

# OPERACIONES UNITARIAS

## MANUAL DE PRÁCTICAS

NÉSTOR GOODING GARAVITO



**Universidad Nacional de  
Colombia**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería  
Química

2009



MANUAL DE PRÁCTICAS  
OPERACIONES UNITARIAS

# **MANUAL DE PRÁCTICAS**

# **OPERACIONES UNITARIAS**

**NESTOR GOODING GARAVITO**

**INGENIERO QUIMICO**

**PROFESOR ASOCIADO**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

**2009**

# CONTENIDO

PRACTICA 1	BOMBA CENTRIFUGA	1
PRACTICA 2	COEFICIENTE DE FRICCION	10
PRACTICA 3	FLUJO COMPRESIBLE	20
PRACTICA 4	CALIBRACION DE MEDIDORES DE FLUJO	30
PRACTICA 5	PERDIDAS POR FRICCION	42
PRACTICA 6	FILTRACION A PRESION CONSTANTE	52
PRACTICA 7	FILTRACION A FLUJO CONSTANTE	61
PRACTICA 8	MOLIENDA Y TAMIZADO	72
PRACTICA 9	VISCOSIDAD SAYBOLT	82
PRACTICA 10	RESALTO HIDRAULICO	102
PRACTICA 11	CONDUCCION	123
PRACTICA 12	CONVECCION LIBRE,	130
PRACTICA 13	CONDENSACION TIPO GOTA Y TIPO PELICULA	140
PRACTICA 14	INTERCAMBIADOR DE TUBOS CONCENTRICOS	150
PRACTICA 15	INTERCAMBIADOR DE TUBOS Y CORAZA	160
PRACTICA 16	EVAPORACION CON UN EFECTO	168
PRACTICA 17	EVAPORACION CON CIRCULACION FORZADA	176
PRACTICA 18	EVAPORACION CON DOBLE EFECTO	183
PRACTICA 19	ANALISIS DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS	191
PRACTICA 20	EFICIENCIA TERMICA DE CALDERA	202
	BIBLIOGRAFIA	225

# INTRODUCCION

En este manual se hace una descripción detallada de cada una de las prácticas correspondientes al laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia; se establecen los objetivos, el procedimiento, el equipo utilizado, el diagrama de flujo y se da una guía para desarrollar la muestra de cálculos básicos para cada una de las prácticas. Se incluye además el diseño de tablas de datos y tablas de resultados.

El equipo utilizado, el cual aparece en las fotografías, está localizado en los laboratorios de Ingeniería Química, Hidráulica y Transferencia de Calor. Las prácticas aquí descritas corresponden a los temas vistos en la mecánica de fluidos, manejo de sólidos y transferencia de calor.

## PRACTICA 1

# BOMBA CENTRIFUGA



## OBJETIVOS

A ) Determinar las curvas características de una bomba centrífuga de tipo radial usando una velocidad constante durante la experiencia. Las curvas que deben construirse son:

Gráfica 1 - Cabeza total desarrollada en función del caudal.  
Gráfica 2 - Potencia al freno en función del caudal.

Gráfica 3 - Eficiencia de la bomba en función del caudal.

- B) Calcular la NPSH (cabeza neta positiva de succión) para cada caudal.
- C) Calcular la velocidad específica de la bomba para la condición de máxima eficiencia.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Los siguientes pasos deben seguirse para poner a funcionar la bomba centrífuga:
  - 1.1 El motor del dinamómetro debe estar frenado y la balanza en ceros.
  - 1.2 Colocar los tres reóstatos en posición cero.
  - 1.3 Prender los ventiladores de enfriamiento del dinamómetro llevando el interruptor "Field" a la posición "For".
  - 1.4 Arrancar el motor con el interruptor "Line".
  - 1.5 Colocar el reóstato de armadura (ubicado en la parte inferior) en la posición de alta velocidad.
  - 1.6 Ajustar la velocidad al valor indicado por el profesor con ayuda de los demás reóstatos.
  - 1.7 Una vez se arranque, quitar el freno del dinamómetro y liberar la balanza.
- 2) Abrir la válvula de alimentación al tanque de succión hasta alcanzar en el tanque un determinado nivel, el cual debe mantenerse constante durante toda la práctica.
- 3) La válvula colocada en la succión debe estar completamente abierta.
- 4) Abrir lentamente la válvula de descarga hasta obtener un caudal detectable con el medidor de vertedera.

- 5) Tomar las lecturas de fuerza (indicada en la balanza), presión en la succión, presión en la descarga y altura de la vertedera.
- 6) Abrir un poco más la válvula de descarga para obtener otro caudal y efectuar de nuevo las lecturas indicadas en el punto anterior.
- 7) Repetir el procedimiento anterior hasta obtener los datos para diez caudales diferentes y cerrar la válvula de descarga una vez terminado lo anterior.
- 8) Cerrar la válvula de alimentación al tanque colocado en la succión.
- 9) Para suspender el funcionamiento del equipo, frenar el dinamómetro, y pasar el interruptor de "line" a "stop". Regresar los reóstatos a la posición cero. Pasar el interruptor "field" a la posición "off".

## EQUIPO

- 1) Bomba centrífuga de tipo radial.
- 2) Vertedero triangular de 90°.
- 3) Válvula y manómetro en la succión.
- 4) Válvula y manómetro en la descarga.
- 5) Tuberías de succión y descarga.
- 6) Tanques de alimentación y descarga.
- 7) Motor y dinamómetro.
- 8) Tacómetro.

### Datos técnicos:

Tubería de acero galvanizado.  
Diámetro de la tubería de succión: 4 pulgadas.  
Diámetro de la tubería de descarga: 4 pulgadas.  
Reducción de 5 pulgadas a 4 pulgadas en la succión.

### Ecuación del vertedero:

$$Q = 1.651 \times 10^{-5} (\Delta Z)^{2.45}$$

Q = caudal (metros cúbicos/segundo)

$\Delta Z = (Z - 13.82)$  ; Z = altura vertedero (cm)

Ecuación para el cálculo de la potencia al freno ( $W_{freno}$ )

$$W_{freno} \text{ (vatios)} = 0.4971 \times F \times \text{RPM}$$

F = fuerza en kilogramos

RPM = revoluciones por minuto



DETALLE DEL CONJUNTO DINAMÉMETRO Y BOMBA

## CALCULOS

A)

**Cálculo del caudal.** Utilizando la ecuación del vertedero se calcula el caudal en cada caso.

**Calculo de la cabeza total (H).** Teniendo en cuenta que la velocidad en la succión y la velocidad en la descarga son iguales, la cabeza total viene dada por la expresión:

$$H = \frac{P_d - P_s}{g \rho} + \Delta Z + H_{fs}$$

$P_d$  = presión absoluta en la descarga (pascales)

$P_s$  = presión absoluta en la succión (pascales)

$g$  = aceleración de la gravedad ( $9.8 \text{ m/s}^2$ )

$\rho$  = densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )

$\Delta Z$  = diferencia de alturas entre la succión y la descarga (60 cm).

$$H_{fs} = \text{pérdidas por fricción} = 4f (L/D) (v^2/2g)$$

$f$  = factor de fricción de Fanning

$L$  = longitud de la tubería (m)

$D$  = diámetro de la tubería (m)

$v$  = velocidad media del fluido (m/s)

Para  $f$  debe calcularse el número de Reynolds ( $N_{Re}$ ), así:

$$N_{Re} = D v \rho / \mu$$

$D$  = diámetro de la tubería (m).

$v$  = velocidad media del agua (m/s).

$\rho$  = densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\mu$  = viscosidad absoluta del agua ( $\text{kg/m s}$ ).

**Cálculo de la potencia al freno.** Se calcula por la ecuación dada anteriormente.

**Cálculo de la potencia entregada al fluido ( $W_{\text{fluido}}$ ).** Se calcula de la siguiente manera:

$$W_{\text{fluido}} = g H Q \rho$$

$g$  = aceleración de la gravedad ( $9.8 \text{ m/s}$ ).

$H$  = cabeza total desarrollada (m).

$Q$  = caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$\rho$  = densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ ).

Calculo de la eficiencia de la bomba ( $\eta$ ). Se utiliza la relación:

$$\eta = (W_{\text{fluido}} / W_{\text{freno}})$$

Los resultados de los cálculos anteriores deben registrarse en una tabla según modelo y con ellos construir en escala decimal las curvas solicitadas en los objetivos de la práctica.

ENSAYO	CAUDAL ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	CABEZA TOTAL (m)	POTENCIA AL FRENO (vatios)	EFICIENCIA
1				

**B) Cálculo de la cabeza neta positiva de succión (NPSH).** Se calcula mediante la ecuación:

$$\text{NPSH} = \frac{P_s - P_v}{g \rho} + \frac{v_s^2}{2g}$$

$P_s$  = presión absoluta en la succión (pascales).

$P_v$  = presión de vapor del agua (pascales).

$v_s$  = velocidad media del fluido en la succión ( $\text{m/s}$ ) =  $Q/A_s$

$Q$  = caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$A_s$  = área de la sección de succión ( $\text{m}^2$ ).

$g$  = aceleración de la gravedad ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ).

$\rho$  = densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ ).

