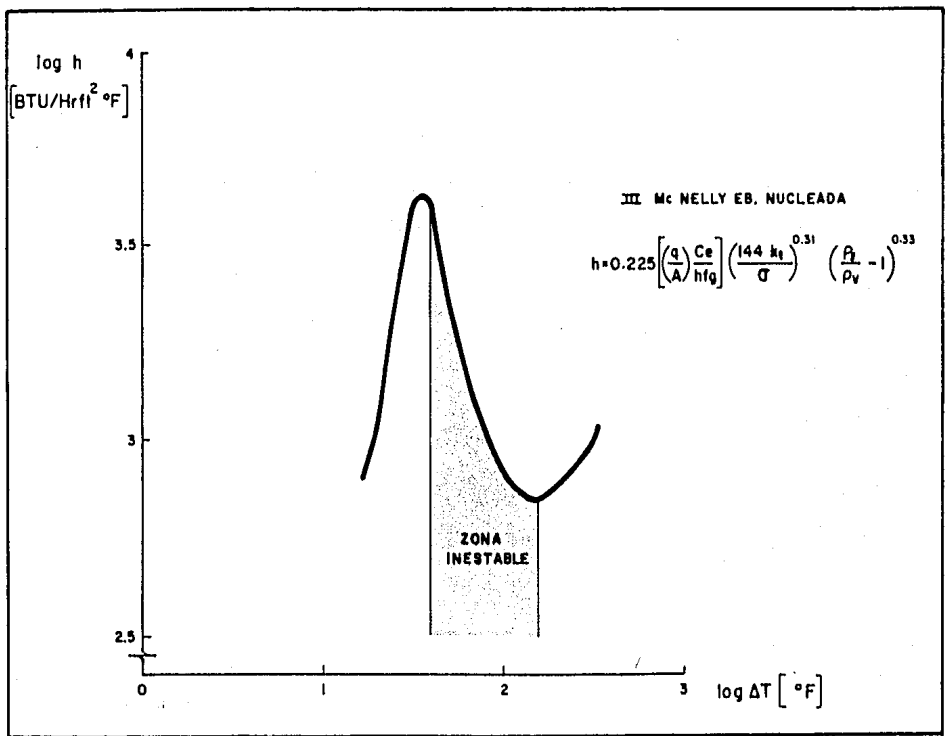
$$\rho_v : \text{lbm}/\text{ft}^3$$

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ECUACION DE MC NELLY

TABLA IX

CORRIDA	DATO											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	h	37.32	141.81	344.54	620.21	961.93	1,525	2,153	2,940	2,481	3,101	4,164
	Log h	1.57	2.15	2.54	2.79	2.98	3.18	3.33	3.47	3.39	3.49	3.62
2	h	816	1,264	1,734	2,754	3,224	3,611	4,039	4,161	713.9	856.8	1,061
	Log h	2.91	3.10	3.24	3.44	3.51	3.56	3.61	3.62	2.85	2.93	3.03
3	h	4.48	42.64	235.84	404.30	505.32	795.46	1,145	1,476	2,081		
	Log h	0.65	1.63	2.37	2.61	2.70	2.90	3.06	3.17	3.32		
4	h	145.9	328.3	583.70	922.7	1,313	2,266	2,613				
	Log h	2.16	2.56	2.77	2.97	3.12	3.36	3.42				
5	h	181.33	407.87	725.23	1,146	1,632	2,240	2,779	3,519			
	Log h	2.26	2.61	2.86	3.06	3.21	3.35	3.44	3.55			

h: BTU/Ha.ft °F



III Mc NELLY EB. NUCLEADA

$$h = 0.225 \left[\frac{q}{A} \frac{C_e}{hfg} \right] \left(\frac{144 k_t}{\sigma} \right)^{0.31} \left(\frac{p}{p_v} - 1 \right)^{0.33}$$

GRAFICA V

CORRELACIONES DE AUTORES SOVIETICOS (EB. NUCLEADA)

$$Nu_{\bullet} = A P r^{n_1} \cdot Pe^{n_2} \cdot K_p^{n_3} \cdot Ke^{n_4} \cdot A_r^{n_5}$$

CUADRO I

AUTOR	VARIABLE	A	n ₁	n ₂	n ₃	n ₄	n ₅
Kichigan- Tobilevich		1.04 x 10 ⁻⁴	0	0.7	0.7	0	0.12
Kutateladze		7.00 x 10 ⁻⁴	-0.35	0.7	0.7	0	0
Brorishanskiy Minchenko		8.7 x 10 ⁻⁴	0	0.7	0.7	0	0
Khuzhilin- Averin		0.082	-0.5	0.7	0	0.377	0
Labuntzov		0.125	-0.32	0.65	0	0.35	0

Donde

$$Nu_{\bullet} = h \left(\frac{g_0}{g} \frac{\sigma}{(\rho_1 - \rho_2)} \right)^{0.5}$$

$$Pe = \frac{(g/A)}{\alpha_e \rho_2 h_1 g}$$

$$K_e = \frac{(\rho_v h_{fg})}{J C_e T_s \rho_s (g \sigma (\rho_s - \rho_v) / g_0)^{1/4}}$$

$$K_p = \frac{P}{(g \sigma (\rho_s - \rho_v) / g_0)^{1/4}}$$

$$Ar = \frac{g}{\nu^2} \left(\frac{g_0}{g} \frac{\sigma}{(\rho_s - \rho_v)} \right)^{3/4} \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_s} \right)$$

$$h : \text{BTU/Hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$k_e : \text{BTU/Hr ft } ^\circ\text{F}$$

$$g_0 : 4.17 \times 10^8 \text{ lbm ft/Hr}^2 \text{ lb f}$$

$$\sigma : \text{lb f/ft}$$

$$g : 4.17 \times 10^8 \text{ ft/Hr}^2$$

$$\rho_s : \text{lbm/ft}^3$$

$$\rho_v : \text{bm/ft}^3$$

$$|q/A| : \text{BTU/Hr ft}^2$$

$$\alpha_e : \text{ft}^2/\text{Hr}$$

$$h_{fg} : \text{BTU/lbm}$$

$$J : 778 \text{ ft lbm/BTU}$$

$$C_e : \text{BTU/lbm } ^\circ\text{F}$$

$$T_s : ^\circ\text{F}$$

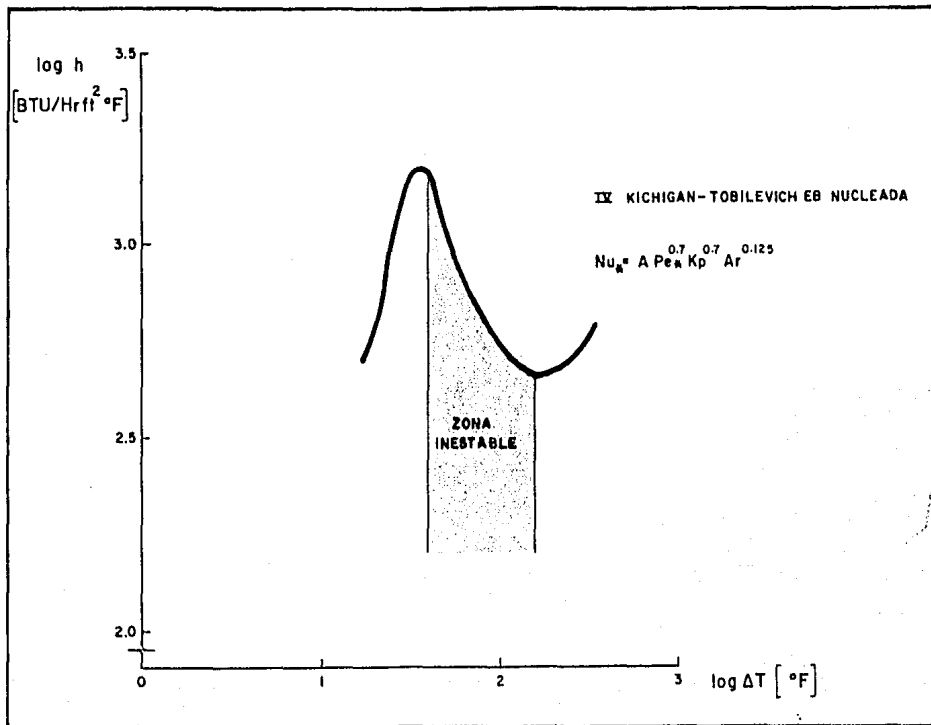
$$\nu : \text{ft}^2/\text{Hr}$$

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ECUACION DE KICHIGAN-TOBILEVICH

TABLA X

CORRIDA	DATO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	h	9.48	24.14	44.92	67.79	92.17	127.27	162.02	201.45	178.89	204.13	257.04
	Log h	0.98	1.38	1.65	1.83	1.96	2.10	2.21	2.30	2.25	2.32	2.41
2	h	501.38	681.38	849.80	1,772	1,312	1,420	1,536	1,568	456.62	518.80	602.46
	Log h	2.70	2.83	2.93	3.07	3.12	3.15	3.19	3.20	2.66	2.71	2.78
3	h	4.29	20.76	68.74	100.25	117.19	161	207.82	248.22	315.68		
	Log h	0.63	1.32	1.84	2.00	2.07	2.21	2.32	2.39	2.50		
4	h	65.07	114.77	171.72	236.60	302.91	443.78	490.36				
	Log h	1.81	2.06	2.23	2.37	2.48	2.65	2.69				
5	h	102.34	180.51	270.06	372.10	476.40	594.63	690.52	815.94			
	Log h	2.01	2.26	2.43	2.57	2.68	2.77	2.84	2.91			

h: BTU/H₂O ft °F



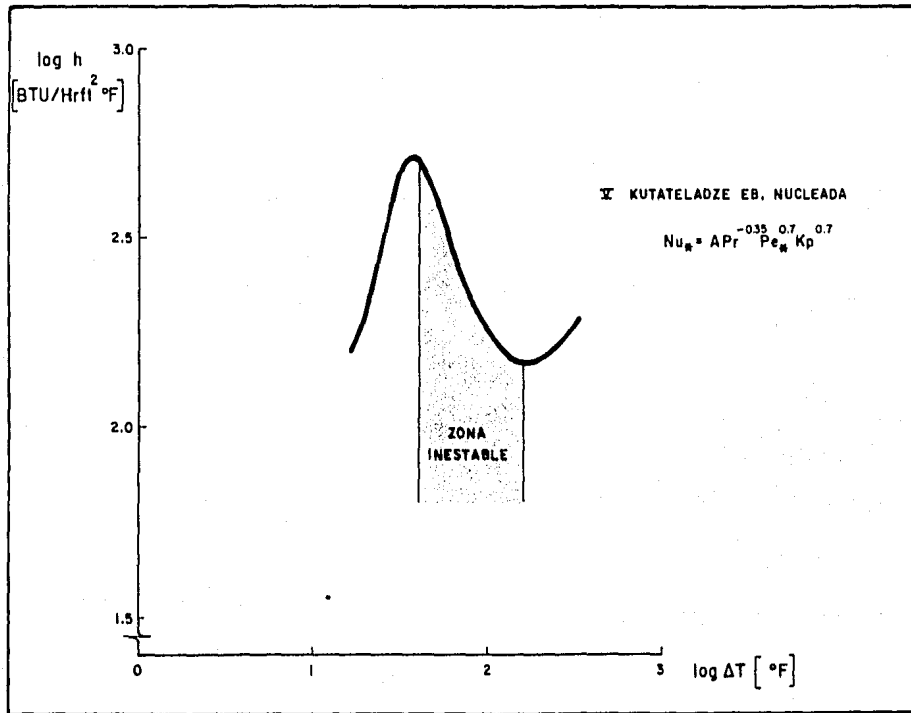
GRAFICA VI

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ECUACION DE KUTATELADZE

TABLA XI

CORRIDA	DATO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	h	2.63	6.71	12.49	18.84	25.62	35.38	45.04	56.00	49.73	58.14	71.46
	Log h	0.42	0.83	1.10	1.28	1.41	1.55	1.65	1.75	1.70	1.76	1.85
2	h	162.21	220.45	274.94	380.07	424.32	459.43	496.94	507.43	147.73	167.85	194.92
	Log h	2.21	2.34	2.44	2.58	2.63	2.66	2.70	2.71	2.17	2.22	2.29
3	h	1.25	6.04	20.02	29.19	34.17	46.88	60.51	72.27	91.91		
	Log h	0.10	0.78	1.30	1.47	1.53	1.67	1.78	1.86	1.96		
4	h	18.90	33.33	49.87	68.71	87.97	128.88	142.41				
	Log h	1.28	1.52	1.70	1.84	1.94	2.11	2.15				
5	h	31.34	55.28	82.70	113.95	145.88	182.09	211.45	249.86			
	Log h	1.50	1.74	1.92	2.06	2.16	2.26	2.33	2.40			

h: BTII/H₂gt °F



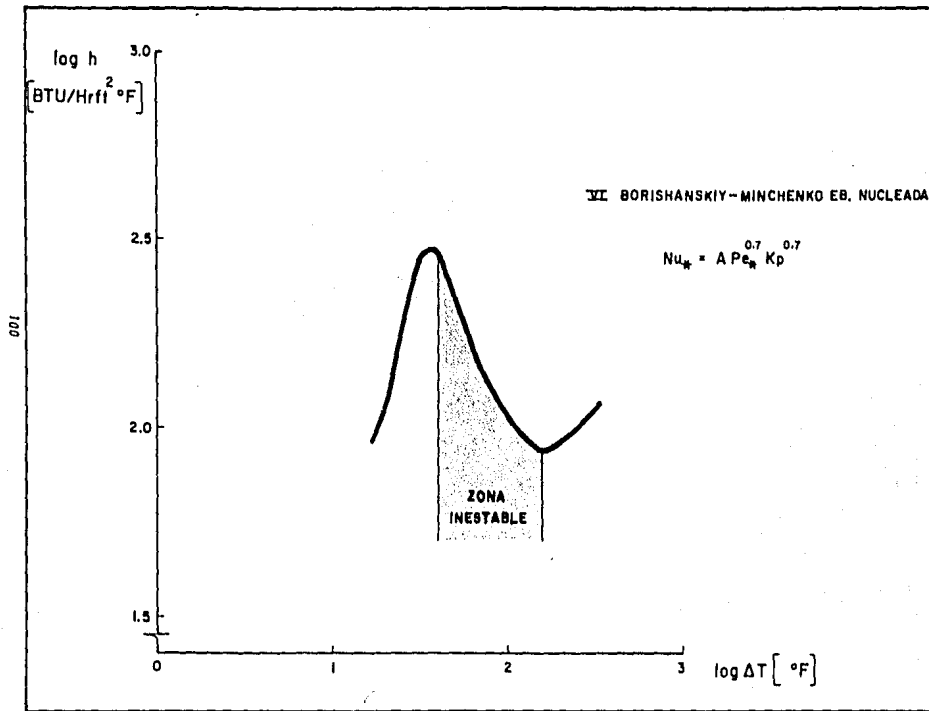
GRAFICA VII

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ECUACION DE BORISHANSKIY-MINCHENKO

TABLA XII

CORRIDA	DATO	DATOS										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	h	1.54	3.91	7.28	10.99	14.94	20.23	26.26	32.65	28.99	33.89	41.66
	Log h	0.19	0.59	0.86	1.04	1.17	1.31	1.42	1.51	1.46	1.53	1.62
2	h	95.14	129.30	161.26	292.92	248.88	269.47	291.47	297.62	86.65	98.45	114.32
	Log h	1.98	2.11	2.21	2.35	2.40	2.43	2.46	2.47	1.94	1.99	2.06
3	h	0.73	3.51	11.63	16.97	19.83	27.25	35.17	42.01	53.42		
	Log h	0.14	0.55	1.07	1.23	1.30	1.44	1.55	1.62	1.73		
4	h	11.05	19.49	29.16	40.18	51.44	75.36	83.27				
	Log h	1.04	1.29	1.46	1.60	1.71	1.88	1.92				
5	h	18.16	32.03	47.92	66.02	84.53	105.51	122.52	144.77			
	Log h	1.26	1.51	1.68	1.82	1.93	2.02	2.09	2.16			

h: BTU/HAft °F



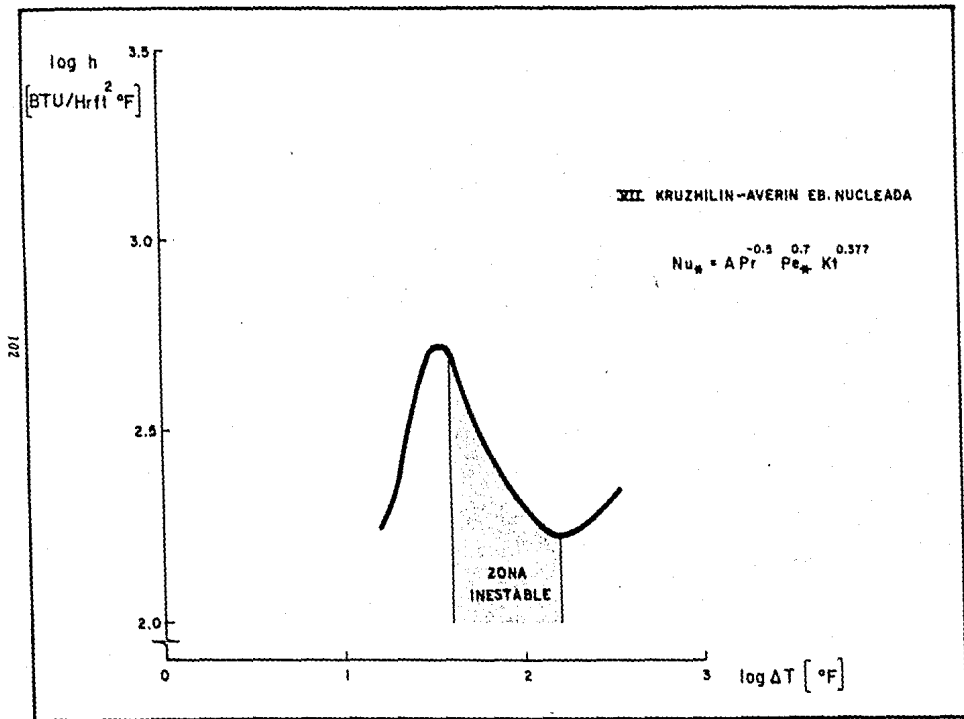
GRAFICA VIII

RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ECUACION DE KRUIILIN-AVERIN