Los cálculos anteriores se presentan en una tabla según el modelo:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NPSH (m)										

**C) Cálculo de la velocidad específica de la bomba ( $N_s$ ).**

La velocidad específica es la velocidad en RPM a la cual, una bomba teórica, geoméricamente similar a la actual, se movería a su máxima eficiencia para un caudal de 1 galón/mi y una cabeza total de 1 pie. Se calcula por la fórmula:

$$N_s = \frac{n Q^{0.5}}{H^{0.75}}$$

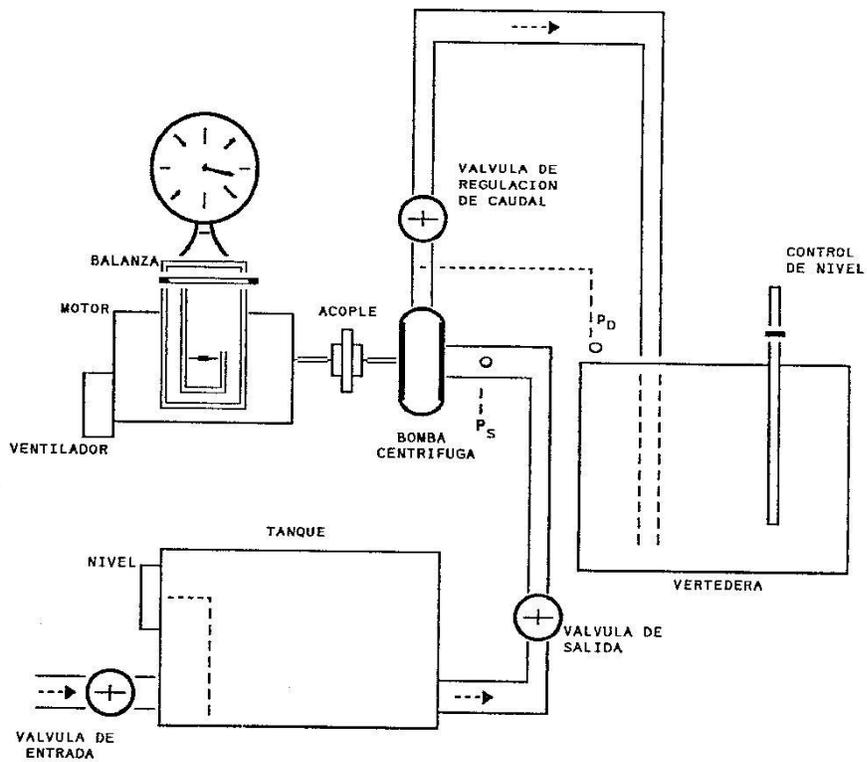
n = velocidad actual de la bomba (RPM)

Q = caudal en galones por minuto (GPM) leído en la gráfica para la condición de máxima eficiencia.

H = cabeza total en pies leída de la gráfica para el valor de Q anterior.

## DIAGRAMA DE FLUJO

### INSTALACION PARA BOMBA CENTRIFUGA



LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS

TABLA DE DATOS : PRACTICA 1

BOMBA CENTRIFUGA

ENSAYO	PRESION SUCCION cm Hg	PRESION DESCARGA cm Hg	LECTURA DINAMOMETRO kg	ALTURA VERTEDERA cm
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

VELOCIDAD DEL MOTOR RPM		ALTURA INICIAL VERTEDERA cm		NIVEL TANQUE SUCCION cm	
----------------------------	--	--------------------------------	--	----------------------------	--

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 2

# COEFICIENTE DE FRICCION



Conjunto del equipo

## OBJETIVOS

- A) Para cada ensayo, determinar las pérdidas de carga por unidad de longitud ( $H_f/L$ ) o gradiente hidráulico, el caudal, la velocidad media y el número de Reynolds.

Gráfica A : Presión en cada punto de la tubería en función de la longitud de ésta.

- B) Determinar la variación del gradiente hidráulico con la velocidad y las zonas de régimen laminar, transición y turbulento. Determinar el valor de las constantes C, y n en la ecuación  $(H_f / L) = C v^n$  en cada una de las zonas.

Gráfica B-1 : Gradiente hidráulico en función de la velocidad en escala logarítmica.

Gráfica B-2: Gradiente hidráulico en función del número de Reynolds en escala logarítmica.

- C) Determinar el valor del coeficiente de fricción y las constantes D y m en la ecuación  $f = D (N_{re})^m$  . Comparar con las ecuaciones correspondientes para régimen laminar y turbulento.

Gráfica C : Coeficiente de fricción en función del número de Reynolds en escala logarítmica.

- D) Calcule la potencia que la bomba debe suministrar al fluido para régimen sin perturbaciones y con perturbaciones. Explique la diferencia.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Revisar que la válvula reguladora V-1 y la válvula de V-2 estén completamente cerradas. La palanca que cierra o abre la compuerta que da paso al tanque gravimétrico debe estar inicialmente al fondo, es decir evitando que el aceite caiga a dicho tanque. El tanque debe estar vacío.
- 2) Revisar que las conexiones manométricas permitan leer las diferencias de presión en cm de Hg.
- 3) Prender la bomba y permitir mediante la válvula reguladora el mínimo flujo posible con el fin de efectuar el primer ensayo.
- 4) Tomar los siguientes datos:

Lecturas manométricas correspondientes a los puntos 1 al 7. Tomar además la lectura a la salida de la bomba.



DETALLE DEL PERTURBADOR DE FLUJO Y BOMBA

Temperatura del aceite al comenzar y al terminar el ensayo.

- 5) Tomar nuevamente los datos anteriores pero introduciendo perturbaciones con el rotor manual colocado a la entrada de la tubería.
- 6) Mover hacia el frente la palanca de compuerta y simultáneamente poner en funcionamiento un cronómetro con el fin de medir el tiempo para recolectar una masa dada de aceite en el tanque gravimétrico.
- 7) Una vez terminada la operación anterior, desocupar el tanque gravimétrico abriendo la válvula V-2, abrir un poco más la válvula reguladora V-1 con el fin de obtener un caudal mayor y repetir el procedimiento desde el numeral 4 en adelante para realizar un nuevo ensayo.
- 8) Terminado el número de ensayos que requiere la práctica, cerrar V-1 y apagar la bomba.



DETALLE DE LA BALANZA PARA PESAR EL ACEITE Y DEL MÚLTIPLE DEL MANÓMETRO

## CALCULOS

A) Partiendo del punto 1 y para los demás datos tomados en la práctica se tabulan las presiones en cm Hg en función de la longitud en metros y se construye la gráfica A.

B) Para cada ensayo se calcula el gradiente hidráulico en la siguiente forma:

$$(H_{fs}/L) = (\Delta P/\rho \Delta L) \quad (\text{J/kg m})$$

$\Delta P$  = diferencia de presiones entre dos tomas consecutivas. (Pascuales)

$\rho$  = densidad del aceite ( $\text{kg/m}^3$ )

$\Delta L$  = diferencia de longitud entre las dos tomas. (metros)

El gradiente hidráulico promedio para cada ensayo puede calcularse de la siguiente manera:

$$(H_{fs}/L)_{\text{medio}} = \frac{\sum (H_{fs}/L)}{5}$$

El caudal se calcula así:

$$Q = m/\theta\rho \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

$m$  = masa recolectada en el tanque gravimétrico (kg).

$\theta$  = tiempo para recolectar la masa anterior (s).

$\rho$  = densidad del aceite ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

La velocidad media se puede calcular así:

$$v = (Q/A) \quad (\text{m}/\text{s})$$

$A$  = área de la sección de tubería =  $(\pi D^2/4)$  , ( $\text{m}^2$ )

$D$  = diámetro de la tubería (m).

El gradiente hidráulico calculado entre las tomas 1 y 2 como :

$$(P_1 - P_2) / \rho \Delta L_{1-2}$$

incluye la pérdida que se presenta al entrar el fluido a la tubería.

Por lo tanto, la diferencia entre dicho gradiente y el gradiente medio puede hacerse igual a  $k (v^2/2g)$  en donde el valor de  $k$  despejado de allí debe estar en las cercanías de 0.4.

$$(P_1 - P_2) / \rho \Delta L_{1-2} - (H_{fs} / L)_{\text{medio}} = k (v^2/2g)$$

El número de Reynolds se calcula así:

$$N_{Re} = (D v \rho / \mu)$$

$\mu$  = viscosidad del aceite a la temperatura del ensayo ( $\text{kg} / \text{m s}$ ).

Los datos anteriores se llevan a la siguiente tabla:

**ENSAYO N°**

GRADIENTE HIDRAULICO						Q	v	N <sub>Re</sub>
2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	medio	m <sup>3</sup> /s	m/s	

Utilizando los datos de la tabla anterior para todos los ensayos se construye la gráfica B-1 y B-2.

La teoría indica que se presenta régimen laminar para N<sub>Re</sub> hasta 2100, entre 2100 y 4000 un régimen de transición y para N<sub>Re</sub> mayores de 4000 régimen turbulento.

A partir de la gráfica B-2 se determinan los valores de H<sub>fs</sub> para números de Reynolds de 2100 y 4000.

Utilizando los valores anteriores en la gráfica B-1, se pueden determinar las correspondientes velocidades donde termina el régimen laminar y donde comienza el régimen turbulento.

Definidas las zonas anteriores se ajustan dos líneas rectas, una para cada zona.

De lo anterior se deduce que H<sub>fs</sub> = C v<sup>n</sup> donde el significado de C y n se obtienen de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$H_{fs} = 4f(L/D)(v^2/2)$$

en la cual si f se reemplaza como  $f = 16/R_{e}$  se obtiene:

$$H_{fs} = 32 \mu L v / D^2 \rho$$

Así pues, para régimen laminar:

$$C = 32 \mu L / D^2 \rho \quad n = 1$$

Para flujo turbulento,

$$C = 4f L / 2 D \quad n = 2$$

Mediante la pendiente de la recta, en cada zona, se puede obtener n y compararlo con los valores anteriores.

C) Considerando que para régimen laminar el factor de fricción de Fanning depende solamente del número de Reynolds:

$$f = (16/N_{Re})$$

y utilizando además la ecuación de Darcy:

$$f = \frac{H_{fs} D}{2LV^2} = \frac{H_{fs} D^3 \rho^2}{2L\mu^2} \times \frac{1}{(N_{Re})^2}$$

se puede calcular el factor de fricción (f) para las dos zonas y construir la siguiente tabla:

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f										
N <sub>Re</sub>										

Utilizando la tabla anterior se construye en escala logarítmica la gráfica C, donde debe aparecer una gráfica para cada zona.

E) Para calcular la potencia entregada al fluido se utiliza:

$$\text{Potencia (vatios)} = m \left( \frac{\Delta P}{\rho} + g Z \right)$$

$$\Delta P = P_B - P_{\text{barométrica}} \quad (\text{pascales})$$

Z = diferencia de alturas entre la descarga de la bomba y el punto de succión (nivel del aceite), m.

g = aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>.

Los cálculos anteriores deben efectuarse para los cinco ensayos con y sin perturbaciones. En las gráficas deben aparecer así mismo los dos casos.

PROPIEDADES DEL ACEITE (ESSO UNIVOLT 35)  
UTILIZADO EN LA PRACTICA

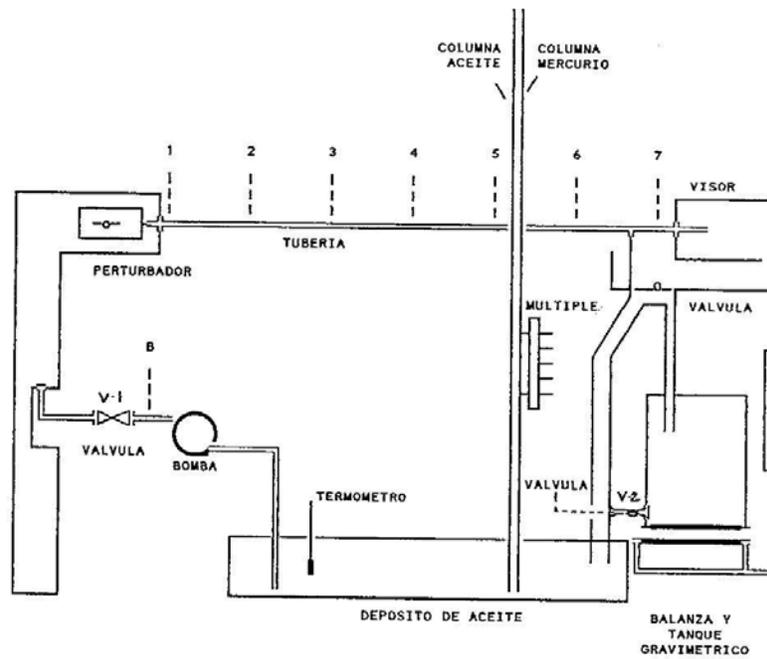
TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (centipoises)
10	31.2
14	30.0
16	27.5
18	23.5
20	20.0
26	15.0
30	13.7
32	12.0
34	11.0
36	10.5
37	9.5

Para interpolar valores se recomienda llevar a una gráfica dada por la ASTM los valores anteriores  
ASTM D 341-89, sección 5, volumen 05.01, 1992  
Ver práctica 09 de este manual.

TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )
10	864.5
15	860.1
20	855.3
25	854.3
30	854.0

## DIAGRAMA DE FLUJO

### EQUIPO PARA COEFICIENTE DE FRICCION



LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS I

TABLA DE DATOS : PRACTICA 2

COEFICIENTE DE FRICCION

SIN PERTURBACIONES										
ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m (kg)										
$\theta$ (mi)										
T <sub>inicial</sub> (°C)										
T <sub>final</sub> (°C)										
P <sub>1</sub> (cm Hg)										
P <sub>2</sub> (cm Hg)										
P <sub>3</sub> (cm Hg)										
P <sub>4</sub> (cm Hg)										
P <sub>5</sub> (cm Hg)										
P <sub>6</sub> (cm Hg)										
P <sub>7</sub> (cm Hg)										
P <sub>B</sub> (cm Hg)										

CON PERTURBACIONES										
ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m (kg)										
$\theta$ (mi)										
T <sub>inicial</sub> (°C)										
T <sub>final</sub> (°C)										
P <sub>1</sub> (cm Hg)										
P <sub>2</sub> (cm Hg)										
P <sub>3</sub> (cm Hg)										
P <sub>4</sub> (cm Hg)										
P <sub>5</sub> (cm Hg)										
P <sub>6</sub> (cm Hg)										
P <sub>7</sub> (cm Hg)										
P <sub>B</sub> (cm Hg)										

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 3

# FLUJO COMPRESIBLE



CONJUNTO DEL EQUIPO

## OBJETIVOS

A) Determinar la variación de la presión en función de la distancia.

Gráfica A: Presión en función de distancia, para cada flujo.

B) Determinar la velocidad media de flujo ( $V_{med}$ ).

Gráfica B-1: Distribución de velocidad para cada flujo.

Gráfica B-2: ( $V_{med} / V_{max}$ ) en función del número de Reynolds máximo.

C) Determinar el valor  $f$  ( $\Delta L/r_H$ ) en cada punto de la tubería para cada flujo.

Gráfica C:  $(P / P_2)$  en función de  $f$  ( $\Delta L/r_H$ ) para cada flujo.

D) Calcular el factor de fricción de Fanning para cada punto de la tubería.

Gráfica D: Factor de fricción en función del número de Reynolds.

E) Determinar la constante del Vénturi ( $K = C_v Y$ ).

Gráfica E:  $K$  en función del número de Reynolds.

F) Encontrar la curva de calibración del medidor Vénturi.

Gráfica F: Flujo de masa en función de la caída de presión.

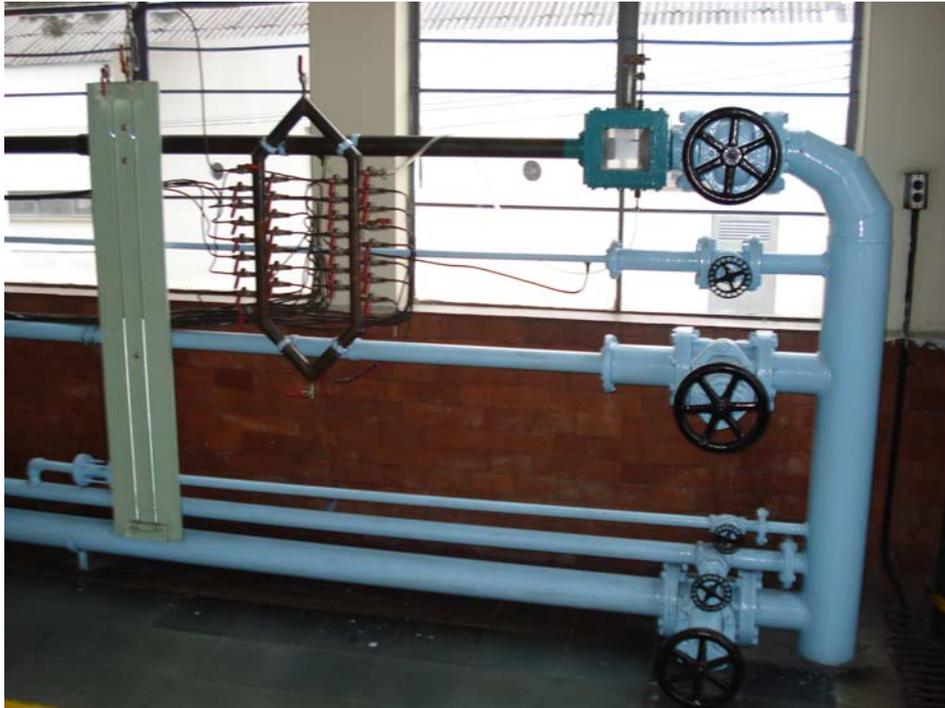
## PROCEDIMIENTO

- 1) Abrir completamente la válvula colocada inmediatamente después del Pitot y la correspondiente válvula de salida según el Vénturi que se va a calibrar.
- 2) Encontrar exactamente el centro de la tubería mediante el nonio del Pitot.
- 3) Para cada flujo, correspondiente a una posición de la válvula de salida, tomar los siguientes datos:
  - Presiones a lo largo de la tubería.
  - Presiones en el Vénturi utilizado.
  - Presión para el Pitot en el centro de la tubería y cada 5 mm hasta la pared de la misma.
- 4) Repetir lo anterior para otros cuatro flujos cerrando cada vez más la válvula de salida.
- 5) Tomar datos de temperatura para cada flujo.