TABLA XIII

CORRIDA	DATO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	h	64.88	165.23	307.49	464.03	630.94	871.26	1,110	1,379	1,225	1,432	1,760
	log h	1.81	2.22	2.49	2.67	2.80	2.94	3.04	3.14	3.09	3.16	3.25
2	h	685.89	932.13	1,163	1,607	1,794	1,943	2,101	2,146	624.66	709.72	824.17
	log h	2.84	2.97	3.07	3.21	3.25	3.29	3.32	3.33	2.80	2.85	2.92
3	h	24.55	118.82	393.42	573.75	670.70	921.43	1,189	1,421	1,807		
	log h	1.39	2.07	2.59	2.76	2.83	2.96	3.08	3.15	3.26		
4	h	258.58	456.08	682.35	940.17	1,204	1,763	1,949				
	log h	2.41	2.66	2.83	2.97	3.08	3.25	3.29				
5	h	290.32	512.04	766.08	1,056	1,351	1,687	1,959	2,315			
	log h	2.46	2.71	2.88	3.02	3.13	3.23	3.29	3.36			

h: BTU/Hr ft² °F



GRAFICA IX

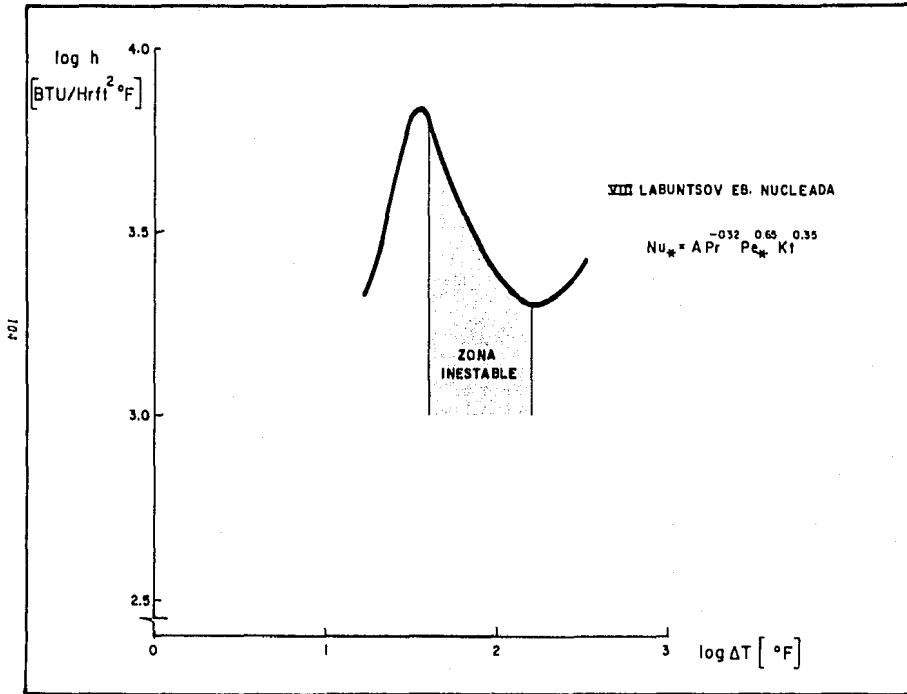
RESULTADOS OBTENIDOS CON LA ECUACION DE LABUNTSOV

TABLA XIV

CORRIDA	DATO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	h	64.42	153.45	273.18	400.30	532.47	718.53	899.04	1,101	985.67	1,140	1,380
	Log h	1.81	2.19	2.44	2.60	2.73	2.86	2.95	3.04	2.99	3.06	3.14
2	h	581.40	773.01	948.98	1,282	1,420	1,529	1,644	1,676	533.05	600.13	669.51
	Log h	2.76	2.89	2.98	3.11	3.15	3.18	3.22	3.22	2.73	2.78	2.84
3	h	26.11	117.89	343.16	487.15	563.15	756.32	958.61	1,131	1,413		
	Log h	1.42	2.05	2.54	2.69	2.75	2.88	2.98	3.05	3.15		
4	h	232.40	393.62	572.20	779.56	969.27	1,382	1,516				
	Log h	2.37	2.60	2.76	2.89	2.99	3.14	3.18				
5	h	259.60	439.68	639.16	860.73	1,083	1,330	1,528	1,784			
	Log h	2.41	2.64	2.81	2.93	3.03	3.12	3.18	3.25			

103

h: BTU/Hr ft² °F



GRAFICA I

3.3.6 ANÁLISIS GLOBAL DE RESULTADOS OBTENIDOS

TABLA XV

AUTOR	DATO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<u>1/</u>	log h	3.38	3.19	3.58	3.71	3.75	3.77	3.80	3.74	2.32	2.22	2.20
<u>2/</u>	log h	4.02	4.27	4.29	4.32	4.34	4.35	4.36	4.40	5.10	5.44	5.68
<u>3/</u>	log h	2.67	2.61	2.90	3.04	3.09	3.13	3.16	3.17	2.63	2.69	2.75
<u>4/</u>	log h	2.91	3.16	3.24	3.44	3.51	3.56	3.61	3.62	2.85	2.93	3.03
<u>5/</u>	log h	2.70	2.83	2.93	3.07	3.12	3.15	3.19	3.20	2.66	2.71	2.78
<u>6/</u>	log h	2.21	2.34	2.44	2.58	2.63	2.66	2.70	2.71	2.17	2.22	2.29
<u>7/</u>	log h	1.98	2.11	2.21	2.35	2.40	2.43	2.46	2.47	1.94	1.99	2.06
<u>8/</u>	log h	2.84	2.97	3.07	3.21	3.25	3.29	3.32	3.33	2.80	2.85	2.92
<u>9/</u>	log h	2.76	2.89	2.98	3.11	3.15	3.18	3.22	3.22	2.73	2.78	2.84

- 1/ Corrida original experimental
2/ Bromley
3/ Monstinsky
4/ Mc Nelly
5/ Kichigan-Tobílevich
6/ Kutateladze
7/ Borishanskiy-Mínchenko
8/ KruzhiLin-Averin
9/ Labuntsov

3.3.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tendencia: Para hacer un análisis de las tendencias que siguen las curvas obtenidas, se ha dividido en dos partes la curva para su estudio. La primera parte muestra a la curva en ten-

TABLA XVI

AUTOR	r (1-8)	r (9-11)
Experimental	0.903	-0.934
Bromley	0.821	0.995
Monstinsky	0.951	1.000
Mc Nelly	0.946	0.998
Kichigan-T.	0.952	0.995
Kutateladze	0.952	0.995
Borishanskiy	0.947	0.995
Kruzhilin	0.949	0.995
Labuntzov	0.943	0.999

dencia ascendente y estable, - esto involucra a la vaporización convectiva y a la ebullición nucleada (para fines de análisis, datos 1-8); la segunda parte, también con tendencia estable involucra a la ebullición pelicular (para fines de análisis, datos 9-11).

El estudio se llevará a cabo - analizando los coeficientes de correlación para cada parte de

la curva y asimismo para cada autor correspondiente.

Se dividió en dos la curva debido a que ésta presenta - primeramente una tendencia ascendente y estable hasta llegar a un máximo, para posteriormente entrar a una zona de inestabilidad presentando un brusco descenso, y nuevamente entrar a un comportamiento estable.

Como se puede observar en la Tala XVI todas las curvas con excepción a la correspondiente a la Ec. de Bromley en la zona 1, presentan una tendencia similar. Es normal que la Ec. de Bromley no presente una misma tendencia en la zona 1 debido a que ésta es especial para la zona 2 (Eb. Pelicular).

Por lo que se refiere a la zona 2 (vaporización convectiva y ebullición nucleada) vemos que todas las correlaciones teóricas presentan una tendencia muy parecida entre sí, y la experimental presenta una tendencia diferente, esto se debe a fallas en el manejo del equipo y se debe tener mucho cuidado en la lectura de cada dato, ya que hay que dejar estabilizar perfectamente el sistema.

Del análisis de las tablas XV y XVI se puede observar que para la primera zona (puntos del 1 al 8) las ecuaciones que más se acercan a los resultados obtenidos experimentalmente son la de Mc. Nelly y la de Bromley; mientras que para la segunda zona (puntos del 9 al 11) son las ecuaciones de Kutateladze y la de Borishanskiy-Minchenko.

Por lo anterior analizado se puede concluir que los resultados obtenidos experimentalmente y las correlaciones pre

sentadas en la literatura presentan tendencias, si no iguales, similares, indicando con esto que la capacidad del equipo, para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor superficial, es óptima.

3.4

EXPERIMENTO N° 3"EFECTO DE LA PRESION EN EL FLUJO DE CALOR
CRITICO EN LA EBULLICION"

3.4.1 OBJETIVO: Determinar el efecto de la presión sobre el flujo de calor crítico en la ebullición.

3.4.2 ACTIVIDADES:

- Encender el suministro eléctrico a un valor de aprox. 0.5 Amp, manteniendo el caudal de agua de refrigeración cerrado ($m_w = 0.00 \text{ lb/Hr}$)
- Esperar a que la presión sea aprox. 40 KN/m^2
- Llevar al sistema a las condiciones críticas regulando el caudal de agua para mantener la presión establecida.
- Tomar las siguientes lecturas:

Pv: Presión

E: Voltaje

I: Amperaje

- Ajustando el caudal de agua y el suministro eléctrico, establecer las condiciones críticas para diversas presiones.
- La Tabla (I) muestra los datos experimentales -- obtenidos.
- La Tabla (II) muestra los resultados obtenidos.

EFFECTO DE LA PRESION EN EL FLUJO DE CALOR CRITICO

TABLA I

CORRIDAS		1	2	3	4	5
1	$P_v: KN/m^2$	15	25	30	40	
	I: Amp	2.0	2.10	2.20	2.30	
	E: Volt	67	72.5	75	80	
2	$P_v: KN/m^2$	75	108	130	172	206
	I: Amp	1.87	1.92	1.96	2.01	2.06
	E: Volt	121	124	127	131	136

3.4.3 CALCULOS:Flujo de Calor Crítico: ϕ_{max}

$$\phi_{max} = \frac{E \times I}{A}$$

$$\text{donde: } A = 1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

De donde para la Corrida 1:

$$\phi_{max_1} = \frac{E_1 \times I_1}{A} = \frac{2.7 (67)}{1.3} = 103.8 \text{ KW/m}^2$$

$$\phi_{max_2} = \frac{E_2 \times I_2}{A} = \frac{2.1 (72.5)}{1.3} = 117.12 \text{ KW/m}^2$$

$$\phi_{max_3} = \frac{E_3 \times I_3}{A} = \frac{2.2 (75)}{1.3} = 126.92 \text{ KW/m}^2$$

$$\phi_{max_4} = \frac{E_4 \times I_4}{A} = \frac{2.3 (80)}{1.3} = 141.54 \text{ KW/m}^2$$

TABLA II

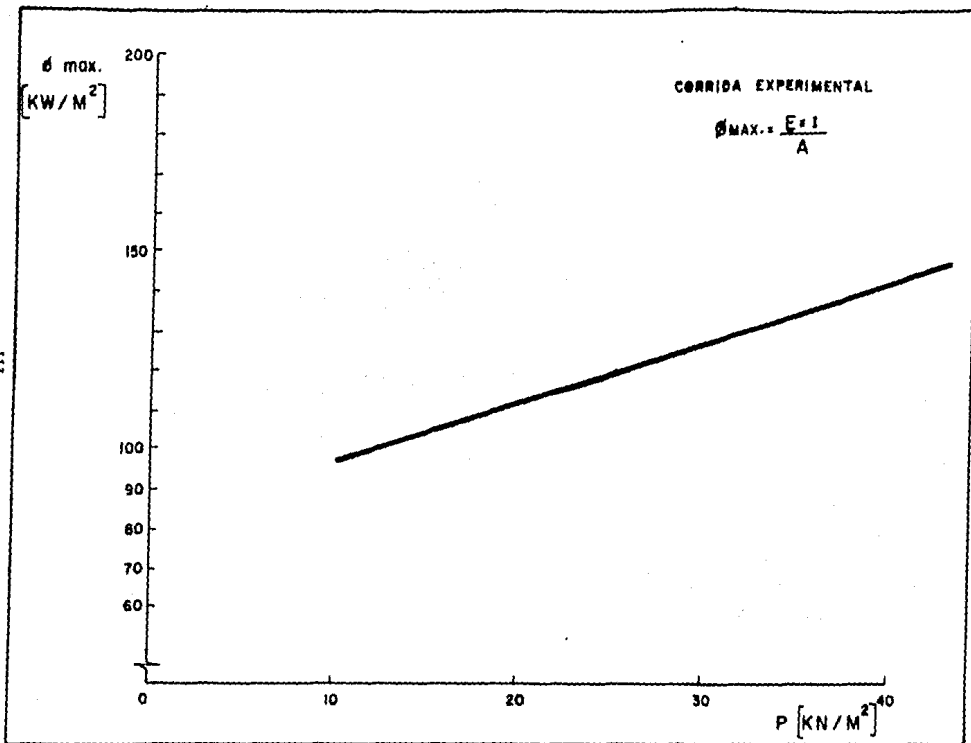
CORRIDAS		1	2	3	4	5
1	\varnothing_{max}					
	KW/m ²	103.08	117.12	126.92	141.54	
2	\varnothing_{max}					
	KW/m ²	174.05	183.14	191.48	202.55	215.51

3.4.4 COMENTARIOS

Se puede observar en la gráfica N° 1 que mientras la -- presión absoluta aumenta, el flujo de calor máximo también.

Lo anterior se debe a que a medida que la presión de va por dentro del cilindro aumenta, existe una mayor demanda de energía para que el líquido comience a ebullición en forma intensa y por consecuencia el flujo de calor máximo o crítico aumenta.

En las siguientes gráficas se muestran las curvas de -- Presión Absoluta Φ Flujo de Calor Crítico para correlaciones



GRAFICA 1

teóricas presentadas en la literatura, Estas nos sirven de base para analizar y comparar los resultados experimentales obtenidos.

Dentro de las correlaciones presentadas en la literatura se encuentran las siguientes:

- Ec. de Zuber
- Ec. de Kutateladze
- Ec. de Chang-Shyden
- Ec. de Rohsenow-Griffith
- Ec. de Zuber-Tribus
- Ec. de Monstinski

3.4.5 ANALISIS DE RESULTADOS

Se procederá a analizar cada una de las correlaciones teóricas, aplicándoles los datos obtenidos experimentalmente y encontrar curvas teóricas que nos sirvan de base para hacer la comparación con la curva experimental.

TABLA III

CORRIDA	DATO	P_v KN/m^2	T_{sat} °K	h_{fg} J/kg	Kg/m^3	Kg/m^3	$\text{N/m} \times 10^3$
1	1	15	306	177,000	1,480	8.33	20.0
	2	25	324	167,000	1,440	13.33	19.5
	3	30	332	166,000	1,420	16.13	18.0
	4	40	343	162,000	1,390	21.05	17.5
2	1	75	367	150,000	1,330	39.22	14.5
	2	108	386	140,000	1,290	55.56	13.0
	3	130	395	134,000	1,260	69.93	10.5
	4	172	410	124,000	1,230	90.09	10.0
	5	206	423	117,000	1,200	112.36	9.1

- Ec. de Zuber y Tribus (SI).