## EQUIPO

- 1) Compresor de 300 pies<sup>3</sup>/mi.

- 2) Red de tuberías de flujo.
- 3) Tomas de presión numeradas a lo largo de la tubería y conectadas a un múltiple para leer sobre un solo manómetro.
- 4) Tubo de Pitot colocado en una sección de la tubería para medir la distribución de velocidad en la sección transversal.
- 5) Medidores Vénturi intercalados en las tuberías.



DETALLE DEL MANÓMETRO, MÚLTIPLE, TUBO DE PITOT Y VÁLVULAS

## CALCULOS

### A) Determinación de la variación de presión en función de la distancia.

Para cada ensayo se calcula la presión absoluta en cada punto de la tubería en kilopascales (kPa) y se construye una tabla según el modelo:

ENSAYO	P <sub>1</sub> (kPa)	P <sub>2</sub> (kPa)	P <sub>3</sub> (kPa)	P <sub>4</sub> (kPa)	P <sub>5</sub> (kPa)	P <sub>6</sub> (kPa)
1						
2						
3						
4						
5						

Con los datos de la tabla se construye la gráfica A en papel decimal. En ésta gráfica debe obtenerse y señalarse por extrapolación el valor de la presión estática correspondiente al Pitot, el cual está situado 0.87 m adelante del punto 6.

Se calcula ahora la presión absoluta en los demás puntos y se construye la siguiente tabla:

ENSAYO	VENTURI		PITOT					
	P <sub>24</sub> (kPa)	P <sub>25</sub> (kPa)	CENTRO (kPa)	5 mm (kPa)	10 mm (kPa)	15 mm (kPa)	20 mm (kPa)	25 mm (kPa)
1								
2								
3								
4								
5								

**B) Cálculo de la velocidad media de flujo (V<sub>med</sub>).**

Para cada ensayo se calcula la densidad (ρ) del aire en el Pitot, utilizando los valores de la presión extrapolada y suponiendo comportamiento ideal así:

$$\rho = \frac{P_o M}{RT}$$

- M = masa molecular del aire.
- P<sub>o</sub> = presión estática en el Pitot.
- T = temperatura absoluta del aire en el ensayo.
- R = constante universal de los gases.



DETALLE DEL TUBO DE PITOT

Para un número de Mach  $\ll 1$ , la velocidad local ( $u$ ) puede calcularse por la ecuación:

$$u = \frac{[2 (P_t - P_o)]^{0.5}}{\rho^{0.5}} \quad (\text{m/s})$$

$P_t$  = presión de estancamiento (Pitot), Pa

$P_o$  = presión estática, Pa

$\rho$  = densidad del aire,  $\text{kg/m}^3$

Con los resultados anteriores se construye una tabla de acuerdo al siguiente modelo:

ENSAYO	VELOCIDADES LOCALES (m/s)					
	Máxima	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm
1						
2						
3						
4						
5						

Utilizando los datos de la tabla anterior se construye la gráfica B-1, la cual debe contener 5 curvas de distribución de velocidad.

Mediante un método gráfico o numérico, el cual debe explicarse, se determina la velocidad media ( $V_{med}$ ) para cada ensayo.

Se determina ahora para cada ensayo la relación ( $V_{med}/V_{max}$ ).

Utilizando la velocidad máxima se calcula el número de Reynolds máximo así:

$$N_{Re(max)} = \frac{D V_{max} \rho}{\mu}$$

Los resultados anteriores se llevan a una tabla con la siguiente estructura:

ENSAYO	$V_{med}$ (m/s)	$V_{max}$ (m/s)	$(V_{med}/V_{max})$	$N_{Re(max)}$
1				
2				
3				
4				
5				

Utilizando la tabla anterior se construye en escala semilogarítmica la gráfica B-2.

**C) Determinación del valor de  $f \Delta L/r_H$  en cada punto de la tubería y para cada flujo.**

Se utiliza la ecuación:

$$X = \frac{f (L - L_2)}{r_H} = \frac{M}{G^2 RT} [(P_2)^2 - (P)^2] - 2 \ln (P_2/P)$$

f = factor de fricción de Fanning  
 (L - L<sub>2</sub>) = distancia desde un punto respecto al punto 2, m  
 r<sub>H</sub> = radio hidráulico = D/4 , m  
 G = ρ V<sub>med</sub> , kg/s m<sup>2</sup>  
 R = constante universal del los gases  
 T = temperatura absoluta, °K

Se calcula ahora: Y = (P/P<sub>2</sub>)

Los resultados anteriores se llevan a una tabla con el siguiente formato:

ENTRE TOMAS	ENSAYO 1		ENSAYO 2		ENSAYO 3		ENSAYO 4		ENSAYO 5	
	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
2-3										
2-4										
2-5										
2-6										

Con los datos consignados en la tabla anterior se construye en papel decimal la gráfica C..

**D) Cálculo del factor de fricción (f) en cada ensayo.**

Para cada ensayo se calculan cuatro valores de f = X . r<sub>H</sub> / ΔL

Para cada ensayo se promedian aritméticamente los cuatro valores del factor de fricción.

Para cada ensayo se calcula el número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{D V_{med} \rho}{\mu}$$

Los resultados anteriores se llevan a una tabla con el siguiente formato:

ENSAYO	FACTOR DE FRICCIÓN ENTRE LAS TOMAS				PROMEDIO	N <sub>Re</sub>
	2-3	2-4	2-5	2-6		
1						
2						
3						
4						
5						

Utilizando las dos últimas columnas de la tabla anterior se construye en escala logarítmica la gráfica D.

**E) Determinación de la constante del Vénturi.**

Se utiliza la siguiente ecuación :

$$K = C_v Y = \frac{m [1 - (D_{24} / D_{25})^4 ]^{0.5}}{A_{24} [2 \rho_{25} \Delta P]^{0.5}}$$

- K = constante del Vénturi
- m = flujo de masa, kg/s = V<sub>med</sub> A ρ
- A = área de la tubería, m<sup>2</sup>
- ρ = densidad a las condiciones del Pitot, kg/m<sup>3</sup>
- ΔP = (P<sub>25</sub> - P<sub>24</sub>), pascales
- D<sub>24</sub> = diámetro de la garganta del vénturi, m
- D<sub>25</sub> = diámetro de la tubería, m
- ρ<sub>25</sub> = densidad a la salida del vénturi, kg/m<sup>3</sup>

Con los valores de K y el número de Reynolds calculado en el literal anterior, se construye una tabla según el formato:

ENSAYO	1	2	3	4	5
K = C <sub>v</sub> Y					
N <sub>Re</sub>					

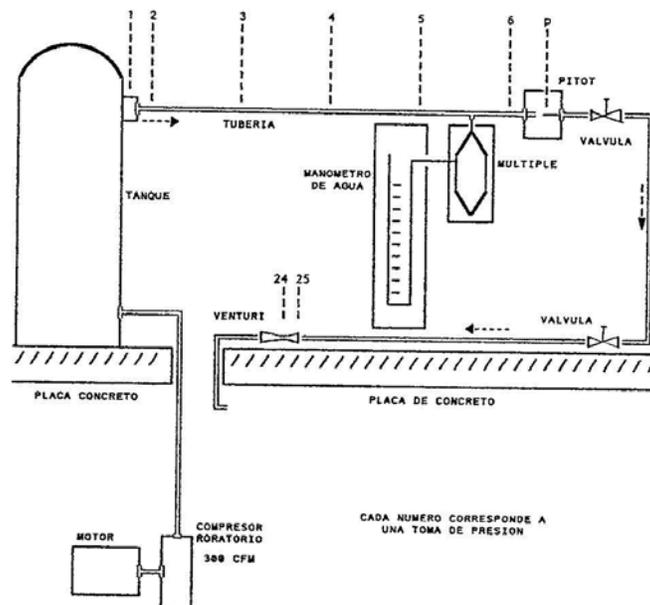
Utilizando la tabla anterior construir en escala logarítmica la gráfica E.

**F) Curva de calibración del medidor Vénturi.** Con los resultados del flujo de masa y la caída de presión en cada ensayo, se construye la siguiente tabla:

ENSAYO	1	2	3	4	5
m (kg/s)					
$\Delta P$ (kPa)					

Utilizando la tabla anterior se construye en escala logarítmica la gráfica F.

## DIAGRAMA DE FLUJO FLUJO COMPRESIBLE



LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS I

TABLA DE DATOS : PRACTICA 3

FLUJO COMPRESIBLE

		LECTURAS MANOMETRICAS TUBERIA (cm agua)						t (°C)
		1	2	3	4	5	6	
1	I							
	D							
2	I							
	D							
3	I							
	D							
4	I							
	D							
5	I							
	D							

		VENTURI (cm agua)		PITOT (cm agua)					
		24	25	CENTRO	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm
1	I								
	D								
2	I								
	D								
3	I								
	D								
4	I								
	D								
5	I								
	D								

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_ M \_\_\_ A \_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 4

# CALIBRACION DE MEDIDORES DE FLUJO



CONJUNTO DEL EQUIPO

## OBJETIVOS

- A) Verificar por lo menos tres valores de la curva de calibración del rotámetro indicando los puntos correspondientes sobre el diagrama, en color rojo.

Gráfica A : Lectura del rotámetro en función del flujo volumétrico.

B) Verificar la calibración del contador de disco con la ayuda de un cronómetro.

Gráfica B : Flujo dado por el contador de disco en función del flujo dado por el rotámetro.

C) Comparar la caída de presión entre el contador de disco y el rotámetro.

Gráfica C : Caída de presión para cada instrumento en función del flujo dado por el rotámetro.

D) Determinar el diámetro del orificio desconocido y su porcentaje de pérdida permanente de presión.

Gráfica D-1: Caída de presión en función de la distancia en diámetros de tubería.

Determinar la posición de la vena contracta.

Gráfica D-2 : Flujo dado por el rotámetro en función de la caída de presión máxima.

E) Determinar el coeficiente de descarga del medidor de orificio conocido y el porcentaje de pérdida permanente de presión.

Gráfica E : Flujo dado por el rotámetro en función de la caída de presión máxima.

F) Determinar el coeficiente de descarga del medidor venturi y el porcentaje de pérdida permanente de presión.

Gráfica F : Flujo dado por el rotámetro en función de la caída de presión máxima.

G) Determinar las ecuaciones empíricas para el medidor de ranura y el medidor de vertedera.

Gráfica G : Flujo dado por el rotámetro en función de la altura.

## **PROCEDIMIENTO**

- 1) Abrir la válvula de entrada al medidor de ranura y cerrar la válvula de entrada al medidor de vertedera.
- 2) La válvula "by pass" del contador de disco, lo mismo que la del rotámetro, deben estar completamente cerradas.
- 3) Colocar la vertedera indicada por el profesor.
- 4) Cerrar el circuito eléctrico para poner en funcionamiento la bomba y abrir lentamente la válvula que hace circular el agua a través del contador de disco. Esta válvula debe operarse siempre con lentitud para evitar movimientos bruscos del mercurio en los manómetros.
- 5) Para diez flujos diferentes, comenzando por el valor más alto posible, tomar los datos indicados en la tabla.
- 6) Para terminar, cerrar lenta y totalmente la válvula utilizada para el control de flujo y suspender luego el funcionamiento de la bomba.

## **EQUIPO**

Consta de diferentes tipos de medidores de flujo, conectados de tal manera, que el agua proveniente del tanque de almacenamiento, pasa sucesivamente a través de cada uno de ellos, cuando se someten a ensayo. Tales medidores son en su orden:

- 1) Un contador de disco inclinado (disco de nutación). Posee un manómetro destinado a medir la caída de presión entre la entrada y la salida del instrumento.
- 2) Un rotámetro, debidamente calibrado, cuyas lecturas serán la base de los cálculos en el informe. Está dotado de manómetro conectado entre la entrada y la salida del aparato.
- 3) Medidor de orificio de diámetro desconocido. Posee conexión para toma de presión situada 1D antes del medidor y siete conexiones para tomas de

presión situadas a 0.125 D, 0.25 D, 0.5 D, 1 D, 1.5 D, 2 D y 8 D; después del medidor. La letra D representa el diámetro interior de la tubería.

- 4) Un medidor de orificio de diámetro conocido. Posee una conexión para toma de presión situada 1D antes del orificio y dos después situadas a 1/3 D y 8 D.
- 5) Un medidor vénturi con conexiones para toma de presión a la entrada, en el cuello y a 8 D después del medidor.
- 6) Vertedera de dimensión intercambiable (1/4, 1/2, 3/4).
- 7) Medidor de ranura.
- 8) Tablero de manómetros.

Datos adicionales:

Diámetro del orificio conocido: 0.584 pulgadas.  
 Diámetro del cuello del vénturi: 0.595 pulgadas.  
 Diámetro interior de la tubería: 0.995 pulgadas.

## CALCULOS

A) Se calculan por lo menos tres flujos recolectando agua en un recipiente y midiendo el tiempo. Los flujos calculados así se comparan con la lectura del rotámetro colocando los puntos en rojo sobre la gráfica A.

B) Con los datos de flujo para el rotámetro y los calculados para el contador de disco se construye la gráfica B.

### C) Caídas de presión en el contador de disco y el rotámetro.

Para cada instrumento y con cada flujo se calcula la caída de presión por la fórmula:

$$\Delta P = g \Delta Z (\rho_{\text{mercurio}} - \rho_{\text{agua}})$$

$\Delta P$  = caída de presión, pascales.

$\Delta Z$  = diferencia de alturas entre las columnas de mercurio, m.  
 $g$  = aceleración de la gravedad,  $9.8 \text{ m/s}^2$   
 $\rho$  = densidad,  $\text{kg/m}^3$

En el caso del rotámetro, considerar la diferencia de alturas entre las tomas manométricas.

Los cálculos anteriores se registran en una tabla como la siguiente:

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q (lt/mi)										
$\Delta P_{\text{cont}}$ (Pa)										
$\Delta P_{\text{rot}}$ (Pa)										

Con los datos de la tabla anterior se construye la gráfica C.

**D) Cálculo del diámetro del orificio desconocido.**

Con los datos de presión tomados en cm de Hg se determina  $\Delta P$  restando el valor de  $P_{1D}$  menos cada uno de los valores a 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 8D. Se construye una tabla como la siguiente para cada ensayo.

$(\Delta P = P_{1D} - P)$ cm Hg							
DISTANCIA (diámetros)	0.125	0.25	0.5	1.0	1.5	2.0	8.0

Con los datos anteriores para cada ensayo se construyen las correspondientes curvas en la gráfica D-1.

Utilizando cada una de las curvas de la gráfica D-1, se determina la caída de presión máxima ( $\Delta P_{\text{max}}$ ) para cada flujo mediante la fórmula:

$$\Delta P_{\text{max}} = g \Delta Z_{\text{max}} (\rho_{\text{mercurio}} - \rho_{\text{agua}})$$

$\Delta P$  = caída de presión, pascales.

$\Delta Z_{\text{max}}$  = diferencia de altura máxima en metros de Hg.

$g$  = aceleración de la gravedad,  $9.8 \text{ m/s}^2$

$\rho$  = densidad,  $\text{kg/m}^3$

Se convierte la lectura del rotámetro a  $\text{m}^3/\text{s}$  para cada ensayo.

Los resultados anteriores se llevan a la siguiente tabla:

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q (m <sup>3</sup> /s)										
ΔP <sub>max</sub> (Pa)										

Utilizando la tabla anterior se construye en escala logarítmica la gráfica D-2.

Para la determinación del diámetro del orificio desconocido se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{C_o A_o}{(1 - \beta^4)^{0.5}} (2 \Delta P_{\max} / \rho)^{0.5}$$

C<sub>o</sub> = coeficiente de descarga del orificio = 0.61 para Reynolds mayores de 20000.

A<sub>o</sub> = área de flujo en el orificio = π D<sub>o</sub><sup>2</sup>/4, m<sup>2</sup>

ρ = densidad del agua, kg/m<sup>3</sup>

ΔP<sub>max</sub> = caída de presión máxima, Pa

β = D<sub>o</sub>/D

D<sub>o</sub> = diámetro del orificio, m

D = diámetro de la tubería, m

La ecuación anterior es del tipo:

$$Q = k (\Delta P_{\max})^m$$

$$\log Q = m \log (\Delta P_{\max}) + \log k$$

Por similitud:

$$\log Q = 0.5 \log (\Delta P_{\max}) + \log \left[ \frac{C_o A_o}{(1 - \beta^4)^{0.5}} (2 / \rho)^{0.5} \right]$$

A partir de la gráfica D-2:

$$m = \text{pendiente} \approx 0.5$$

$$k = \text{intersección} = \left[ \frac{C_o A_o}{(1 - \beta^4)^{0.5}} (2 / \rho)^{0.5} \right]$$

El valor del intersección se toma directamente de la gráfica log Q vs log  $\Delta P_{\max}$ .

De la expresión anterior se calcula  $D_o$ .

El porcentaje de pérdida permanente de presión se calcula como:

$$\frac{P_{1D} - P_{8D}}{\Delta P_{\max}} \times 100$$

**E) Cálculo del coeficiente de descarga del orificio conocido.**

Se calcula el  $\Delta P_{\max}$  para cada ensayo como  $(P_{1D} - P_{0.33D})$  mediante la fórmula:

$$\Delta P_{\max} = g \Delta Z_{\max} (\rho_{\text{mercurio}} - \rho_{\text{agua}})$$

$\Delta P_{\max}$  = caída de presión, pascales.

$\Delta Z_{\max}$  = diferencia de altura máxima en metros de Hg.

g = aceleración de la gravedad, 9.8 m/s<sup>2</sup>

$\rho$  = densidad, kg/m<sup>3</sup>

Los resultados anteriores se llevan a la siguiente tabla:

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q (m <sup>3</sup> /s)										
$\Delta P_{\max}$ (Pa)										

Utilizando la tabla anterior se construye en escala logarítmica la gráfica E.

El intersección de la línea log Q vs log  $\Delta P_{\max}$  es el valor de k.

$$k = \text{intersepto} = \left[ \frac{C_o A_o}{(1 - \beta^4)^{0.5}} (2 / \rho)^{0.5} \right]$$

Se despeja el valor de  $C_o$ .