$$\phi_{max} = \frac{\pi h_{fg} A}{24} \left(\frac{9\sigma (P_1 - P_2)}{A^2} \right)^{0.15} \left(\frac{A}{A_1 + A_2} \right)^{0.5} \quad \perp$$

$$\phi_{max}: \text{W/m}^2$$

$$h_{fg}: \text{J/kg}$$

$$\rho_g: \text{Kg/m}^3$$

$$\rho_f: \text{Kg/m}^3$$

$$\sigma: \text{N/m}$$

- Ec. de Zuber y Tribus (1). Original

$$\phi_{max} = 0.13 \rho_f h_{fg} \left(\frac{\sigma (\rho_1 - \rho_2) g_0}{\rho_g^2} \right)^{0.15} \left(\frac{A}{A_1 + A_2} \right)^{0.5}$$

$$\phi_{max}: \text{BTU/hr ft}^2$$

$$\rho_v: \text{lbm/ft}^3$$

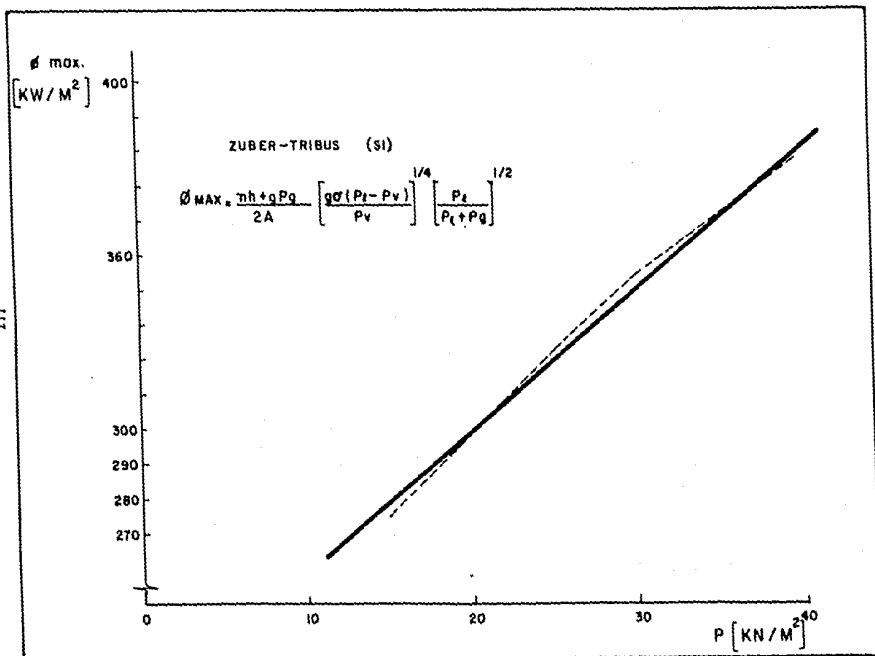
$$h_{fg}: \text{BTU/lbm}$$

$$\sigma: \text{lb}_f/\text{ft}$$

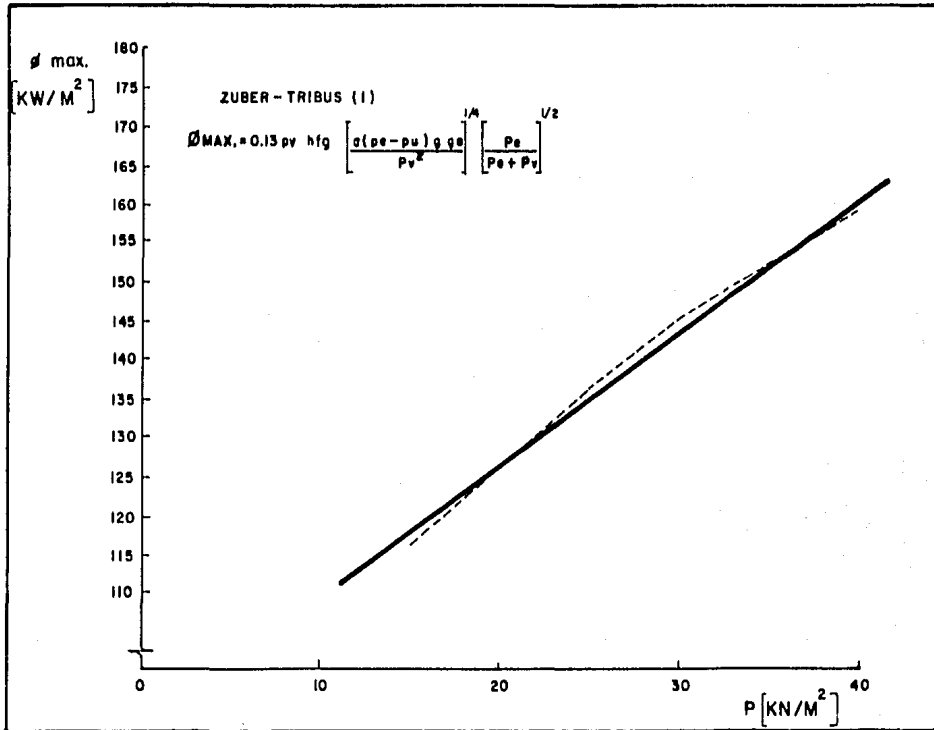
$$\rho_c: \text{lbm/ft}^3$$

$$g: 4.17 \times 10^8 \text{ ft/Hr}^2$$

$$g_0: 4.17 \times 10^8 \text{ lbm ft/Hr}^2 \text{ lb}_f$$



GRAFICA II



GRAFICA III

- Ec. de Zuber y Tribus [2]. Sugerencia por Rohsenow en: Handbook of Heat Transfer. Rohsenow-Hartnett 1973 pag. 13-32

$$q_{max} = 0.18 p_c h_{fg} \left(\frac{\sigma (P_s - P_c) g g_0}{\rho_c^2} \right)^{0.25} \left(\frac{P_s}{P_s + P_c} \right)^{0.5}$$

- Las mismas unidades que la anterior

- Ec. de Kutateladze

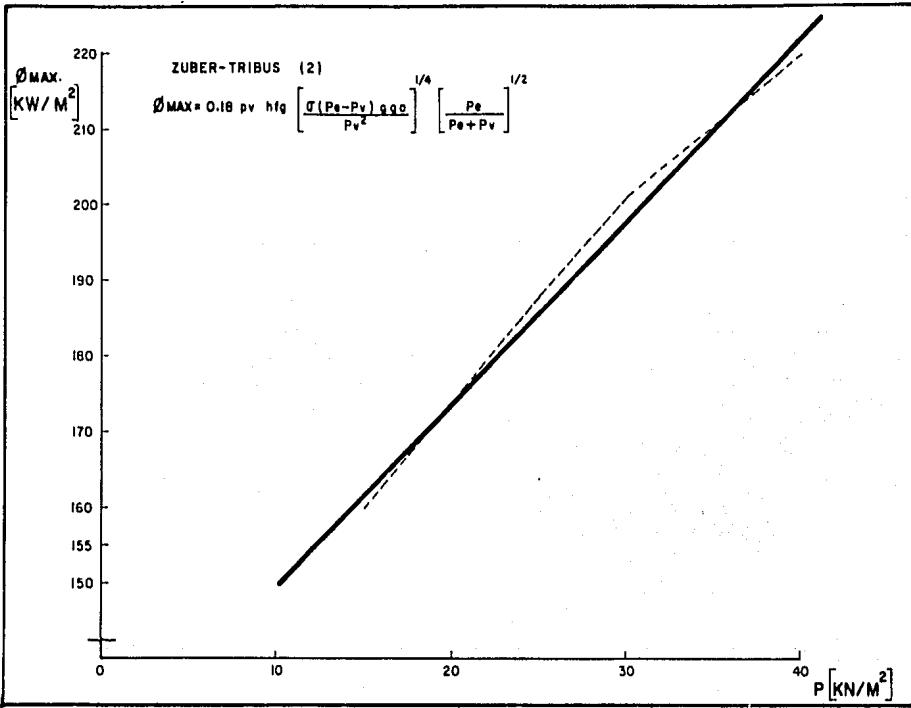
$$q_{max} = 0.16 p_c h_{fg} \left(\frac{\sigma (P_s - P_c) g g_0}{\rho_c^2} \right)^{0.25}$$

- Las mismas unidades que la Ec. de Zuber y Tribus [1].

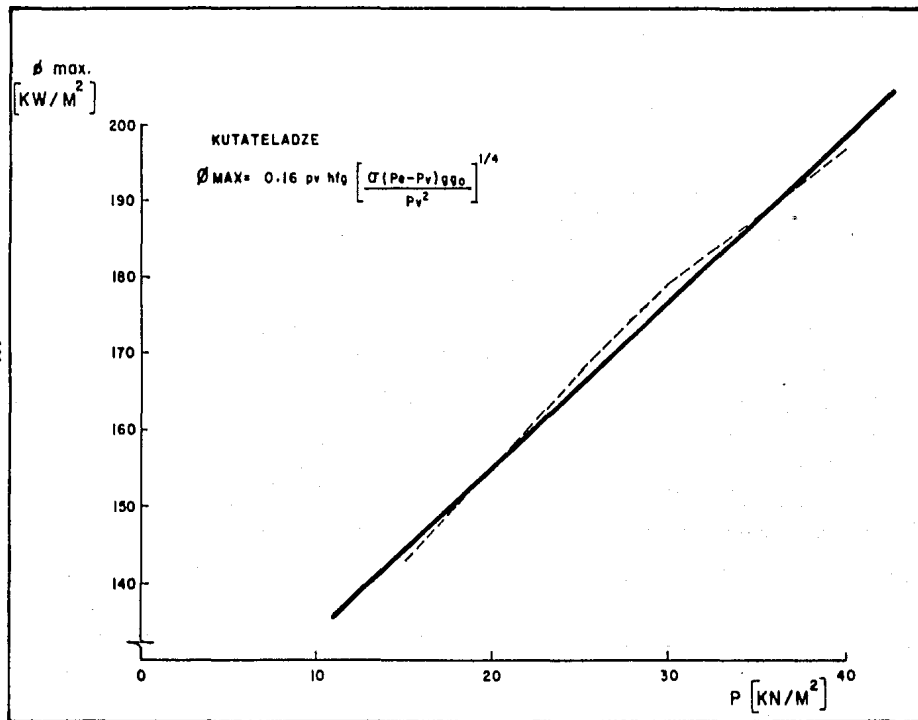
- Ec. de Chang-Snyder

$$q_{max} = 0.145 p_c h_{fg} \left(\frac{\sigma (P_s - P_c) g g_0}{\rho_c^2} \right)^{0.25} \left(\frac{P_s + P_c}{P_s} \right)^{0.5}$$

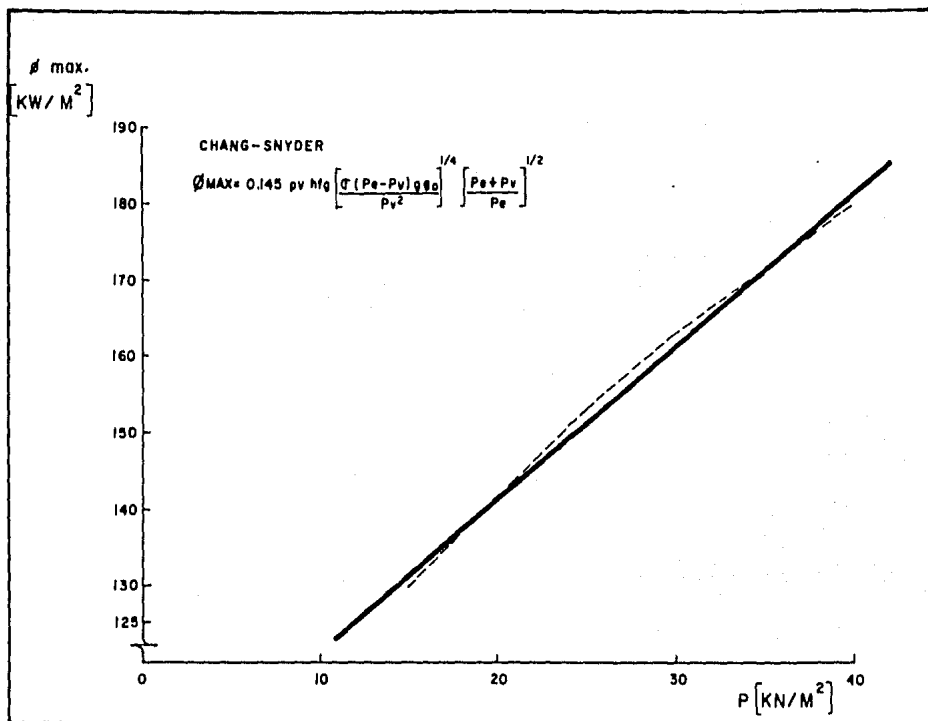
120



GRAFICA IV



GRAFICA V



GRAFICA VI

- * Las mismas unidades que la Ec. de Zuber y Tribus (1).

- Ec. de Rohsenow-Griffith

$$q_{max} = 143 \rho_c h_{fg} \left(\frac{g}{g_c}\right)^{0.25} \left(\frac{\rho_s - \rho_c}{\rho_c}\right)^{0.6}$$

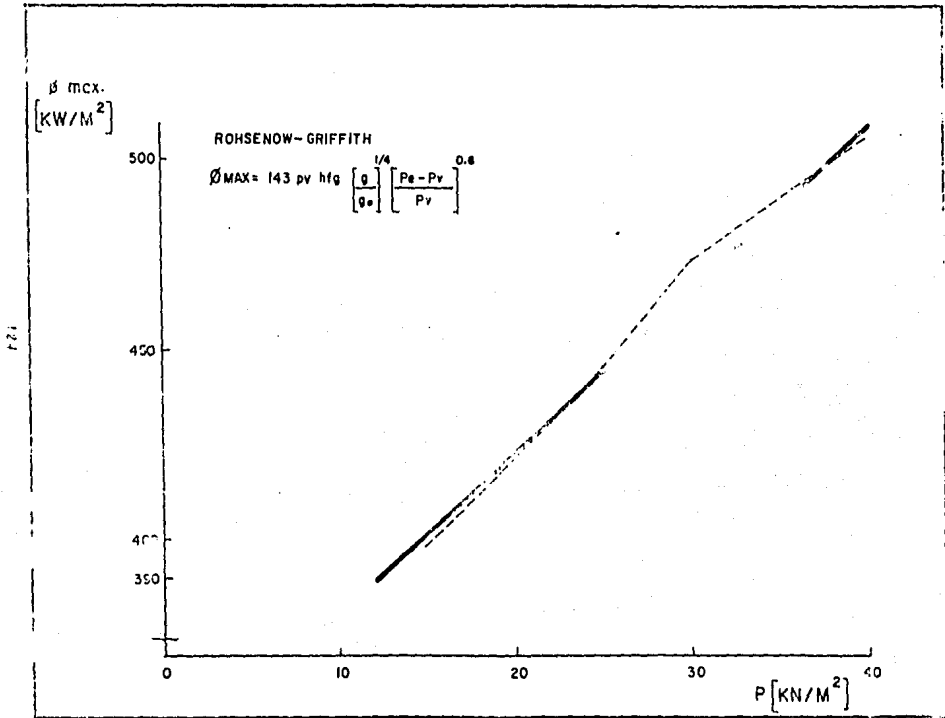
- * Las mismas unidades que la Ec. de Zuber y Tribus (1).

- Ec. de Kutateladze-Zuber

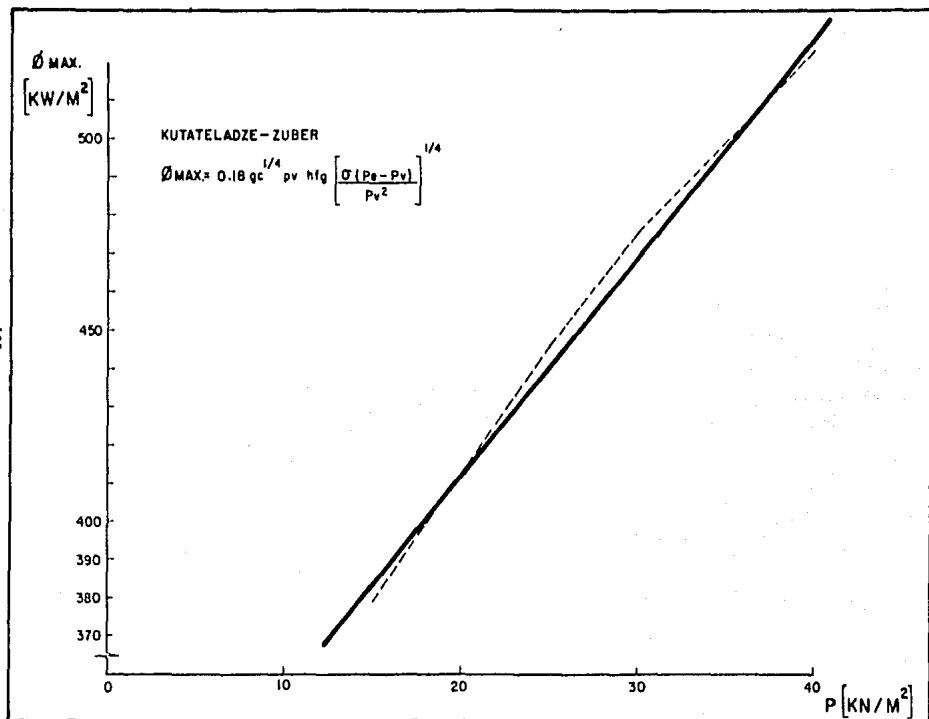
$$q_{max} = 0.18 g_c^{0.25} \rho_c h_{fg} \left(\frac{\sigma(\rho_s - \rho_c)}{\rho_c^2}\right)^{0.25}$$

- * Las mismas unidades que la Ec. de Zuber y Tribus (1).

1/ Handbook of Heat Transfer.
Rohsenow-Hartnett 1973
Pag. 13-33



GRAFICA XI



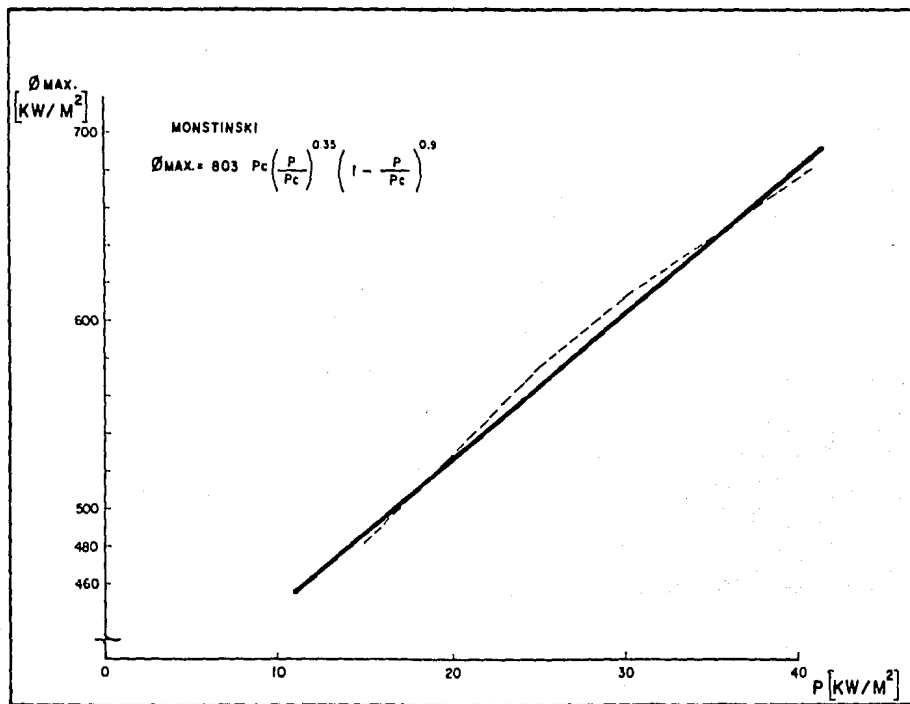
GRAFICA VIII

- Ec. de Monstinski

$$Q_{max} = 803 P_c \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0.35} \left(1 - \frac{P}{P_c} \right)^{0.9}$$

$$P: \text{ lb/in}^2$$

$$P_c: \text{ lb/in}^2$$



GRAFICA IX

3.4.6 RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS RELACIONES TEORICAS

$$\varnothing_{\max} = KW/M^2$$

TABLA IV

CORRIDA	AUTOR	DATO 1 \varnothing_{\max}	DATO 2 \varnothing_{\max}	DATO 3 \varnothing_{\max}	DATO 4 \varnothing_{\max}	DATO 5 \varnothing_{\max}
1	1	275	323	344	378	
	2	116	136	145	159	
	3	143	168	179	197	
	4	130	153	163	180	
	5	398	445	473	506	
	6	379	446	476	523	
	7	160	188	201	220	
	8	483	576	613	677	
2	1	446	474	475	484	487
	2	188	199	200	204	205
	3	234	251	253	259	264
	4	216	232	235	244	250
	5	580	605	622	620	622
	6	622	665	671	689	701
	7	260	276	277	282	284
	8	838	945	1,004	1,097	1,160
<u>1/</u>	Zuber-Tribus (ST)	<u>4/</u>	Chang-Snyder	<u>7/</u>	Zuber-Tribus (2)	
<u>2/</u>	Zuber-Tribus (1)	<u>5/</u>	Rohsenow-Griffith	<u>8/</u>	Monstinski	
<u>3/</u>	Kutateladze	<u>6/</u>	Kutateladze-Zuber			

ANALISIS SOBRE LA CORRIDA DOS

$$\phi_{\max} = \text{KW/M}^2$$

Conclusiones

TABLA V

CORRIDA	AUTOR	DATO 1	DATO 2	DATO 3	DATO 4
2	<u>1/</u>	103	117	127	142
2	<u>2/</u>	275	323	344	378
2	<u>3/</u>	116	136	145	159
2	<u>4/</u>	143	168	179	197
2	<u>5/</u>	130	153	163	180
2	<u>6/</u>	398	445	473	506
2	<u>7/</u>	379	446	476	523
2	<u>8/</u>	160	188	201	220
2	<u>9/</u>	483	576	613	677

1/ Corrida experimental2/ Zuber-Tribus (SI)3/ Zuber-Tribus (I)4/ Kutateladze5/ Chang-Snyder6/ Rohsenow-Griffith7/ Kutateladze-Zuber8/ Zuber-Tribus (2)9/ Monstinski

Tendencias

Se llevó a cabo un análisis de tendencias de las -- curvas obtenidas tanto experimentalmente como teóricamente. El estudio abarca una comparación entre los coeficientes de correlación de cada una de ellas, y asimismo de las pendientes de cada una de ellas.

TABLA VI

AUTOR	r	m
Corrida Experimental	0.9973	1.56
Zuber-Tribus (SI)	0.9884	4.12
Zuber-Tribus (1)	0.9887	1.72
Kutateladze	0.9887	2.16
Chang-Snyder	0.9889	2.00
Rohsenow-Griffith	0.9938	4.32
Kutateladze-Zuber	0.9887	5.76
Zuber-Tribus (2)	0.9888	2.40
Monstinski	0.9858	7.76

Como se puede apreciar en la Tabla [VI] todas las -- curvas obtenidas a partir de las correlaciones teóricas siguen una misma tendencia, en cuanto a que todas ellas son una recta, asimismo la curva obtenida experimental--

mente se ajusta a las anteriores.

Por lo que se refiere a las pendientes se observa - que las ecuaciones correspondientes a:

- Zuber-Tribus (1)
- Kutateladze
- Chang-Snyder y
- Zuber-Tribus (2)

son las que más se ajustan a los datos experimentales -- obtenidos, mientras que los resultados obtenidos en las correlaciones de:

- Zuber-Tribus (SI)
- Rohsenow-Griffith
- Kutateladze-Zuber y
- Monstinsky

se disparan de los obtenidos experimentalmente.

Por lo anterior analizado se concluye que los resultados obtenidos experimentalmente y las correlaciones -- teóricas presentadas en la literatura presentan tenden--cias similares, mientras que las correlaciones de: Zuber

Tribus (1), Zuber-Tribus (2), Kutateladze y Chang-Snyder son las que más se ajustan para este experimento, asimismo se comprueba que la capacidad del equipo para detectar la influencia de la presión en el flujo de calor máximo es óptima.

3.5

EXPERIMENTO N° 4"DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL DENTRO DEL SISTEMA (CILINDRO EBULLICION-CONDENSACION)"

3.5.1 OBJETIVO: Determinar el coeficiente de transferencia de calor total dentro del sistema (cilindro de ebullición-condensación).

3.5.2 ACTIVIDADES:

- Ajustar el sistema a un determinado suministro eléctrico deseado.
- Mantener el caudal de agua a un valor bajo - - - (5 g/s).
- Dejar que se estabilice el sistema.
- Tomar las siguientes lecturas:
 - \dot{m}_w : g/s Caudal de agua de refrigeración
 - t_s : °C Temperatura de entrada del agua
 - t_i : °C Temperatura de salida del agua
 - T_s : °C Temperatura de saturación del R-11

V : Volt Voltaje

I : Amp Amperaje

- Incrementar el suministro de agua paulatinamente dejando estabilizar el sistema y tomando las lecturas correspondientes.

CORRIDA 1

TABLA I

DESCRIPCION	DATO	1	2	3	4	5
Caudal de Agua	g/s	5.04	6.31	7.57	8.83	12.61
Temperatura de entrada del agua	°C	19.9	19.8	19.8	19.6	19.5
Temperatura de salida del agua	°C	22.5	22.0	21.5	21.0	20.5
Temperatura de saturación del refrigerante	°C	24.4	24.3	23.9	23.2	23.1
Voltaje	Volt	66	66	66	66	66
Corriente	Amp	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

CORRIDA 2

TABLA II

DESCRIPCION	DATO	1	2	3	4	5
Caudal de Agua	g/s	5.04	6.31	7.57	8.83	12.61
Temperatura de entrada del agua	°C	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8
Temperatura de salida del agua	°C	25.5	25.0	24.0	23.5	22.0
Temperatura de saturación del R-11	°C	27.8	27.2	26.7	26.1	25.0
Voltaje	Volt	102	102	102	102	102
Corriente	Amp	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

CORRIDA 3

TABLA III

DESCRIPCION	DATO	1	2	3	4	5
Caudal de Agua	g/s	5.04	6.31	7.57	8.83	12.61
Temperatura de entrada del agua	°C	19.9	19.9	19.9	19.8	19.8
Temperatura de salida del agua	°C	30.2	29.0	27.0	26.1	24.1
Temperatura de Saturación del R-11	°C	34.4	32.8	31.1	30.0	28.3
Voltaje	Volt	137	137	137	137	137
Corriente	Amp	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

3.5.3 CALCULOS:

CORRIDA 1

DATO 1

$$\dot{Q}_w = 5.04 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{Seg}} \times 4,180 \frac{\text{W}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times (22.5^\circ\text{C} - 19.9^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q}_w = 54.77 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_w = 66 \text{ V} \times 1.0 \text{ A}$$

$$\dot{Q}_w = 66 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_w = 66 \text{ W} - 54.77 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_w = 11.23 \text{ W}$$

$$T_{NL} = \frac{(t_s - t_i) - (t_s - t_o)}{\ln \frac{(t_s - t_i)}{(t_s - t_o)}} \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_{NL} = \frac{(24.4 - 19.9) - (24.4 - 22.5)}{\ln \frac{(24.4 - 19.9)}{(24.4 - 22.5)}} \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_{NL} = 2.02 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$U = \frac{54.77 \text{ W}}{0.032 \text{ m}^2 \times 3.02 \text{ } ^\circ\text{K}}$$

$$U = 567.64 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}}$$

CORRIDA 1

DATO 2

$$\dot{Q}_w = 5.31 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4,180 \frac{\text{W}}{\text{kg}^\circ\text{K}} (22.0^\circ\text{C} - 19.8^\circ\text{K})$$

$$\dot{Q}_w = 58.03 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = 66 \text{ V} \times 1 \text{ A}$$

$$\dot{Q} = 66 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = 66 \text{ W} - 58.03 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = 7.97 \text{ W}$$

$$\text{TML} = \frac{(24.3-19.8) - (24.3-22.0)}{\text{ln} \frac{(24.3-19.8)}{(24.3-22.0)}} \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$\text{TML} = 2.28 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$U = \frac{58.03 \text{ W}}{0.032 \text{ m}^2 \cdot 3.28^\circ\text{K}}$$

$$U = 553.24 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Y así sucesivamente para cada dato de cada corrida.

TABLA DE RESULTADOS

TABLA IV

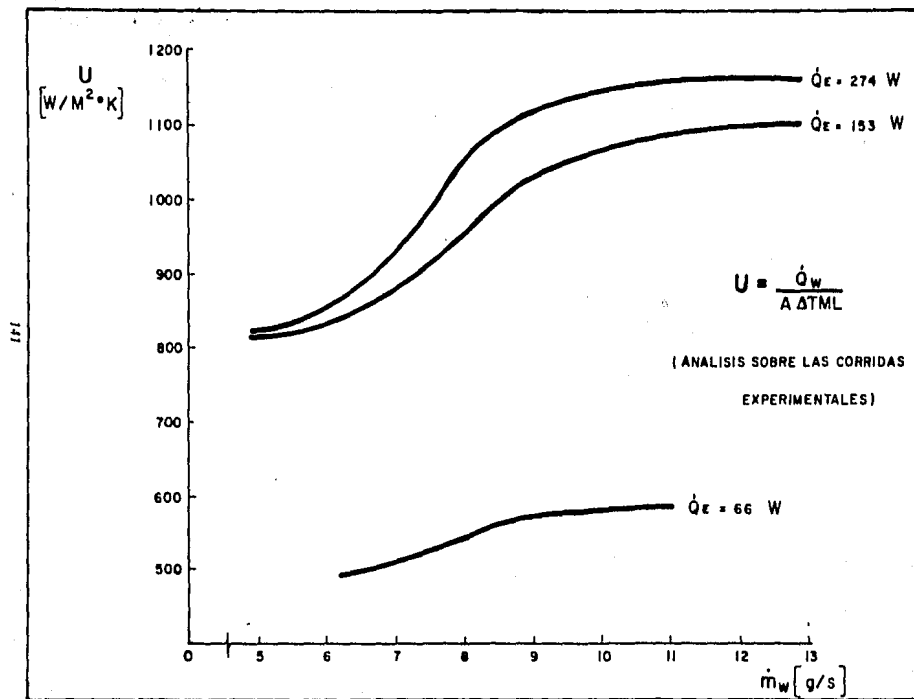
CORRIDA	DATO	\dot{Q}_U (w)	\dot{Q}_L (w)	ΔQ (w)	U_{TOR} (W/M ² °K)
1	1	54.77	66.00	11.23	567.64
	2	58.03	66.00	7.97	553.21
	3	53.79	66.00	12.21	529.54
	4	51.67	66.00	14.33	568.03
	5	52.71	66.00	13.29	536.03
2	1	117.98	153.00	35.02	812.37
	2	134.52	153.00	18.48	988.61
	3	129.73	153.00	23.27	913.35
	4	136.56	153.00	16.44	1,020.82
	5	115.96	153.00	37.04	906.03
3	1	216.99	274.00	57.01	615.74
	2	240.02	274.00	33.98	1,007.41
	3	224.66	274.00	49.34	993.70
	4	232.53	274.00	41.47	1,108.91
	5	226.65	274.00	47.35	1,161.23

\dot{Q}_U : Tasa de transferencia de calor en el serpentín de refrigeración

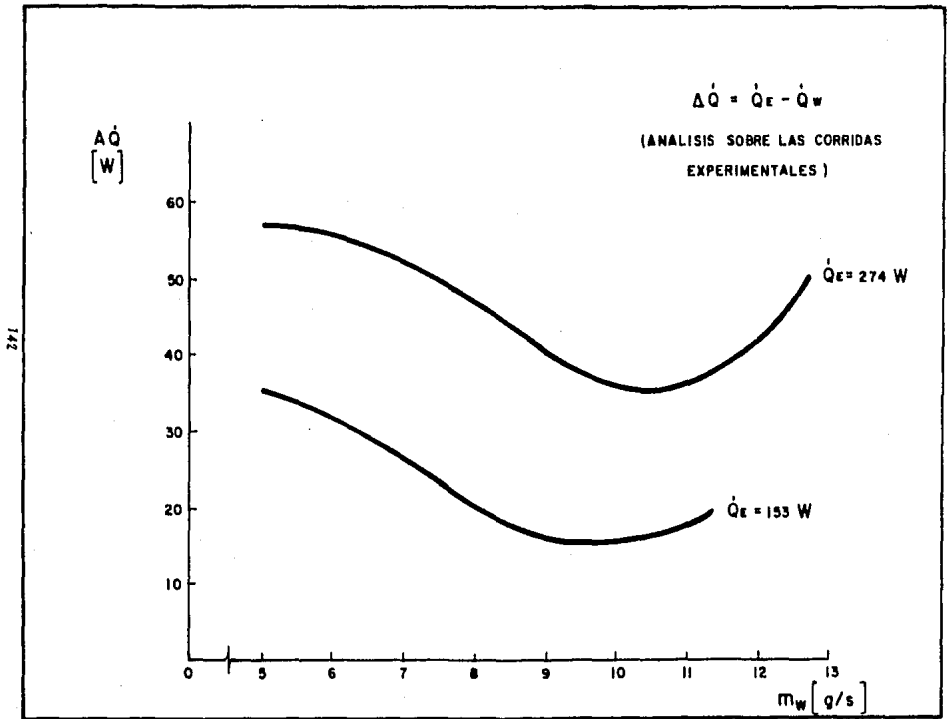
\dot{Q}_L : Tasa de transferencia del calefactor

\dot{Q} : Transferencia de calor al entrono circulante

U : Coeficiente de transferencia de calor total



GRAFICA I



GRAFICA II

3.5.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Podemos observar que a medida que el suministro eléctrico es mayor, el coeficiente de transferencia también es mayor. Esto es debido a que al suministrar mayor energía al sistema, en éste ocurre una mayor transferencia de calor, y por lo tanto para mantener el sistema en equilibrio en el condensador, se debe quitar más calor.

Analizando (las curvas de la gráfica I de $\dot{m}_w \# U_{TOT}$) -- denotamos que a medida que el caudal de agua aumenta, el coeficiente comienza a aumentar hasta llegar a un valor máximo reflejado en la asíntota de la curva correspondiente.

Lo anterior se debe a que mientras que el caudal de agua es bajo, mayor energía calorífica se transfiere con los alrededores (como se muestra en la gráfica II), y a medida que éste aumenta, el sistema tiene mayor capacidad de transferir calor entre el vapor que se condensa y el agua condensante y por consecuencia se transfiere menos calor con los alrededores. Al llegar al punto en que la curva (en la gráfica I) se asíntotiza, quiere decir que el sistema de refrigeración ha llegado a su máxima capacidad de transferir calor a través del serpentín, entonces, el calor que se transfiere con los alrededores comienza nuevamente a crecer (como se muestra en la gráfica II).

Realizando un análisis profundo del comportamiento del sistema podemos encontrar un punto óptimo en el que el coeficiente de transferencia de calor total (dentro del sistema) sea el mayor posible y el calor que se transfiere con los alrededores sea, por consecuencia, el menor posible.

Este punto se puede determinar gráficamente.

Ejemplo:

Para el caso $\dot{Q}_E = 274 \text{ W}$; primeramente analizamos la curva $\Delta\dot{Q} \text{ vs } \dot{m}_w$ y localizamos el punto en el cual el valor de $\Delta\dot{Q}$ es el mínimo y observamos el valor de \dot{m}_w (para este caso -- $\dot{m}_w = 10.5 \text{ g/s}$ aprox.). Con este valor nos vamos a la curva $U_t \text{ vs } \dot{m}_w$ y localizamos el valor correspondiente para U_{TOTAL} (en este caso $U_{TOTAL} = 1,150$ aprox.). Por lo tanto el punto es $\dot{m}_w = 10.5 \text{ g/s}$.

4. DISEÑO DE PRACTICAS

4.1 PRACTICA N° 1

PRACTICA 1"DEMOSTRACION VISUAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE EBULLICION"

OBJETIVOS: Familiarizar al alumno con el manejo del equipo.
Visualizar los diferentes tipos de ebullición.

INTRODUCCION:

Fase: Una fase es una región uniforme en un sistema, esto significa composición química y propiedades químicas -- uniformes. Por lo tanto un sistema que contiene líquido y vapor tiene dos regiones de uniformidad.

Cambio de Fase: Un fluido puede existir como gas, vapor, - líquido o sólido. El cambio de líquido a vapor es conocido como proceso de vaporización y el cambio de vapor a líquido es conocido como proceso de condensación. La cantidad de calor involucrada en la condensación o vaporización de un kilogramo de fluido es idéntica para -- fluidos puros a una presión dada. El cambio de líquido a vapor o de vapor a líquido ocurre sólo a una temperatura, que es la temperatura de saturación o de equilibrio.

Vaporización y Ebullición: La vaporización es el cambio de fase de líquido a vapor que ocurre en la interfase líquido-vapor situada en la superficie del líquido. El calor necesario para llevar a cabo este fenómeno se transfiere por líquido sobrecalentado que fluye de la superficie calefactora a la interfase líquido-vapor. El calor se transfiere en el líquido por convección.

Se conoce como ebullición al cambio de fase de líquido a vapor, pero que a diferencia de la vaporización, este cambio ocurre sobre la superficie del calefactor formando con esto burbujas de vapor que ascienden a la superficie del líquido.