El porcentaje de pérdida permanente de presión se calcula como:

$$\frac{P_{1D} - P_{8D}}{\Delta P_{\max}} \times 100$$

**F) Cálculo del coeficiente de descarga del medidor Vénturi.**

Se calcula el  $\Delta P_{\max}$  para cada ensayo como ( $P_{\text{antes}} - P_{\text{cuello}}$ ) mediante la fórmula:

$$\Delta P_{\max} = g \Delta Z_{\max} (\rho_{\text{mercurio}} - \rho_{\text{agua}})$$

$\Delta P$  = caída de presión, pascales.

$\Delta Z_{\max}$  = diferencia de altura máxima en metros de Hg.

$g$  = aceleración de la gravedad, 9.8 m/s<sup>2</sup>

$\rho$  = densidad, kg/m<sup>3</sup>

Los resultados anteriores se llevan a la siguiente tabla:

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q (m <sup>3</sup> /s)										
$\Delta P_{\max}$ (Pa)										

Utilizando la tabla anterior se construye en escala logarítmica la gráfica F.

El intersepto de la línea log Q vs log  $\Delta P_{\max}$  es el valor de k.

$$k = \text{intersepto} = \left[ \frac{C_v A_v}{(1 - \beta^4)^{0.5}} (2 / \rho)^{0.5} \right]$$

$A_v$  = área de flujo en el cuello del vénturi.

Se despeja el valor de  $C_v$ .

El porcentaje de pérdida permanente de presión se calcula como:

$$\frac{P_{\text{antes}} - P_{8D}}{\Delta P_{\text{max}}} \times 100$$

G) Determinación de las ecuaciones empíricas para el medidor de ranura y la vertedera.

Para cada ensayo a partir de la lectura del rotámetro se determina el flujo en litros/mi.

Se construye la siguiente tabla:

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q (lt/mi)										
H <sub>ranura</sub> (cm)										
H <sub>vertedera</sub> (cm)										

Utilizando los datos de tabla anterior se construyen el gráfico G en escala logarítmica cuyas rectas correspondientes a la calibración de cada instrumento.

La forma matemática de cada una de las rectas es:

$$Q = A H^m$$

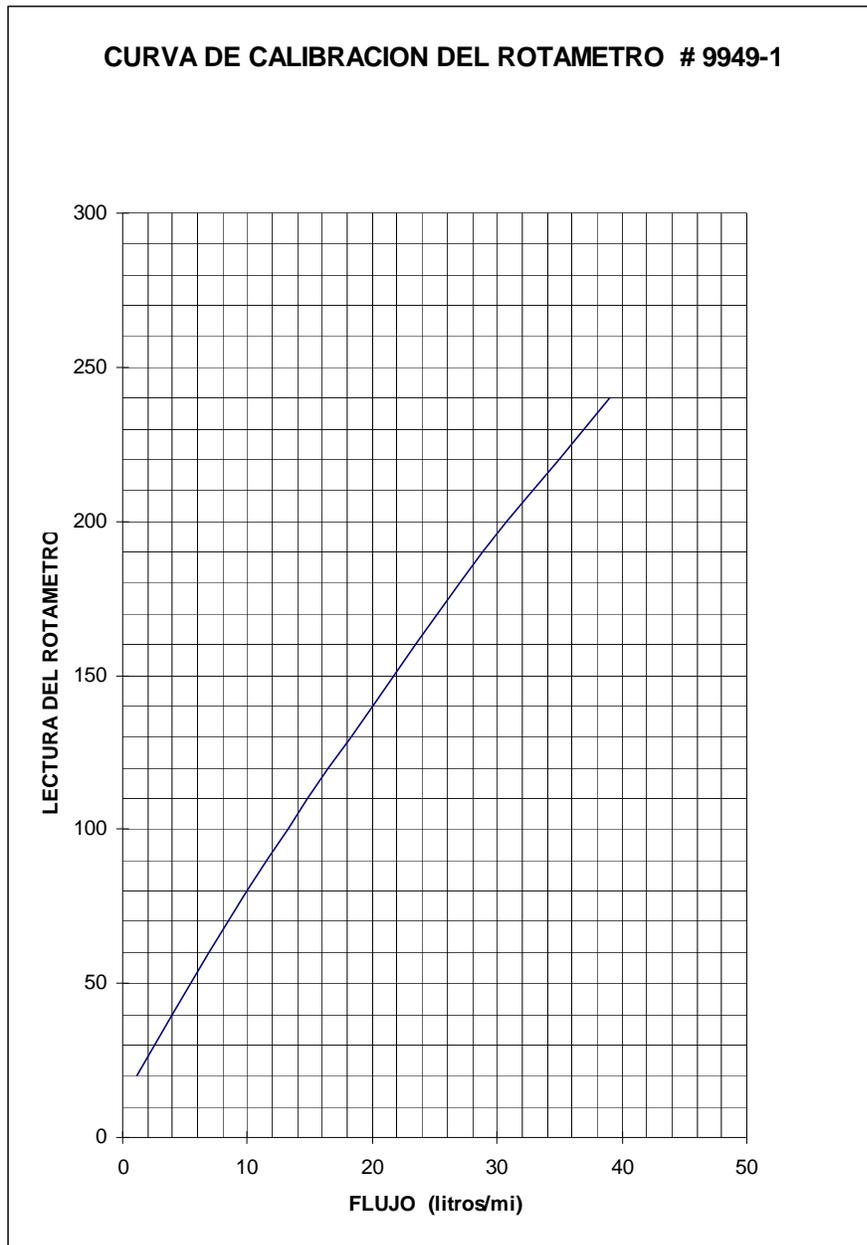
A = intersepto.  
m = pendiente.

Si la determinación de A resulta difícil, por dificultarse la prolongación de la recta, se puede, una vez conocido el valor de m, hallar el valor de A reemplazando en la ecuación los valores de H y Q para un punto tomado de la gráfica.

$$\log Q = m \log H + \log A$$

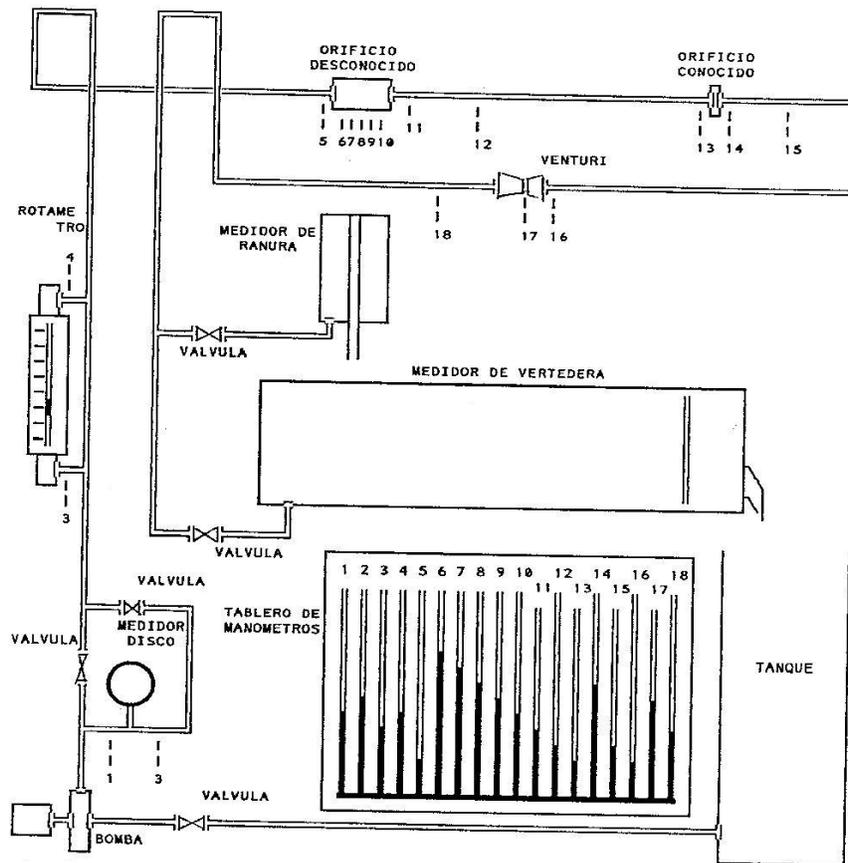
Las ecuaciones anteriores también pueden determinarse mediante una correlación matemática de los datos obtenidos.

GRAFICA A



## DIAGRAMA DE FLUJO

### CALIBRACION DE MEDIDORES DE FLUJO



## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS I

TABLA DE DATOS : PRACTICA 4

CALIBRACION DE MEDIDORES DE FLUJO

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ROTAMETRO										
CONTADOR (GPM)										
RANURA (cm)										
VERTEDERO (cm)										

		LECTURAS MANOMETRICAS ( cm Hg)									
CONTADOR	Entrada										
	Salida										
ROTAMETRO	Entrada										
	Salida										
ORIFICIO DESCONOCIDO	1D antes										
	0.125 D										
	0.25 D										
	0.5 D										
	1 D										
	1.5 D										
	2 D										
	8 D										
ORIFICIO CONOCIDO	1D antes										
	0.333 D										
	8 D										
VENTURI	ANTES										
	CUELLO										
	8 D										

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_ M \_\_\_ A \_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 5

# PERDIDAS POR FRICCION



CONJUNTO DEL EQUIPO

### OBJETIVOS:

- A) Determinar experimentalmente la pérdida de carga por fricción como una función del flujo, para cada una de las tuberías utilizadas en la práctica.