MECANISMOS DE CAMBIO DE FASE LIQUIDO-VAPOR

El cambio de fase de líquido a vapor se lleva a cabo por tres diferentes mecanismos, los cuales son:

- Vaporización Convectiva,
- Ebullición Nucleada y
- Ebullición Pelicular

La vaporización convectiva (FIG. 1) se caracteriza porque el calor es transferido por líquido sobrecalentado hasta la superficie en donde se encuentra la interfase líquido-vapor, en la cual se lleva a cabo el cambio de fase, ésta se presenta cuando la diferencia de temperatura entre la superficie calefactora y la temperatura de saturación del líquido es relativamente pequeña. La transferencia de calor se lleva a cabo entre partes relativamente calientes y frías del líquido por medio de mezclas, esto es, el líquido que se encuentra en el fondo del recipiente se calienta y se vuelve menos denso que antes, debido a su expansión térmica, el líquido adyacente al fondo también es menos denso que la porción superior fría y por lo tanto asciende. La transferencia de calor del líquido caliente del fondo del recipiente al resto, se hace por convección natural o libre, o si se produce cualquier agitación, el proceso se lleva a cabo por convección forzada. Al incrementar la diferencia de temperatura aparece la ebullición nucleada.

En la ebullición nucleada (FIG. 2) el cambio de fase crea una multitud de burbujas que ascienden rápidamente hasta la superficie del líquido creando con esto una fuerte turbulencia dentro del fluido logrando una mejor transferencia de calor entre la superficie calefactora y el líquido. Con-

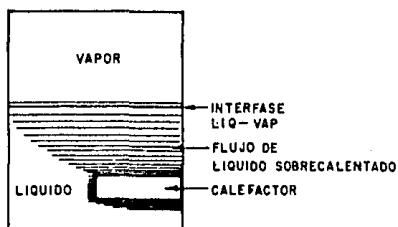


FIG. 1

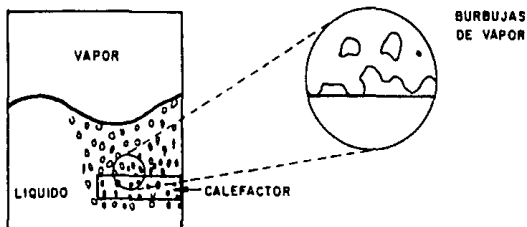


FIG. 2

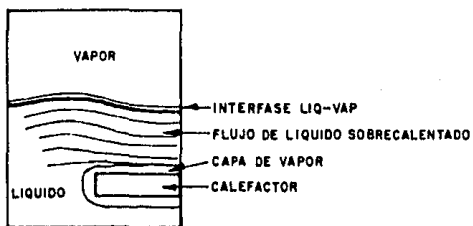


FIG. 3

forme la temperatura de la superficie va aumentando, las burujas se forman en más y más sitios hasta que forman una película de vapor que envuelve al mango calefactor. Esta película aleja al líquido del alcance de la superficie y el calor suministrado para evaporar al líquido tiene que pasar a través de la película de vapor, y como sabemos, el vapor es relativamente un buen aislante del calor. El mecanismo es ahora ebullición pelicular (FIG. 3). En la ebullición pelicular el cambio de fase se lleva a cabo en la interfase líquido-vapor.

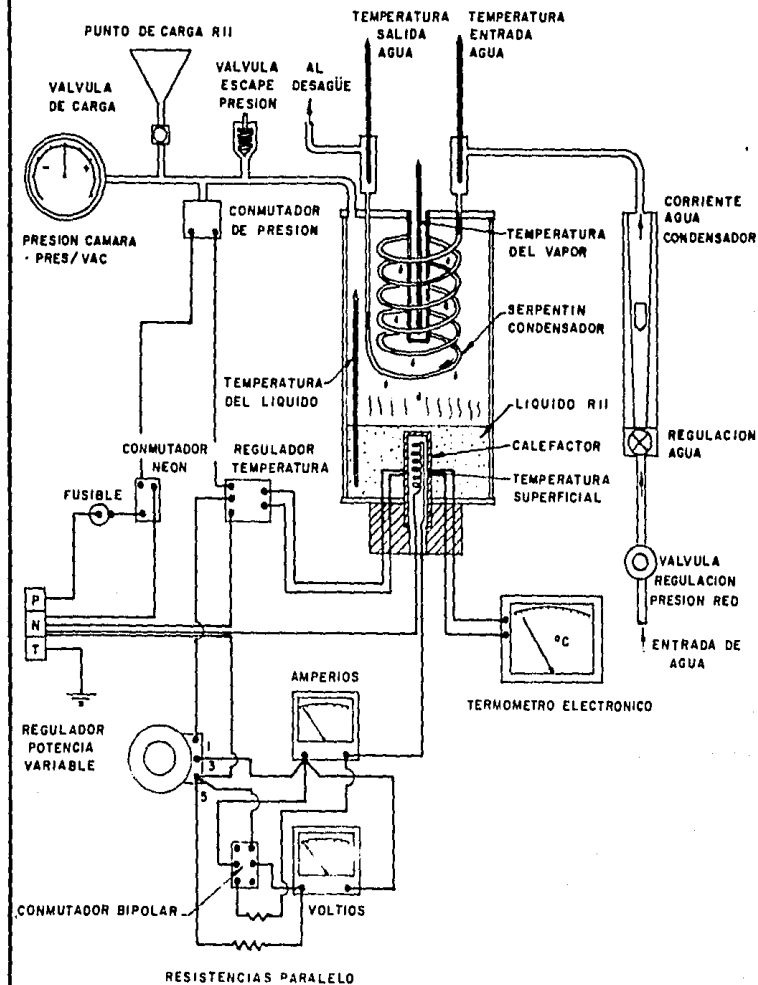
DESCRIPCION DEL EQUIPO

Unidad de Transferencia de calor por ebullición H652/5 (FIG. 4)

La unidad está constituida alrededor de un cilindro de cristal resistente que contiene vapor y líquido saturados -- (Se suministra R11 como estándar, pero pueden emplearse -- otros fluidos con propiedades adecuadas y compatibles con -- los materiales de construcción).

Un manguito de cobre que contiene un elemento de alta densidad de vatios va insertado en el extremo inferior del --

FIG. 4 DIAGRAMA ESQUEMATICO



cilindro, transmitiéndose calor desde éste al líquido. La corriente del calentador se suministra desde un transformador infinitamente variable. Un serpentín enfriado por agua en la parte superior del cilindro condensa al vapor producido y lo devuelve al líquido en ebullición. La temperatura y presión del proceso de ebullición se regulan por la temperatura y caudal del agua de refrigeración del condensador.

Un termopar en la pared del calentador y un termómetro en el líquido permiten observar continuamente la diferencia de temperatura metal-líquido. Se ha introducido equipo de protección para evitar que se produzcan temperaturas superficiales peligrosamente altas cuando la entrada de calor crítico es alcanzada, pudiéndose llevar la ebullición desde la forma nucleada hasta la pelicular rápidamente y a voluntad.

SEGURIDAD

Los siguientes dispositivos de seguridad se hallan incorporados como estándar:

- a) Un conjunto de cilindro de cristal y tapa terminal ha sido probado hidráulicamente a 2 MPa del manómetro sin fallo alguno.

- b) Conmutador de luz de aviso de neón.
- c) Fusible de seguridad montado en el panel de 10 Amp.
- d) Conmutador de corte de presión, ajustado para interrumpir el circuito calentador cuando la presión de vapor - excede la indicación del manómetro 90 kPa (90 KN/m²).
- e) Válvula de alivio de presión mecánica ajustada para descargar cuando la presión del vapor excede 100 kPa - - (100 KN/m²).
- f) Corte de alta temperatura ajustado para interrumpir la fuente de alimentación del calentador cuando la temperatura del metal excede 225°C.
- g) Pantalla de plástico claro, para proteger el cilindro - de cristal contra golpes accidentales.

TECNICA DE OPERACION

Antes de comenzar verificar que:

- a) El suministro de agua de refrigeración esté conectado y listo para su uso.
- b) La presión y la temperatura del R11 están de acuerdo -- con las condiciones de saturación. Si no es así, es --

probable que exista aire dentro del cilindro y deberá llevarse a cabo una operación de purga.

- c) El suministro eléctrico está debidamente conectado y la unidad está propiamente fija a la superficie.

Después del uso siempre:

- a) Apagar la fuente de suministro eléctrico y desconectarlo de la red.
- b) Hacer circular agua de refrigeración hasta que la presión dentro del cilindro sea la más cercana a la presión atmosférica.

ACTIVIDADES:

- Tiempo de realización: 140 minutos aprox.
- Ajustar los suministros de agua y energía a valores bajos ($m_w = 40 \text{ lb/Hr}$; $A = 0.25 \text{ Amp}$).
- Esperar a que se estabilice el sistema (aprox. - 10 min.) y tomar la lectura del manómetro ----- (KN/m^2).

- Incrementar el suministro de energía eléctrica (hasta 0.30 Amp), regulando el caudal de agua para mantener la presión constante.
- Observar cuidadosamente al líquido que rodea al calefactor.
- Incrementar en intervalos de 0.2 Amp el suministro de energía eléctrica, regulando el caudal de agua de refrigeración para mantener la presión constante. Dejar estabilizar el sistema (aprox. 10 min.) en cada intervalo.

NOTA: Cuando se alcanza el régimen de ebullición pelicular, la presión del sistema se abate por lo tanto se debe tener cuidado de mantenerla constante cerrando el suministro de agua de refrigeración.

BIBLIOGRAFIA

- Greenhorn, R.A. Transfer Operations
Ed. McGraw Hill Kogakusha;
Japan, 1972

- Holman, J.P. Heat Transfer
New York: McGraw Hill; 1981
- Kern, D.Q. Proceso de Transferencia de Calor
Compañía Editorial Continental, S.A.;
México, 1980
- Perry, R.H. Chemical Engineers Handbook
Mc Graw Hill Book Co.;
New York; 1973

CUESTIONARIOVISUALIZACION DE LOS DIFERENTES TIPOS DE EBULLICION

Nombre del Alumno: _____

Grupo: _____

- 1) ¿Qué se entiende por Fase y Cambio de Fase?
 - 2) ¿Qué diferencias existen entre la Vaporización y la Ebullición?
 - 3) ¿A qué se le llama Temperatura Crítica?
 - 4) Definir los diferentes tipos de Transferencia de Calor
 - 5) ¿Qué diferencia existe entre la Ebullición Nucleada y la Pelicular?
 - 6) ¿En cuál de los anteriores tipos de ebullición cree usted que exista un coeficiente de transferencia de calor mayor entre la superficie calefactora y el líquido?. Explí que su respuesta.
-

Nombre del Alumno: _____ Grupo: _____

Profesor: _____ Firma: _____

4.2 PRACTICA N° 2

P R A C T I C A 2"DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR SOBRE LA SUPERFICIE CALEFACTORA"

OBJETIVOS: Determinar el coeficiente de calor superficial en cada tipo de ebullición.
Determinar el efecto de la presión sobre el coeficiente de transferencia de calor superficial.

INTRODUCCION:TRANSFERENCIA DE CALOR

La ciencia de la Termodinámica trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia. 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 respectivamente. Cuando se vaporiza un kilogramo de un líquido puro o se condensa a un kilogramo del mismo, el cambio de energía en los dos procesos es idéntico.

TEORIAS DEL CALOR

El estudio de la transferencia de calor se facilita mediante la comprensión de la naturaleza del calor. Sin embargo, se han descubierto muchas manifestaciones de calor, lo que ha impedido que una teoría simple cubra a todas ellas. Las leyes que pueden aplicarse a transiciones de masa pueden ser inaplicables a transiciones moleculares o atómicas, y -- aquellas que son aplicables a bajas temperaturas pueden no serlo a altas temperaturas.

Las fases de una sustancia simple, sólida, líquida o gaseosa, están asociados con su contenido de energía. En la fase sólida, las moléculas o átomos están muy cercanos, dando con esto rigidez. En la fase líquida existe suficiente energía térmica para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierde rigidez. En la fase gaseosa, la presencia de energía térmica adicional resulta en una separación relativamente completa de los átomos o moléculas, de manera que pueden permanecer en cualquier lugar de un espacio cerrado.

También se ha establecido que dondequiera que ocurra un cambio de fase fuera de la región crítica, se involucra una gran cantidad de energía en transición.

Para una sustancia en sus diferentes fases, sus propiedades térmicas difieren en orden de magnitud. Por ejemplo, el calor específico por unidad de masa es muy bajo para los sólidos, alto para los líquidos y generalmente de valores -- intermedios para los gases. Asimismo, en cualquier cuerpo -- que absorba o pierda calor, deben guardarse especiales consideraciones respecto a si el cambio es de calor latente, ó sensible, ó de ambos.

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Existen tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aún cuando muchas de las aplicaciones en Ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son: conducción, convección y radiación.

CONDUCCIÓN. La Conducción es la transferencia de calor a -- través de un material fijo tal como una pared. La dirección del flujo de calor será en ángulos rectos a la

pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. Es conocido que el flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y al área (A) de la misma. Si 't' es la temperatura en cualquier punto de la pared y 'x' es el espesor de la misma en dirección al flujo de calor, la cantidad de flujo de calor (dQ) está dada por:

$$dQ = kA \left(-\frac{dt}{dx} \right)$$

El término $(-dt/dx)$ se llama gradiente de temperatura. En otras palabras, la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura que impulsa al calor a través del espesor de la pared.

La constante de proporcionalidad (k) es peculiar a la conducción de calor por conductividad y se le conoce -- por Conductividad Térmica. Esta Conductividad se evalúa experimentalmente.

Aún cuando la Conducción de calor se asocia generalmente con la transferencia de calor a través de los sólidos, también es aplicable a gases y líquidos, con sus limitaciones.

CONVECCION. La Convección es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de mezcla. Este tipo de transferencia de calor puede ser descrito en una ecuación que imita la forma de la ecuación de conducción y está dada por:

$$dQ = h A dt$$

La constante de proporcionalidad h es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación, y debe ser evaluado experimentalmente; se llama coeficiente de transferencia de calor. Cuando se integra esta ecuación toma la siguiente forma:

$$Q = h A \Delta t$$

y se le conoce como: Ley del Enfriamiento de Newton.

RADIACION. La Radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor. Cuando la radiación se emite desde una fuente hacia un receptor, parte de la energía se absorbe por éste y parte es re-

flejada. Basándose en la segunda Ley de la Termodinámica, Boltzmann estableció que la velocidad a la cual una fuente emite calor es:

$$dQ = \epsilon \sigma dAT^4$$

Esta ecuación se conoce como: Ley de la cuarta potencia. $\{T\}$ es la temperatura absoluta, $\{\sigma\}$ es una constante adimensional, $\{\epsilon\}$ es un factor peculiar a la radiación y se llama emisividad. La emisividad, al igual que la conductividad térmica $\{k\}$, ó el coeficiente de transferencia de calor $\{h\}$, debe determinarse experimentalmente.

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, tratados generalmente de manera independiente. Los procesos de transferencia de calor se relacionan con las razones de intercambio térmico, tales como los que ocurren en un 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, el potencial por el cual la transferencia de calor se lle va a cabo. Un problema típico de procesos de transferencia de calor involucra las cantidades de calor que deben transfe rirse, 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 a la fuente del receptor, y la cantidad de energía mecánica que - debe disiparse para facilitar la transferencia de calor.

Puesto que la transferencia de calor se considera un in tercambio en un sistema, la pérdida de calor por un cuerpo - debe ser igual al calor absorbido por otro dentro de los con fines del mismo sistema.

MECANISMOS DE CAMBIO DE FASE LIQUIDO-VAPOR

El cambio de fase de líquido a vapor se lleva a cabo por tres diferentes mecanismos, los cuales son:

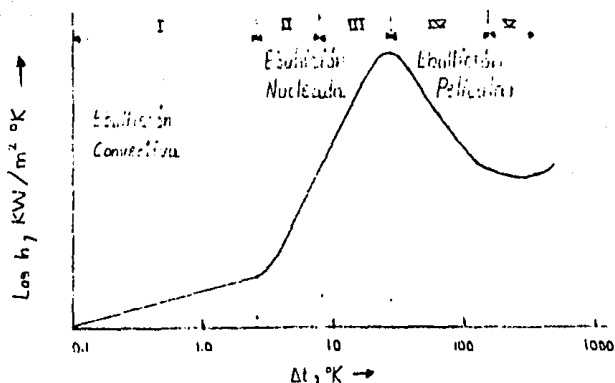
- Vaporización Convectiva,
- Ebullición Nucleada y
- Ebullición Pelicular

La vaporización convectiva se caracteriza porque el calor es transferido por el líquido sobrecalentado hasta la superficie en donde se encuentra la interfase líquido-vapor, en la cual se lleva a cabo el cambio de fase; ésta se presenta cuando la diferencia de temperatura entre la superficie calefactora y la temperatura de saturación del líquido es relativamente pequeña.

En la ebullición nucleada el cambio de fase crea una multitud de burbujas que ascienden rápidamente hasta la superficie del líquido, creando con esto una fuerte turbulencia dentro del fluido, logrando una mejor transferencia de calor entre la superficie calefactora y el líquido. Conforme la temperatura de la superficie va aumentando, las burbujas se forman en más y más sitios hasta que forman una película de vapor alrededor del mango calefactor. El mecanismo es ahora ebullición pelicular. En este mecanismo el cambio de fase se lleva a cabo en la interfase líquido-vapor.

Podemos ilustrar los mecanismos comunes de Ebullición considerando el caso de un alambre de platino sumergido en agua, a través del cual pasa una corriente eléctrica. En este caso se obtendrían resultados tales como los mostrados en la FIG. 1 en la que se gráfica el coeficiente de transferencia de calor contra la diferencia de temperatura del alambre y el fluido.

FIGURA 1



Se puede obtener el flujo de calor como función de la temperatura del alambre porque (1) conocemos el área superficial del alambre, (2) podemos medir el poder eléctrico de entrada y (3) conocemos la temperatura del alambre porque sabemos sus características de resistencia como una función de la temperatura.

DISEÑO DE ECUACIONES

Para simplificar la teoría, sólo se mostrarán algunos -

de los diseños más comunes de ecuaciones en su forma general.

EBULLICIÓN PELICULAR. Para la Ebullición Pelicular en tubos horizontales, se puede predecir el coeficiente de transferencia de calor utilizando las siguientes ecuaciones:

Bromley propuso

$$h = h_c + h_r \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{h_r}{h_c} \cdot \frac{1}{(2.62 + h_r/h_c)} \right)^{1/4}$$

donde el coeficiente convectivo pelicular (h_c) está dado por:

$$h_c = 0.62 \left(\frac{g \rho_v (\rho_v - \rho_l) \lambda k_v^2}{D \mu_v (T_s - T_c)} \right)^{1/4}$$

y el coeficiente radiante (h_r)

$$h_r = \frac{\epsilon \sigma (T_s^4 - T_c^4)}{(T_s - T_c)}$$

Para la Ebullición Pelicular alrededor de un tubo vertical el coeficiente de transferencia de calor está dado por la siguiente ecuación propuesta por Hsu:

$$h \left(\frac{\mu_v^2}{9\rho_v(\rho_s - \rho_v)k_v^3} \right)^{1/3} = 0.0020 NRe^{0.6}$$

$$NRe = \frac{4\omega}{\pi D \mu_v}$$

EBULLICION NUCLEADA. Para la Ebullición Nucleada generalmente se usa una ecuación no escrita explícitamente en términos de coeficiente de transferencia de calor, la cual es como se muestra:

$$\frac{C P_s (T_s - T_v)}{\lambda} = C \left[\frac{g}{\mu_v \lambda} \left(\frac{1.17 \times 10^8 \sigma}{9(\rho_s - \rho_v)} \right)^{1/2} \right]^{0.35} NPr_s^{0.7}$$

De donde

$$NPr_s = \frac{\mu_s C P_s}{k_s}$$

Para valores de C se encontró la siguiente tabla publicada por Rohsenow (W.M. Rohsenow, Trans. ASME, 74: - 969 (1952))

<u>COMBINACION</u>			<u>C</u>
n-pentano	-	romo	0.015
Agua	-	platino	0.013
Agua	-	cobre	0.013
CCl ₄	-	cobre	0.013
Benceno	-	romo	0.010
Butanol	-	cobre	0.00305
50% K ₂ CO ₃	-	cobre	0.00275
Etanol	-	cobre	0.0027
Isopropil	-	cobre	0.00225

Monstinski propuso:

$$h = 0.0065: P_c^{0.69} \left(\frac{q_c}{A} \right)^{0.7} \left[1.8 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0.17} + 4 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{4.2} + 10 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{10} \right]$$

Mc. Nelly propuso:

$$h = 0.225 \left(\frac{q_c}{A \lambda} \right) \left(\frac{144 P k_e}{\sigma} \right)^{0.31} \left(\frac{P}{P_c} - 1 \right)^{0.33}$$

Rohsenow propuso:

$$hD = C_r \left(\frac{DG}{\mu} \right)^{2/3} \left(\frac{C\mu}{k} \right)^{-0.7}$$

donde la constante C_r varía de 0.006 hasta 0.015 y depende de la naturaleza de la superficie.

Forster y Zuber propusieron:

$$Nu = 0.0015 \text{ } Nr_e^{0.62} \text{ } Nr_f^{1/3}$$

la cual toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{c_p \sqrt{\pi} \alpha}{k \rho_v} \frac{W (20)}{A (\Delta P)}^{1/2} \left(\frac{\rho_f}{\Delta \rho g} \right)^{1/4} \\ = 0.0015 \left[\frac{\rho_f}{\mu} \left(\frac{c_p \Delta T \sqrt{\pi} \alpha}{\lambda \rho_v} \right)^2 \right]^{0.62} \left(\frac{C\mu}{k} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

donde α del líquido

$\Delta P =$ Presión de vapor - Presión de saturación

CORRELACIONES DE AUTORES SOVIETICOS

Estos autores propusieron la siguiente correlación:

$$N_{v*} : A P_r^{n_1} \cdot P_i^{n_2} \cdot K_p^{n_3} \cdot K_i^{n_4} \cdot A_r^{n_5}$$

para la cual cada uno propuso los siguientes valores:

AUTOR	A	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
Kichigan-Tobilevich	1.04×10^{-4}	0	0.7	0.7	0	0.125
Kutateladze	7×10^{-4}	-0.35	0.7	0.7	0	0
Borishanskiy-Minchenko	8.7×10^{-4}	0	0.7	0.7	0	0
Kruzhilin-Averin	0.082	-0.5	0.7	0	0.377	0
Labuntzov	0.125	-0.32	0.65	0	0.35	0

En donde:

$$Nu_s = \frac{h}{k_i} \left(\frac{q_s \sigma}{g (\rho_l - \rho_v)} \right)^{1/4}$$

$$R_s = \frac{(q/A)}{\alpha_e \rho_v h_{fg}}$$

$$K_e = \frac{(\rho_v h_{fg})}{J C_p T_s \rho_l (g \sigma (\rho_l - \rho_v) / g_o)^{1/2}}$$

$$K_p = \frac{P}{(g \sigma (\rho_l - \rho_v) / g_o)^{1/2}}$$

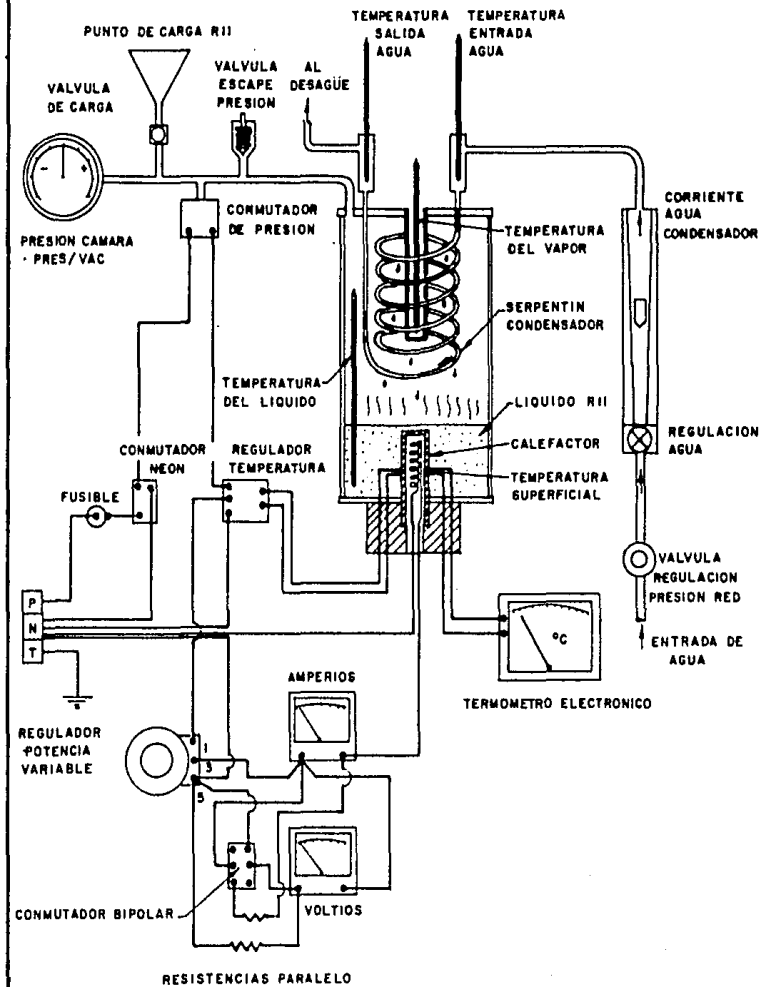
$$Ar = \frac{g}{J^2} \left(\frac{q_s \sigma}{g (\rho_l - \rho_v)} \right)^{3/2} \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)$$

DESCRIPCION DEL EQUIPO

Unidad de Transferencia de calor por ebullición H652/5 (FIG. 2)

La unidad está constituida alrededor de un cilindro de cristal resistente que contiene vapor y líquido saturados -- (Se suministra R1) como estándar, pero pueden emplearse otros

FIG. 1 DIAGRAMA ESQUEMATICO



fluidos con propiedades adecuadas y compatibles con los materiales de construcción).

Un manguito de cobre que contiene un elemento de alta densidad de vatios va insertado en el extremo inferior del cilindro, transmitiéndose calor desde éste al líquido. La corriente del calentador se suministra desde un transformador infinitamente variable. Un serpentín enfriado por agua en la parte superior del cilindro condensa al vapor producido y la devuelve al líquido en ebullición. La temperatura y presión del proceso de ebullición se regulan por la temperatura y caudal del agua de refrigeración del condensador.

Un termopar en la pared del calentador y un termómetro en el líquido permiten observar continuamente la diferencia de temperatura metal-líquido. Se ha introducido equipo de protección para evitar que se produzcan temperaturas superficiales peligrosamente altas cuando la entrada de calor crítico es alcanzada, pudiéndose llevar la ebullición desde la forma nucleada hasta la pelicular rápidamente y a voluntad.

SEGURIDAD

Los siguientes dispositivos de seguridad se hallan incorporados como estándar:

- a) Un conjunto de cilindro de cristal y tapa terminal ha sido probado hidráulicamente a 2 MPa del manómetro sin fallo alguno.
- b) Conmutador de luz de aviso de neón.
- c) Fusible de seguridad montado en el panel de 10 Amp.
- d) Conmutador de corte de presión, ajustado para interrumpir el circuito calentador cuando la presión de vapor excede la indicación del manómetro 90 kPa (90 KN/m²).
- e) Válvula de alivio de presión mecánica ajustada para descargar cuando la presión del vapor excede 100 kPa ---- (100 KN/m²).
- f) Corte de alta temperatura ajustado para interrumpir la fuente de alimentación del calentador cuando la temperatura del metal excede 225°C.

- g) Pantalla de plástico claro, para proteger el cilindro - de cristal contra golpes accidentales.

TECNICA DE OPERACION

Antes de comenzar verificar que:

- a) El suministro de agua de refrigeración esté conectado y listo para su uso.
- b) La presión y la temperatura del R 11 están de acuerdo - con las condiciones de saturación. Si no es así, es -- probable que exista aire dentro del cilindro y deberá - llevarse a cabo una operación de purga.
- c) El suministro eléctrico está debidamente conectado y la unidad está propiamente fija a la superficie.

Después del uso siempre:

- a) Apagar la fuente de suministro eléctrico y desconectar- lo de la red.

- b) Hacer circular agua de refrigeración hasta que la presión dentro del cilindro sea la más cercana a la presión atmosférica.

ACTIVIDADES:

- Tiempo de realización: 195 minutos aprox.
- Encender el suministro eléctrico a un valor bajo (aprox. $I = 0.25$ Amp), manteniendo cerrado el caudal de agua de refrigeración ($m_w = 0.00$ lb/Hr)
- Establecer una presión deseada.
- Variar el suministro de energía eléctrica en intervalos de 0.2 Amp y regular el caudal de agua de refrigeración para mantener constante la presión establecida. Dejar que se estabilice el sistema y tomar las siguientes lecturas:

E: Voltaje

I: Amperaje

t_e : Temperatura de saturación del líquido

t_m : Temperatura del calefactor

- Anotar las observaciones pertinentes a cada intervalo.
- Al llegar a las condiciones críticas (cuando el sistema es inestable y pasa de ebullición nucleada a pelicular) finalizar.
- Repetir la técnica anterior a diferentes presiones.

NOTA: Presiones recomendadas:

20, 30, 40, 50 y 60 KN/M²

CALCULOS:

Tasa de Transferencia de Calor \dot{Q}

$$\dot{Q} = E \times I \quad \text{WATT}$$

Flujo de Calor ϑ

$$\vartheta = \frac{\dot{Q}}{A} \quad \text{KW/M}^2$$

donde $A = 1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

Diferencia de Temperatura Δt

$$\Delta t = t_m - t_e \text{ } ^\circ\text{K}$$

Coefficiente de transferencia de calor superficial h

$$h = \frac{Q}{\Delta t} \text{ KW/M}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

TRABAJO POSTERIOR A LA REALIZACION DE LA PRACTICA

El alumno informará:

- a) Las curvas de $\log \Delta t \neq \log Q$ y $\log \Delta t \neq \log h$, obtenidos mediante la relación sugerida en la práctica -----
($h = Q/\Delta t$).
- b) Comentarios sobre el efecto de la presión sobre el coeficiente de transferencia de calor observado en el experimento.
- c) Las curvas de $\log \Delta t \neq \log h$, obtenidos mediante por lo menos cinco correlaciones teóricas, para una sola corrida.

[Sugerencias: Ec. de Monstinski, Ec. de Mc Nelly
Ec. de Bromley, Ec. de Kichigan Tobilevich
y Ec. de Borishanski-Minchenko]

- d) Comparar las curvas obtenidas teóricamente con la obtenida prácticamente y hacer el análisis correspondiente.

BIBLIOGRAFIA

- Berry, R.S. Physical Chemistry
New York: John Wiley & Sons. 1980
- Eilom, S. Industrial Engineering Tables
London: D. Van Nostrand Co. Ltd.
- Greenkorn, R.A. Transfer Operations
Tokio: Mc Graw Hill Kogakusha. 1972
- Holman, J.P. Heat Transfer
New York: Mc Graw Hill. 1981
- Perry, R.H. Chemical Engineers' Handbook
New York: Mc Graw Hill. 1973

Rohsenow, W.M. Handbook of Heat Transfer
New York: Mc Graw Hill. 1973

Woolrich, E.D. Handbook of Refrigeration Engineering
New York: The AVI Publishing Co. Inc.
1965

T A B L A I

DATOS OBTENIDOS EN: DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRAN-
FERENCIA DE CALOR SUPERFICIAL

CORRIDA	DATO		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pv = 1	E	Volt										
	I	Amp										
	te	°C										
Pv = 2	E	Volt										
	I	Amp										
	te	°C										
Pv = 3	E	Volt										
	I	Amp										
	te	°C										
Pv = 4	E	Volt										
	I	Amp										
	te	°C										

Grupo: _____
 Fecha: _____
 Profesor: _____

Observaciones: _____

CUESTIONARIO

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE
CALOR SUPERFICIAL

Nombre del Alumno: _____

Grupo: _____

- 1) ¿Qué es calor?
- 2) ¿Cuáles son las formas de transferencia de calor existentes?
- 3) Cite los mecanismos de cambio de fase líquido-vapor.
- 4) ¿Qué entiende por coeficiente de transferencia de calor?
- 5) ¿Qué es conductividad térmica y en qué difiere con el coeficiente de transferencia de calor?
- 6) Cite cinco correlaciones teóricas para la determinación del coeficiente de transferencia de calor superficial en la ebullición nucleada.
- 7) Dibuje el comportamiento de las curvas $\Delta t \neq h$, $\Delta t \neq \dot{Q}$ --
{h: coeficiente de transferencia de calor; \dot{Q} : flujo de calor} que presenta un fluido puro, señalando la zona correspondiente a cada tipo de mecanismo de cambio de fase líquido-vapor.
- 8) ¿Qué entiende por flujo máximo de calor y qué efecto tiene la presión sobre éste?

- 9) Mencionar las precauciones necesarias para el manejo del equipo.
- 10) ¿Cuál es la causa de arrastre de vapor en las calderas?
- 11) ¿Qué criterios deben considerarse en el diseño de equipo en cuanto a la elección de un coeficiente de transferencia de calor adecuado?
-

Nombre del Alumno: _____ Grupo: _____

Profesor: _____ Firma: _____

4.3

PRACTICA N° 3

P R A C T I C A 3

"EFECTO DE LA PRESIÓN EN EL FLUJO DE CALOR
CRÍTICO EN LA EBULLICIÓN"

OBJETIVO: Determinar el efecto de la presión sobre el flujo de calor crítico en la ebullición.

INTRODUCCION:

Un criterio útil sobre el comportamiento durante la vaporización es que el máximo flujo de calor se define como -- $(Q/A)_{max}$ ó $(U\Delta t)_{max}$.

Lo anterior representa el número de unidades de calor - por hora que se transfieren por unidad de superficie con el flujo máximo obtenible, el cual corresponde al flujo de calor a la diferencia de temperatura crítica. Una cantidad mayor que $(Q/A)_{max}$ no puede ser forzada a través de la superficie calefactora, debido a la formación de una película de gas sobre la superficie calefactora.

Cuando se emplea un (Δt) mayor que el crítico, se logran coeficientes de vaporización menores y el flujo de calor decrece similarmente.

Se puede deducir que las grandes diferencias de temperatura, favorables para la conducción y convección pueden ser en realidad un impedimento para la ebullición.

El flujo máximo de calor puede determinarse experimentalmente ó por las correlaciones teóricas propuesta por los siguientes autores:

Zuber-Tribus (SI)

$$Q_{max} = \frac{\pi h_{19} \rho_2}{24} \left(\frac{9\sigma(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_2^2} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \right)^{1.5}$$

Zuber-Tribus (1/)

$$Q_{max} = 0.13 \pi h_{19} \left(\frac{\sigma(\rho_1 - \rho_2) 3.3}{\rho_2^2} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \right)^{0.5}$$

Zuber-Tribus (1/)

$$q_{\text{max}} = 0.18 \rho_v h_{fg} \left(\frac{\sigma (P_e - P_s) g g_0}{\rho_v^2} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l}{\rho_l + \rho_v} \right)^{0.5}$$

Kutateladze

$$q_{\text{max}} = 0.16 \rho_v h_{fg} \left(\frac{\sigma (P_e - P_s) g g_0}{\rho_v^2} \right)^{0.25}$$

Chang-Snyder

$$q_{\text{max}} = 0.14 \rho_v h_{fg} \left(\frac{\sigma (P_e - P_s) g g_0}{\rho_v^2} \right)^{0.25} \left(\frac{k_s \rho_l}{\rho_v} \right)^{0.5}$$

Rohsenow-Griffith ✓

$$\phi_{max} = 143 \rho_v h_{fg} \left(\frac{g}{g_0} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v} \right)^{0.6}$$

Kutateladze-Zuber

$$\phi_{max} = 0.8 g_c^{0.25} \rho_v h_{fg} \left(\frac{\sigma(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right)^{0.25}$$

Monstinski

$$\phi_{max} = 303 P_c \left(\frac{P}{P_c} \right)^{0.35} \left(1 - \frac{P}{P_c} \right)^{0.9}$$

DESCRIPCION DEL EQUIPO

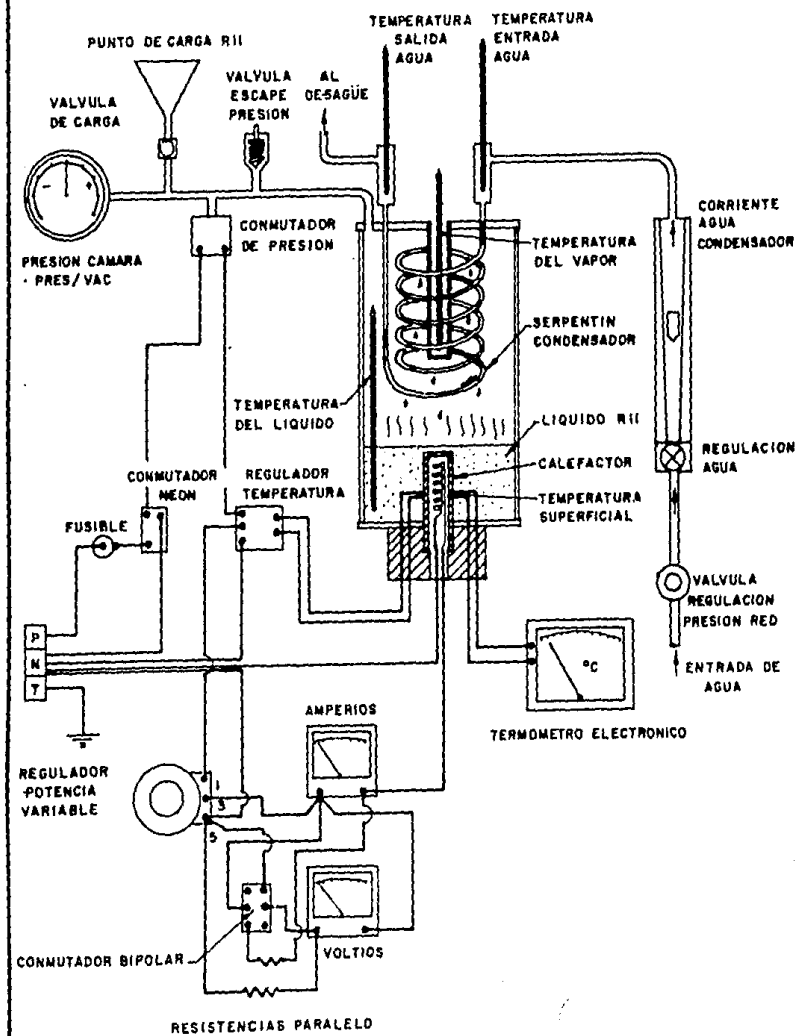
Unidad de Transferencia de Calor por Ebullición H652/5 (FIG. 1)

La unidad está constituida alrededor de un cilindro de cristal resistente que contiene vapor y líquido saturados -- (Se suministra R1) como estándar, pero pueden emplearse --- otros fluidos con propiedades adecuadas y compatibles con -- los materiales de construcción).

Un manguito de cobre que contiene un elemento de alta - densidad de vatios va insertado en el extremo inferior del - cilindro, transmitiéndose calor desde Este al líquido. La - corriente del calentador se suministra desde un transforma- - dor infinitamente variable. Un serpentín enfriado por agua en la parte superior del cilindro condensa al vapor produci- - do y la devuelve al líquido en ebullición. La temperatura - y presión del proceso de ebullición se regulan por la tempe- - ratura y caudal del agua de refrigeración del condensador.

Un termopar en la pared del calentador y un termómetro en el líquido permiten observar continuamente la diferencia de temperatura metal-líquido. Se ha introducido equipo de - protección para evitar que se produzcan temperaturas superfi

FIG. 1 DIAGRAMA ESQUEMATICO



ciales peligrosamente altas cuando la entrada de calor crítico es alcanzada, pudiéndose llevar la ebullición desde la forma nucleada hasta la pelicular rápidamente y a voluntad.

SEGURIDAD

Los siguientes dispositivos de seguridad se hallan incorporados como estándar:

- a) Un conjunto de cilindro de cristal y tapa terminal ha sido probado hidráulicamente a 2 MPa del manómetro sin fallo alguno.
- b) Conmutador de luz de aviso de neón.
- c) Fusible de seguridad montado en el panel de 10 Amp.
- d) Conmutador de corte de presión, ajustado para interrumpir el circuito calentador cuando la presión de vapor excede la indicación del manómetro 90 kPa (90 KN/m²).
- e) Válvula de alivio de presión mecánica ajustada para descargarse cuando la presión del vapor excede 100 kPa (100 KN/m²).

- f) Corte de alta temperatura ajustado para interrumpir la fuente de alimentación del calentador cuando la temperatura del metal excede 225°C
- g) Pantalla de plástico claro, para proteger el cilindro de cristal contra golpes accidentales.

TECNICA DE OPERACION

Antes de comenzar verificar que:

- a) El suministro de agua de refrigeración esté conectado y listo para su uso
- b) La presión y la temperatura del R11 están de acuerdo -- con las condiciones de saturación. Si no es así, es -- probable que exista aire dentro del cilindro y deberá -- llevarse a cabo una operación de purga.
- c) El suministro eléctrico está debidamente conectado y la unidad está propiamente fija a la superficie.

Después del uso siempre:

- a) Apagar la fuente de suministro eléctrico y desconectarlo de la red.
- b) Hacer circular agua de refrigeración hasta que la presión dentro del cilindro sea la más cercana a la presión atmosférica.

ACTIVIDADES:

- Tiempo de realización: 165 minutos aprox.
- Ajustar el suministro eléctrico a un valor aproximado de 0.5 Amp, manteniendo el caudal de agua de refrigeración cerrado.
- Esperar a que la presión sea aproximadamente de 40 KN/m^2 .
- Llevar al sistema a las condiciones críticas, - aumentando paulatinamente el suministro eléctrico, regulando el caudal de agua para mantener - la presión establecida.

- Tomar las siguientes lecturas:

Pv: Presión

E: Voltaje

I: Amperaje

- Ajustando el caudal de agua y el suministro -- eléctrico, establecer las condiciones críticas para diversas presiones.

- Reportar los valores obtenidos a diferentes pre siones.

NOTA: Presiones recomendadas: 15,
20, 25, 30, 35 y 40 KN/m²

CALCULOS:

Flujo de calor crítico: \dot{Q}_{max}

$$\dot{Q}_{max} = \frac{E \times I}{A}$$

donde $A = 1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

TRABAJO POSTERIOR A LA REALIZACION DE LA PRACTICA

El alumno informará:

- a) Las curvas de \dot{Q}_{max} vs P obtenidas para cada corrida.
- b) Las curvas de \dot{Q}_{max} vs P obtenidas a partir de por lo menos tres correlaciones técnicas.
- c) El análisis comparativo de las curvas obtenidas teóricamente y las obtenidas experimentalmente.
- d) Los comentarios de la influencia de la presión sobre el flujo de calor crítico observados en el experimento.

BIBLIOGRAFIA

- | | |
|-----------------|--|
| Eilon, S. | <u>Industrial Engineering Tables</u>
London: D. Von Nostrand Co. Ltd. |
| Greenkorn, R.A. | <u>Transfer Operations</u>
Tokio: Mc Graw Hill Kogakusha. 1972 |

- Holman, J.P. Heat Transfer
New York: Mc Graw Hill. 1981
- Kern, D.Q. Proceso de Transferencia de Calor
México: Cía. Editorial Continental,
S.A.. 1980
- Perry, R.H. Chemical Engineers' Handbook
New York: Mc Graw Hill. 1973
- Rohsenow, W.M. Handbook of Heat Transfer
New York: Mc Graw Hill. 1973

CUESTIONARIOEFFECTO DE LA PRESION EN EL FLUJO DE CALOR CRITICO

Nombre del Alumno: _____

Grupo: _____

- 1) ¿Qué se entiende por Flujo de Calor Crítico, bajo qué condiciones se presenta y cómo se puede determinar experimentalmente?
- 2) ¿Qué efecto tiene sobre el sistema forzar cantidades mayores al Δt crítico, y explique el efecto que se presenta sobre el coeficiente de transferencia de calor y sobre el flujo de calor?
- 3) Cite cinco correlaciones teóricas para determinar el flujo de calor crítico.
- 4) Para propósito de diseño de equipo, ¿qué importancia tiene el conocer el efecto de la presión sobre el flujo de calor crítico?
- 5) Explique el efecto que ocasiona la presencia de un incondensable (Ej. aire) dentro del sistema sobre el coeficiente de transferencia de calor y el flujo de calor.

Nombre del Alumno: _____ Grupo: _____

Profesor: _____ Firma: _____

T A B L A I

DATOS OBTENIDOS EN: EFECTO DE LA PRESIÓN EN EL FLUJO DE CALOR CRÍTICO

CORRIDA	VARIABLE					
		D	A	T	D	
		1	2	3	4	5
1	Pv: KN/m ² I: Amp E: Volt					
2	Pv: KN/m ² I: Amp E: Volt					
3	Pv: KN/m ² I: Amp E: Volt					
4	Pv: KN/m ² I: Amp E: Volt					

Grupo: _____

Observaciones: _____

Fecha: _____

Profesor: _____

4.4 PRACTICA N° 4

P R A C T I C A 4

"DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFEREN--
CIA DE CALOR TOTAL DENTRO DEL SISTEMA (CILINDRO
DE EBULLICION-CONDENSACION)"

OBJETIVO: Determinar el coeficiente de transferencia de calor total dentro del sistema (cilindro de ebullición-condensación).

INTRODUCCION:

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Existen tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aún cuando muchas de las aplicaciones en ingeniería son combinaciones de dos a tres. Estas son: conducción, convección y radiación.

CONDUCCION: La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo tal como una pared. La dirección del flujo de calor será en ángulos rectos a la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. Es conocido que el flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y al área (A) -

de la misma. Si 't' es la temperatura en cualquier punto de la pared y 'x' es el espesor de la misma en dirección del flujo de calor, la cantidad de flujo de calor (dQ) está dada por:

$$dQ = kA \left(- \frac{dt}{dx} \right)$$

El término $(-dt/dx)$ se llama gradiente de temperatura. En otras palabras, la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura que impulsa el calor a través del espesor de la pared.

La constante de proporcionalidad (k) es peculiar a la conducción de calor por conductividad y se le conoce por conductividad térmica. Esta conductividad se evalúa experimentalmente.

Aún cuando la conducción de calor se asocia generalmente con la transferencia de calor a través de los sólidos, también es aplicable a gases y líquidos, con sus limitaciones.

CONVECCION: La convección es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido, por medio de mezcla. Este tipo de transferencia de ca-

lor puede ser descrito en una ecuación que imita la --
forma de la ecuación de conducción y está dada por:

$$dQ = h A dt$$

La constante de proporcionalidad 'h' es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación, y debe ser evaluado experimentalmente; se llama coeficiente de transferencia de calor. Cuando se integra esta ecuación toma la siguiente forma:

$$Q = h A \Delta t$$

y se le conoce como: Ley de Enfriamiento de Newton.

RADIACION: La radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor. Cuando la radiación se emite desde una fuente hacia un receptor, parte de la energía se absorbe por éste y parte es reflejada. Basándose en la segunda Ley de la Termodinámica, Boltzmann estableció que la velocidad a la cual una fuente emite calor es:

$$dQ = \epsilon \sigma d A T^4$$

Esta ecuación se conoce como: Ley de la Cuarta Potencia. (T) es la temperatura absoluta, (σ) es una constante adimensional, (ϵ) es un factor peculiar a la radiación y se llama emisividad. La emisividad, al igual que la conductividad térmica (k) , o el coeficiente de transferencia de calor (h) , debe determinarse experimentalmente.

PROCESOS 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, tratados generalmente de manera independiente. Los procesos de transferencia de calor se relacionan con las razones de intercambio térmico, tales como los que ocurren en un 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, el potencial por el cual la transferencia de calor se lleva a cabo. Un problema típico de procesos 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 a la fuente del receptor, y la cantidad de energía que debe disiparse para facilitar la transferencia de calor.

Puesto que la transferencia de calor se considera un intercambio en un sistema, la pérdida de calor por un cuerpo - debe ser igual al calor absorbido por otro dentro de los confines del mismo sistema.

FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR VAPORIZACION

Se ha encontrado que los cuatro siguientes factores --- afectan la velocidad de transferencia de calor por vaporización de los recipientes y han entorpecido, en gran parte, la posibilidad de obtener una o dos correlaciones simples aplicables a la mayoría de líquidos.

- Naturaleza de la superficie y distribución de las burbujas.
- Propiedades del líquido como:

- Tensión superficial
 - * Coeficiente expansión
 - Viscosidad
- Influencia de la diferencia de temperatura sobre la evolución y vigor de las burbujas.
- Presión

Puesto que la interferencia es causada por la acumulación de burbujas de vapor, la presión en el sistema es importante al definir el tamaño de las burbujas individuales.

La influencia de las viscosidades y tensiones superficiales de los líquidos en sus respectivos coeficientes atómicos como función de valores absolutos de las propiedades no han sido correlacionados.

DESCRIPCION DEL EQUIPO

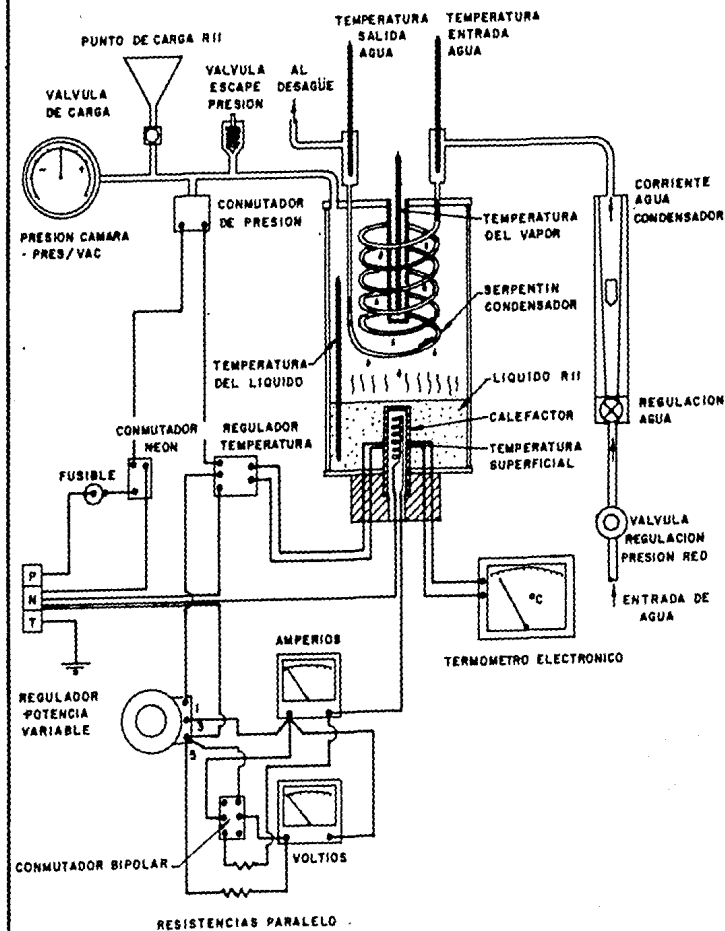
Unidad de Transferencia de Calor por Ebullición H652/5 (FIG. 1)

La Unidad está constituida alrededor de un cilindro de cristal resistente que contiene vapor y líquido saturados - (Se suministra R11 como estándar, pero pueden emplearse --- otros fluidos con propiedades adecuadas y compatibles con -- los materiales de construcción).

Un manguito de cobre que contiene un elemento de alta densidad de vatios va insertado en el extremo inferior del cilindro, transmitiéndose calor desde éste al líquido. La corriente del calentador se suministra desde un transformador infinitamente variable. Un serpentín enfriado por agua en la parte superior del cilindro condensa al vapor producido y la devuelve al líquido en ebullición. La temperatura y presión del proceso de ebullición se regulan por la temperatura y caudal del agua de refrigeración del condensador.

Un Termopar en la pared del calentador y un termómetro en el líquido permiten observar continuamente la diferencia de temperatura metal-líquido. Se ha introducido equipo de protección para evitar que se produzcan temperaturas superfi

FIG. 1 DIAGRAMA ESQUEMATICO



ciales peligrosamente altas cuando la entrada de calor crítico es alcanzada, pudiéndose llevar la ebullición desde la forma nucleada hasta la pelicular rápidamente y a voluntad.

SEGURIDAD

Los siguientes dispositivos de seguridad se hallan incorporados como estándar:

- a) Un conjunto de cilindro de cristal y tapa terminal ha sido probado hidráulicamente a 2 MPa del manómetro sin fallo alguno.
- b) Conmutador de luz de aviso de neón.
- c) Fusible de seguridad montado en el panel de 10 Amp.
- d) Conmutador de corte de presión, ajustado para interrumpir el circuito calentador cuando la presión de vapor excede la indicación del manómetro 90 kPa (90 KN/m²).
- e) Válvula de alivio de presión mecánica ajustada para descargar cuando la presión del vapor excede 100 kPa ---- (100 KN/m²).

- f) Corte de alta temperatura ajustado para interrumpir la fuente de alimentación del calentador cuando la temperatura del metal excede 225°C .
- g) Pantalla de plástico claro, para proteger el cilindro de cristal contra golpes accidentales.

TECNICA DE OPERACION

Antes de comenzar verificar que:

- a) El suministro de agua de refrigeración esté conectado y listo para su uso.
- b) La presión y la temperatura del R11 están de acuerdo -- con las condiciones de saturación. Si no es así, es probable que exista aire dentro del cilindro y deberá -- llevarse a cabo una operación de purga.
- c) El suministro eléctrico está debidamente conectado y la unidad está propiamente fija a la superficie.

Después del uso siempre:

- a) Apagar la fuente de suministro eléctrico y desconectarlo de la red.
- b) Hacer circular agua de refrigeración hasta que la presión dentro del cilindro sea la más cercana a la presión atmosférica.

ACTIVIDADES:

- Tiempo de realización: 140 minutos aprox.
- Ajustar el sistema a un determinado suministro eléctrico deseado.
- Mantener el caudal de agua a un valor bajo -----
(5 g/s).
- Dejar que se estabilice el sistema.
- Tomar las siguientes lecturas:

- \dot{m}_w : g/s Caudal de Agua de refrigeración
 t_o : °C Temperatura de entrada del agua
 t_i : °C Temperatura de salida del agua
 t_s : °C Temperatura de saturación del R11
 V : Volt Voltaje
 I : Amp Amperaje

- Incrementar el suministro de agua paulatinamente dejando estabilizar el sistema y tomando las lecturas correspondientes.

CALCULOS:

Coefficiente de Transferencia de Calor Total:

$$U = \frac{\dot{Q}_w}{A \cdot \Delta T_{LM}} = \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

en donde la tasa de transferencia de calor en el serpentín de refrigeración está dada por:

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w C_{pw} (t_i - t_o) = \text{watts}$$

$$TNL = \frac{(t_s - t_i) - (t_s - t_o)}{\ln \frac{(t_s - t_i)}{(t_s - t_o)}}$$

- \dot{m}_w = Caudal del agua de refrigeración = Kg/seg
 C_{pw} = Capacidad calorífica del agua = 4,180 W/Kg°K
 t_i = Temperatura de salida del agua = °K
 t_o = Temperatura de entrada del agua = °K
 t_s = Temperatura de saturación del refrigerante = °K
 A = Area efectiva del serpentín = 0.032 m²

La tasa de transferencia del calefactor está dada por:

$$\dot{Q}_E = \text{Volt} \cdot \text{Amp} = \text{Watts}$$

Y la tasa de calor al entorno circulante está dada por:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_E - \dot{Q}_w = \text{watts}$$

TRABAJO POSTERIOR A LA REALIZACION DE LA PRACTICA

El alumno informará:

- a) Las curvas de $U_t \neq m_w$ y $\dot{Q} \neq m_w$, obtenidas mediante las correlaciones sugeridas en la práctica.
- b) Los comentarios sobre el comportamiento de las curvas - arriba obtenidas.

BIBLIOGRAFIA

- | | |
|-----------------|---|
| Holman J. P. | <u>Heat Transfer</u>
New York: Mc Graw Hill, 1981 |
| Perry, R. H. | <u>Chemical Engineers' Handbook</u>
New York: Mc Graw Hill, 1973 |
| Rohsenow, W. H. | <u>Handbook of Heat Transfer</u>
New York: Mc Graw Hill, 1973 |

CUESTIONARIO

DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR DENTRO DEL SISTEMA (CILINDRO EBULLICION-CONDENSACION)

Nombre del Alumno: _____

Grupo: _____

- 1) ¿Qué se entiende por transferencia de calor?
- 2) ¿Cuántos y cuáles mecanismos de transferencia de calor -- existen?. Explique cada uno de ellos.
- 3) Describa los diferentes mecanismos de ebullición.
- 5) ¿En cuál mecanismo de condensación se obtienen mayores -- coeficientes de transferencia de calor?. Explique las ra zones.
- 6) ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de introducir al - sistema alguna sustancia que favorezca la aparición de la condensación en forma de gota?
- 7) ¿Cuáles son las razones de no aprovechar las ventajas de la condensación en forma de gota, en el diseño de equipo?
- 8) ¿Qué tipo de mecanismo de condensación se presenta en la condensación de una mezcla cuyo condensado sea no misci- ble y cuyo condensado sea 100% miscible?. Explique las - razones de su respuesta.

9) ¿Qué se entiende por coeficiente de transferencia total, y para este caso que factores influirían en la determinación de éste?

Nombre del Alumno: _____ Grupo: _____

Profesor: _____ Firma: _____

T A B L A 1

DATOS OBTENIDOS EN: DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL

CORRIDA	DESCRIPCION	UNIDADES	D	A	T	O
			1	2	3	4
1	Caudal de agua	g/s				
	Temperatura de entrada del agua	°C				
	Temperatura de salida del agua	°C				
	Temp. de saturación del refrigerante	°C				
	Voltaje	Volt				
	Corriente	Amp				
2	Caudal de agua	g/s				
	Temperatura de entrada del agua	°C				
	Temperatura de salida del agua	°C				
	Temp. de saturación del refrigerante	°C				
	Voltaje	Volt				
	Corriente	Amp				
3	Caudal de agua	g/s				
	Temperatura de entrada del agua	°C				
	Temperatura de salida del agua	°C				
	Temp. de saturación del refrigerante	°C				
	Voltaje	Volt				
	Corriente	Amp				

Grupo: _____

Fecha: _____

Profesor: _____

Observaciones: _____

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se desarrollaron los siguientes experimentos:

- 1) Demostración visual de los diferentes tipos de ebullición.
- 2) Determinación del coeficiente de transferencia de calor sobre la superficie calefactora.
- 3) Efecto de la presión sobre el flujo de calor - crítico en la ebullición.
- 4) Determinación del coeficiente de transferencia de calor total dentro del sistema (cilindro - ebullición-condensación).

Todos y cada uno de ellos en la unidad de transferencia de calor H6S2/2, ubicada en el laboratorio de física de la Universidad La Salle. De los anteriores se llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- 1) Demostración visual de los diferentes tipos de ebullición. En este experimento se logró visualizar perfectamente los diferentes mecanis-

mos de ebullición, es decir se logró percibir claramente la vaporización convectiva, la ebullición nucleada y la ebullición pelicular.

- 2) Determinación del coeficiente de transferencia de calor sobre la superficie calefactora. En este experimento y gracias a la ayuda de los instrumentos de medición, como lo son el amperímetro, voltímetro, termómetro electrónico, etc., se logró determinar dicho coeficiente a diferentes condiciones de operación.

Sólo encontrando como limitante el caudal de agua de refrigeración, el cual se encuentra actualmente conectado a la red de distribución general. Este factor nos conlleva trabajar a condiciones tales que no se requiera remover grandes cantidades de calor en el serpentín de condensación. Este detalle puede solventarse si se conecta una bomba centrífuga a la entrada del suministro de agua de la unidad.

Del anterior experimento se logró determinar claramente la curva $\Delta t \text{ vs } h$ de la cual se puede

deducir lo siguiente: A valores pequeños de Δt (temperatura de la superficie calefactora, menos, la temperatura de saturación del líquido puro), se tienen coeficientes de transferencia de calor en la superficie, bajas. A medida que este diferencial de temperatura se va incrementando, el coeficiente aumenta, hasta llegar a un punto máximo, correspondiente a la ebullición nucleada, para luego descender súbitamente, correspondiente a la ebullición pelicular. Este fenómeno se debe a que en la ebullición nucleada y debido a la formación intensa de burbujas, existe una buena transferencia de calor entre la superficie y el líquido; pero a medida que este diferencial de temperatura es lo suficientemente grande se forma una película de vapor sobre la superficie calefactora que impide el contacto del líquido con ésta, provocando con esto que el calor necesario para evaporar más líquido se transfiera a través de la película de vapor y consecuentemente la transferencia de calor de la superficie con el líquido desciende.

Se compararon los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos mediante correlaciones teóricas, de lo cual se puede decir lo siguiente: los resultados experimentales muestran concordancia con los resultados obtenidos mediante las correlaciones teóricas de los siguientes autores:

- Mc Nelly,
- Bromley,
- Kutateladze y
- Borishanskiy-Minchenko.

3) Efecto de la presión en el flujo de calor crítico en la ebullición. En este experimento se determinó cual es el efecto de la presión en el flujo de calor crítico en la ebullición, es decir en el punto máximo de la curva $q_c \sim h$ (cuando se pasa de ebullición nucleada a la pelicular).

Del anterior experimento se puede concluir lo siguiente:

A medida que la presión dentro del sistema aumenta, el flujo máximo de calor también. Lo anterior se debe a que a medida que la presión de vapor dentro del cilindro aumenta, existe una mayor demanda de energía para que el líquido comience a ebullición en forma intensa y consecuentemente el flujo máximo de calor ó crítico, aumenta.

Se compararon los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos mediante correlaciones teóricas, de lo que se puede decir que los resultados experimentales están en perfecta concordancia con los resultados obtenidos mediante las correlaciones teóricas de los siguientes autores:

- Zuber y Tribus
- Kutateladze y
- Chang-Snyder

4) Determinación del coeficiente de transferencia de calor total dentro del sistema (cilindro -- ebullición-condensación). En este experimento

se determinó el coeficiente de transferencia de calor total dentro del cilindro ebullición-condensación, es decir, entre el calor que se suministra a través del mango calefactor, y el que se remueve a través del serpentín de condensación y el que se pierde o disipa con los alrededores.

En este caso se recomienda tener mucho cuidado con las lecturas de los termómetros de entrada y salida del caudal de agua, debido a que una mala apreciación nos conllevaría a resultados muy incongruentes.

Del anterior experimento se puede decir lo siguiente: A medida que se suministra y se remueve mayor calor dentro del sistema el coeficiente de transferencia de calor total aumenta, hasta llegar a un máximo, que ocurre cuando el caudal de agua no es lo suficientemente grande para poder remover el calor que se suministra a través del mango calefactor; entonces el calor restante se comienza a disipar con los alrededores.

Con este experimento se puede determinar el punto óptimo de transferencia de calor dentro del cilindro.

NOTA IMPORTANTE: Para obtener buenos resultados se recomienda dejar estabilizar el sistema por lo menos 10 minutos entre la lectura de cada dato correspondiente a la se-cuencia sugerida.

Como soporte teórico de los anteriores experimentos se desarrolló un capítulo denominado Generalidades Teóricas, en donde sólo se tratan algunos de los tópicos más sobresalientes e íntimamente relacionados con los experimentos. Cabe señalar que la parte correspondiente a las correlaciones teóricas para cada caso específico, sólo se consideraron los modelos más comunes presentados en la literatura, ya que el desarrollo de cada ecuación implicaría por sí mismo un análisis teórico-práctico profundo, el cual no se apegaría a los objetivos primordiales del presente trabajo.

Con base al soporte teórico presentado y la experimentación desarrollada se diseñaron las presentes prácticas de la boratorio:

- 1) Demostración visual de los diferentes mecanismos de ebullición.
- 2) Determinación del coeficiente de transferencia de calor sobre la superficie calefactora.
- 3) Efecto de la presión sobre el flujo de calor crítico en la ebullición.
- 4) Determinación del coeficiente de transferencia de calor total dentro del sistema (cilindro ebullición-condensación).

Cada una de las anteriores prácticas presenta el siguiente formato:

- Título de la práctica
- Objetivos
- Introducción teórica
- Descripción del equipo
- Seguridad
- Técnica de operación
- Tratamiento de datos
- Trabajo posterior a la realización de la práctica

- Bibliografía
- Cuestionario que deberá presentar el alumno antes de realizar la práctica.
- Cuadro para recopilación de los datos solicitados

las cuales contemplan una duración de la clase de laboratorio de momentum y calor, de entre dos y tres horas seguidas, las que estarán distribuidas de la siguiente forma:

- Cuestionario (de 20 a 30 minutos)
- Revisión y familiarización con el equipo (de 10 a 15 minutos)
- Experimentación (de 90 a 120 minutos)
- Discusión de resultados y del trabajo posterior a la práctica (de 20 a 30 minutos)

6. BIBLIOGRAFIA

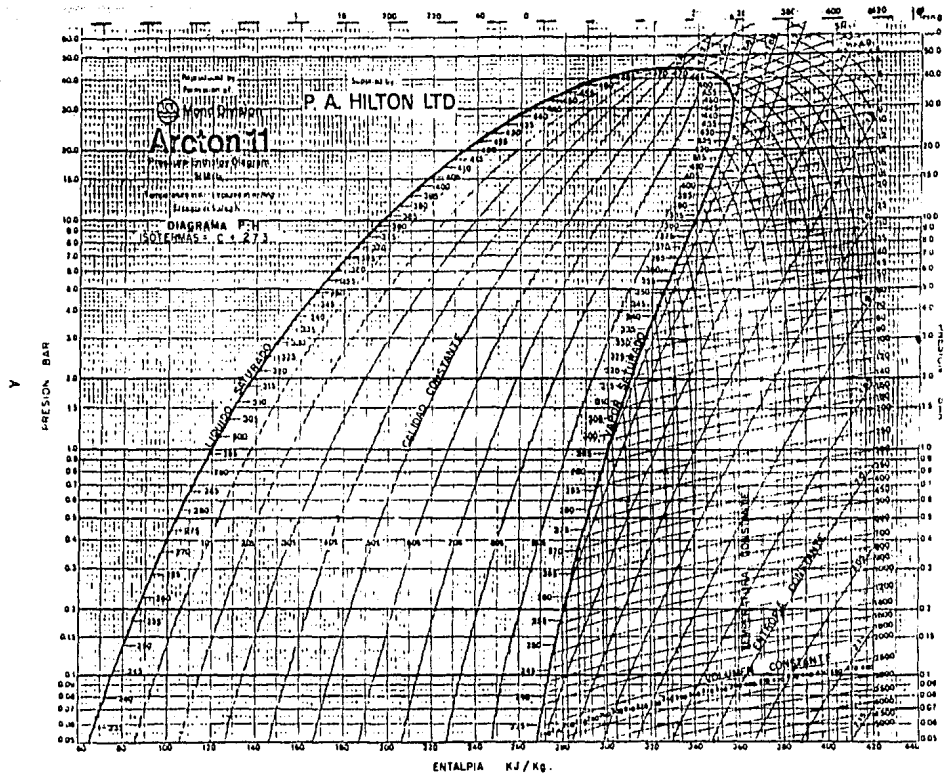
BIBLIOGRAFIA

- Berry, R.S. Physical Chemistry
New York : John Wiley & Sons 1980
- Bosworth, R.C.L. Heat Transfer Phenomena
New York : Wiley 1952
- Cavuseno, V. Process Heat Exchange
New York : Mc Graw-Hill 1979
- Condon, E.R. Handbook of Physics
New York : Mc Graw-Hill 1967
- Coulson, IM. Chemical Engineering
New York : Pergamon Press Inc. 1977
- Eckert, E.R.G. Introduction to the Transfer of Heat
and Mass
New York : Mc Graw-Hill 1950

- Eilom, S. Industrial Engineering Tables
London : D. Van Nostrand Co. Ltd.
- Fishenden, M. Transfer Operations
Japan : Mc Graw-Hill-Kogakusha 1972
- Holman, J.P. Heat Transfer
New York : Mc Graw-Hill 1981
- Hutchinson, E.W. Industrial Heat Transfer
New York : Industrial Press 1952
- Jakob, M. Heat Transfer
New York : Wiley 1949
- Kern, D.Q. Process Heat Transfer
New York : Mc Graw-Hill 1972
- Owen, L.D. Industrial Experiments
London : ICI Ltd. 1956
- Pavlov K.S. Problemas y Ejemplos para el Curso de
Romakov P.G. Operaciones Básicas y Aparatos de Tec-
nología Química
Noshkov A.A. nología Química
Moscu : Editorial Mir 1981

- Perry, R.H. Chemical Engineering Handbook
New York : Mc Graw-Hill 1973
- Rohsenow, W.M. Handbook of Heat Transfer
New York : Mc Graw-Hill 1973
- Schenck, H.J. Heat Transfer Engineering
New Jersey: Prentice-Hall 1959
- Threlkeld, J.L. Thermal Environmental Engineering
New Jersey: Prentice-Hall
- Woolrich, E.D. Handbook of Refrigeration Engineering
New York : The AVI Publishing Co. Inc. 1965

A N E X O S



PROPIEDADES FISICAS DEL
TRICLOROFLUORO METANO (R-11)

DESCRIPCION	SIMBOLO	UNIDAD	VALOR
Peso Molecular	MOL WT	-	137.368
Temp. de Fusión	T F P	°K	162.0
Temp. de Ebullición	TB	°K	297.0
Temp. Critica	TC	°K	471.2
Presión Critica	PC	atm	43.5
Vol. Critico	VC	cm ³ /gmol	248
Compresib. Critica	ZC	-	0.279
Factor Pitzer	OMEGA	-	0.188
Momento Dipolar	DIPM	Debyes	0.5
Constantes para	CP VAP A	-	9.789
el cálculo de la	CP VAP B	-	3.693 x 10
capacidad calorífica	CP VAP C	-	-3.383 x 10
(ec. gases ideales)	CP VAP D	-	9.903 x 10
Entalpía estandar de formación	DELHG	kcal/gmol	-68.0
Energía libre de Gibbs estandar	DELGF	kcal/gmol	-58.64
Coeficientes para	ANTA	-	15.8516
la ecuación de	ANTB	-	2401.61
Antoine	ANTC	-	-36.3
Temperatura máxima para la ec. de Antoine	TMX	°K	300
Temperatura mínima para la ec. de Antoine	TMIN	°K	240
Coeficientes para	HARA	-	48.709
la ecuación de	HARB	-	-4464.14
Harlacher	HARC	-	-4.753
	HARD	-	2.85
Calor de vaporización normal	HV	cal/gmol	5920
Parachor	PAR	-	195.4