Gráfica A-1 : Curva de calibración del rotámetro No 11333.

Gráfica A-2 : Pérdida de carga total en función del número de Reynolds para cada tubería.

- B) Determinar la variación del factor de fricción con el número de Reynolds para la tubería suave de cobre utilizada en la práctica.

Gráfica B-1 : Pérdidas de carga por fricción por unidad de longitud en función del número de Reynolds.

Gráfica B-2 : Factor de fricción en función del número de Reynolds.

Establecer comparación con la curva tomada de la literatura.

- C) Determinar la equivalencia en longitud de tubería recta y la relación (L/D) para cada uno de los accesorios encontrados en las tuberías de prueba.

Gráfica C : Relación (L/D) para cada tipo de accesorio en función del número de Reynolds.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Para la tubería de prueba, abrir la válvula de salida correspondiente junto con la del manómetro de mercurio. Las demás deben permanecer completamente cerradas.
- 2) Seleccionar el rotámetro con el cual se medirá el flujo. Abrir la válvula correspondiente.
- 3) Cerrar el circuito eléctrico para poner en funcionamiento la bomba centrífuga e inmediatamente comenzar a abrir en forma lenta la válvula de control de flujo. Seleccionar el flujo máximo obtenible cuidando que el nivel del mercurio en el manómetro no sobrepase la línea límite indicada en el tablero.
- 4) Tomar diez lecturas para cada tubería con flujos diferentes y uniformemente distribuidos, iniciando con el valor más alto y disminuyendo en forma gradual. Para cada caso tomar los datos correspondientes en la tabla de datos.
- 5) Para cambiar de tubería, abrir las válvulas de la tubería que va a ensayarse y cerrar las de la tubería ensayada. Si se tiene en cuenta esta observación no es necesario apagar la bomba cuando se cambia de tubería.
- 6) Cuando se utilicen las tuberías con válvulas de compuerta y globo, éstas deben estar completamente abiertas.

- 7) Cuando se termine la práctica cerrar lentamente la válvula de control de flujo e inmediatamente interrumpir el circuito eléctrico.

**ADVERTENCIA IMPORTANTE.**

Al poner en funcionamiento el equipo o durante cada ensayo nunca deben cerrarse completamente todas las válvulas que dan salida al agua. Como mínimo debe permanecer abierta la válvula de la tubería de prueba. Si lo anterior no se tiene en cuenta, el mercurio del manómetro puede saltar de éste y la reparación debe ser asumida por el grupo en un lapso de tiempo no superior a dos horas a partir de terminada la práctica.

El hecho anterior afectará a todo el grupo en la correspondiente nota de evaluación.

**EQUIPO**

- 1) Tanque de almacenamiento de agua limpia.
- 2) Bomba centrífuga.
- 3) Rotámetro y válvula de control de flujo.
- 4) Diez tuberías de prueba con diferentes tipos de accesorios.
- 5) Manómetro de mercurio.

**CARACTERISTICAS DE LAS TUBERIAS**

TUBERIA N°	TIPO DE ACCESORIO	CANTIDAD	LONGIT UD (m)
1	codos de 45°		4.71
2	lisa sin accesorios		4.23
3	codos en U		21.6
4	codos en U		9.1
5	válvulas de globo		3.96
6	válvulas de compuerta		4.02
7	T como unión		4.03
8	T como codo		6.46
9	codos radio corto		6.47
10	codos radio largo		6.34

Diámetro de la tubería = 0.527 pulgadas

### CALCULOS

A) Para cada tubería se consultan las propiedades físicas y se consignan en una tabla como la siguiente:

**TUBERIA N°**

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t°C										
ρ (kg/m³)										
μ (kg/m s)										

Para cada tubería se determina el caudal en m³/s y dividiendo por el área de la tubería se determina la velocidad.

Una vez determinado lo anterior se calcula el número de Reynolds para cada caudal y los datos se consignan en una tabla como la siguiente:

**TUBERIA N°**

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q (m³/s)										
v (m/s)										
N <sub>Re</sub>										

La pérdida de carga total, suponiendo que la altura y la velocidad entre la entrada y la salida de la tubería no cambia, se determina así:

$$H_{total} = \Delta P / \rho$$

H<sub>total</sub> = pérdida de carga total, J/kg

$$\Delta P = g \Delta Z (\rho_{mercurio} - \rho_{agua})$$

ΔZ = diferencia de alturas en el manómetro, m.

ρ = densidad, kg/m³.

g = aceleración de la gravedad, 9.8 m/s².

Con los resultados anteriores se construye una tabla para cada tubería como la siguiente:

**TUBERIA N°**

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta P$ (Pa)										
$H_{total}$ (J/kg)										
$N_{Re}$										

Utilizando los datos de la tabla anterior se construye en escala logarítmica la gráfica A-2.

B) Para la tubería lisa o tubería sin accesorios se calculan las pérdidas por fricción por unidad de longitud así:

$$(H_{fricción} / L) = (\Delta P / \rho L)$$

Con los resultados de los cálculos anteriores se construye la siguiente tabla:

**TUBERIA N° 2 (lisa)**

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$H_f/L$ (N/kg)										
$N_{Re}$										

Utilizando los datos de la tabla anterior se construye en escala logarítmica la gráfica B-1.

Para calcular el factor de fricción de Fanning utilizamos la siguiente ecuación:

$$(H_{fricción}/L) = (4 f/D)(v^2/2)$$

Para cada uno de los diez ensayos se puede obtener un valor de "f" y la siguiente tabla puede construirse:

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f										
$N_{Re}$										

Utilizando los datos anteriores se construye en escala logarítmica la gráfica B-2.

La curva anterior debe compararse con la dada en la literatura para este tipo de tubería.

C) Para cada ensayo en las tuberías restantes, las pérdidas por accesorios se determinan así:

$$H_{\text{accesorios}} = H_{\text{total}} - (H_{\text{fricción}}/L) L_{\text{tubería}}$$

El número de diámetros a que equivale cada accesorio se determina:

$$(L/D)_{\text{accesorio}} = \frac{H_{\text{accesorio}} / n}{(H_{\text{fricción}}/L) D}$$

n = # de accesorios

D = diámetro de la tubería,m

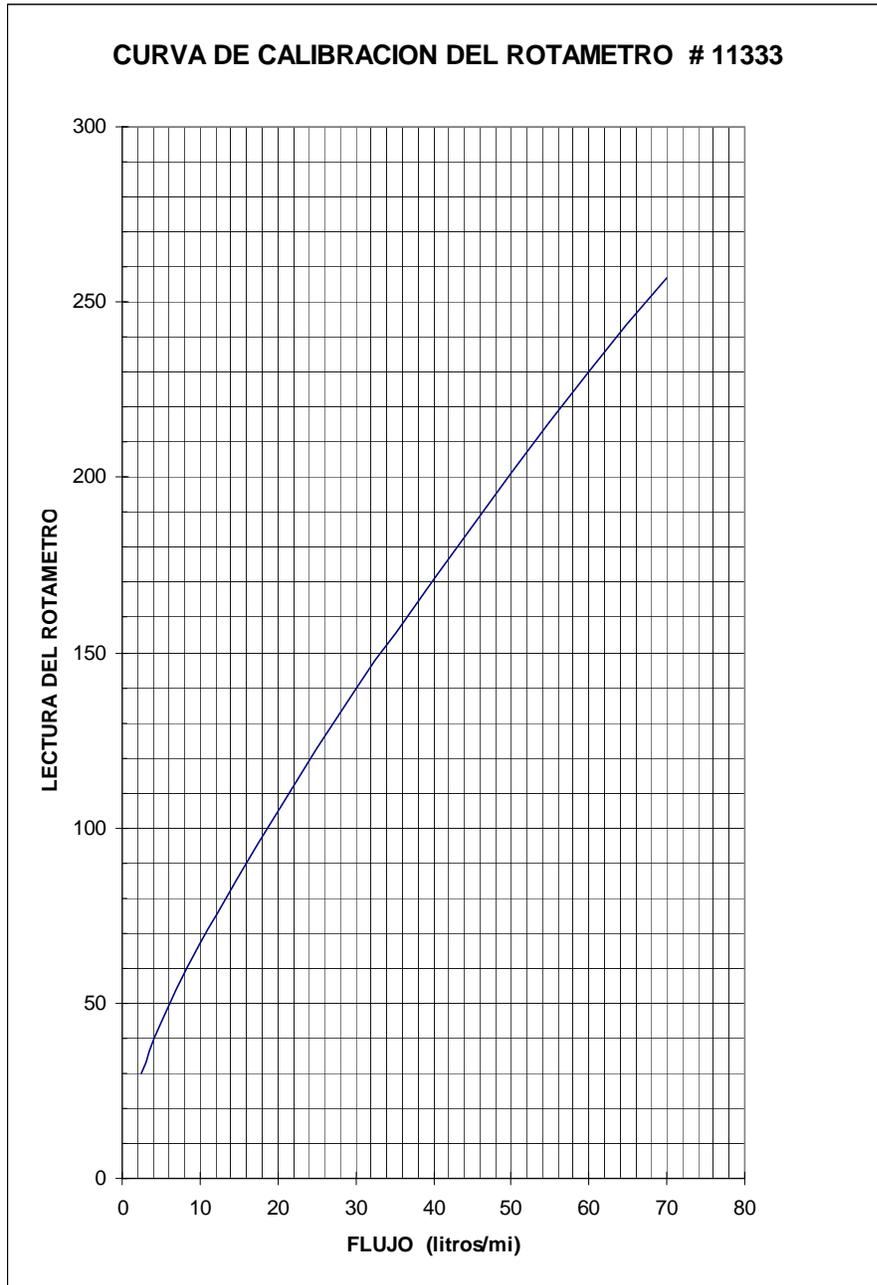
Con los resultados anteriores se construye la siguiente tabla para cada una de las tuberías:

**TUBERIA N°**

ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L/D										
N <sub>Re</sub>										

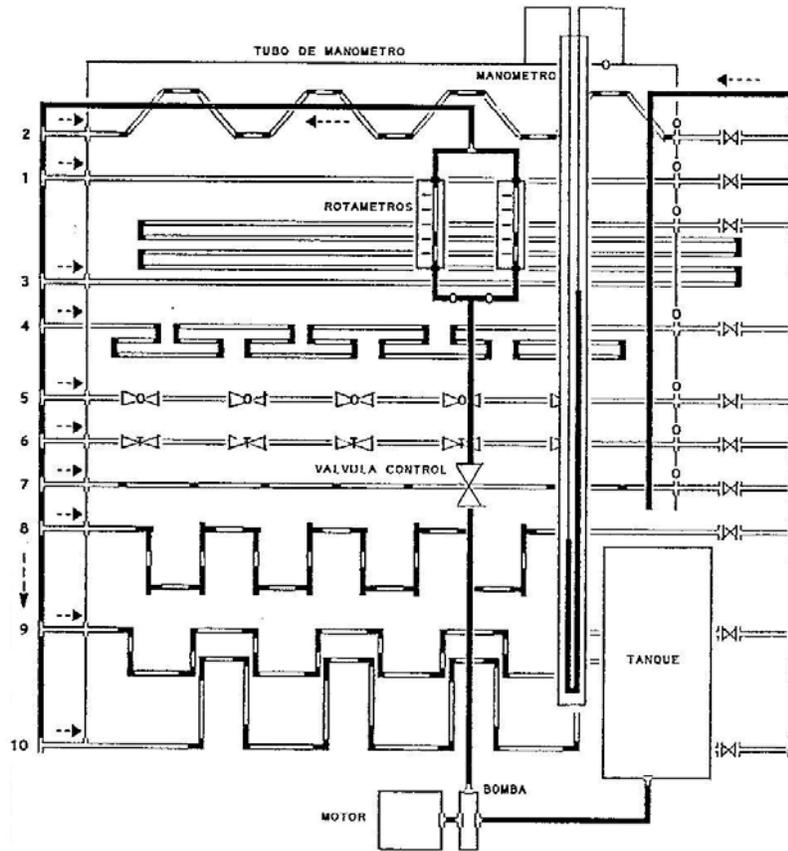
Con la tabla anterior se construye en escala decimal la gráfica C.

GRAFICA A-1



# DIAGRAMA DE FLUJO

## EQUIPO PARA PERDIDAS POR FRICCION





TUBERIA N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lect. Rotametro										
P <sub>entrada</sub> (cm Hg)										
P <sub>salida</sub> (cm Hg)										
Temperatura °C										

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 6

# FILTRACION A PRESION CONSTANTE



TANQUE DE ALIMENTACIÓN, FILTRO Y TABLERO DE MANÓMETROS

### OBJETIVOS:

- A) Determinar los valores de la resistencia de la torta y la resistencia del medio filtrante.

Gráfica A : X vs Y

- B) Determinar la resistividad de la torta y el exponente de la resistividad de la torta.

Gráfica B : Resistencia de la torta en función de la presión.

- C) Determinar la resistividad del medio y el exponente de la resistividad del medio filtrante.

Gráfica C : Resistencia del medio en función de la presión.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Preparar en la caneca correspondiente una suspensión de  $\text{CaCO}_3$  en agua. La cantidad y concentración deben consultarse con el profesor.
- 2) Colocar sobre una báscula, una caneca destinada a la recolección de filtrado.
- 3) Poner en funcionamiento el agitador para mantener homogénea la suspensión.
- 4) Cebear la bomba siguiendo las indicaciones del profesor y revisar el manómetro de mercurio realizando la purga de aire si es necesario.
- 5) Iniciar la filtración poniendo en funcionamiento la bomba hasta alcanzar la presión de trabajo deseada, la cual debe mantenerse constante durante todo el ensayo. En éste momento deben anotarse la masa  $V_f$  y el tiempo  $\theta_f$ . Al poner en funcionamiento la bomba debe ponerse a funcionar un cronómetro.
- 6) Se prosigue la operación anotando el tiempo cada vez que el filtrado aumente en 5 kilogramos hasta completar los datos para el ensayo correspondiente.
- 7) Suspender el ensayo apagando la bomba y cerrando la válvula de salida del tanque de alimentación.
- 8) Proceder en seguida a lavar el filtro y las lonas lo mejor posible antes de comenzar el segundo ensayo.
- 9) Repetir el procedimiento anterior para cada ensayo, variando la caída de presión a través del filtro.

- 10) Finalizada la práctica, el filtro debe quedar abierto y limpio al igual que el resto del equipo utilizado.

### EQUIPO

- 1) Filtro prensa de cámaras con un juego de platos.
- 2) Bomba centrífuga.
- 3) Manómetro, termómetro, cronómetro, tuberías y accesorios.
- 4) Agitador.
- 5) Báscula.
- 6) Dos canecas, una para preparar la suspensión y la otra para recolectar el filtrado.
- 7) Medio filtrante.

### CALCULOS

Los datos de la práctica deben ser analizados mediante la ecuación de Lewis integrada para presión constante:

$$\frac{P A (\theta - \theta_r)}{V - V_r} = \frac{r v}{a} P^s \frac{\mu a (V + V_r + 2 V_c)}{2A} + \mu \rho' P^m$$

donde:

P = diferencia de presión a través del medio filtrante y la torta (a través del filtro), lb<sub>f</sub>/pulg<sup>2</sup>.

θ = tiempo total de filtración, minutos.

θ<sub>r</sub> = tiempo de filtración antes de alcanzar la presión deseada, minutos.

A = área del medio filtrante, pulg<sup>2</sup>.

$V$  = peso total de filtrado recolectado, lb.

$r$  = resistividad de la torta.

$v$  = volumen de la torta, pulg<sup>3</sup> / lb de filtrado.

$a$  = concentración de la suspensión, lb de sólido/100 lb de filtrado.

$s$  = exponente de la resistividad de la torta.

$\mu$  = viscosidad del filtrado, centipoises.

$V_c$  = peso de filtrado atrapado en la línea de filtrado, lb.

$\rho'$  = resistividad del medio filtrante.

$m$  = exponente de la resistividad del medio filtrante.

$$\frac{r v}{a} P^s = R_T = \text{resistencia de la torta.}$$

$$\rho' P^m = R_M = \text{resistencia del medio filtrante.}$$

$V_r$  = peso de filtrado recolectado durante  $\theta_r$ , lb.

Referencia : Walker, Lewis, McAdams, and Gilliland, " Principles of Chemical Engineering " Mc Graw-Hill Book Company, New York, 3rd de., 1937.

### **A) Determinación de los valores de la resistencia de la torta y la resistencia del medio filtrante.**

En el desarrollo de los cálculos todas las variables deben manejarse en las unidades indicadas anteriormente.

La siguiente muestra se realiza para un ensayo. En la práctica deben realizarse al menos cuatro ensayos con un número mínimo de 10 lecturas.

Se calcula el área de filtración y el resultado se expresa en pulgadas cuadradas.

Se calcula la diferencia de presiones (P) a través del filtro mediante la ecuación:

$$P = g Z (\rho_{\text{mercurio}} - \rho_{\text{agua}})$$

El resultado anterior se expresa en lb<sub>f</sub>/pulg<sup>2</sup> (psi).

Se determina el valor de  $\theta_r$  en minutos y el valor  $V_r$  en lb.  
 Para calcular el peso de filtrado atrapado en la tubería  $V_c$  debe medirse la longitud de la tubería desde la salida del filtro hasta la descarga en la caneca (L), el diámetro interno del tubo y la densidad del agua a la temperatura del experimento.

$$V_c = A L \rho$$

El resultado se expresa en lb.

Tomando como únicas variables  $\theta$  y  $V$ , para cada una de las lecturas de un ensayo se calculan:

$$Y = \frac{P A (\theta - \theta_r)}{V - V_r} \quad X = \frac{(V + V_r + 2 V_c)}{A}$$

El resultado de los cálculos anteriores se lleva a una tabla como la siguiente:

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ENSAYO 1	Y										
	X										
ENSAYO 2	Y										
	X										
ENSAYO 3	Y										
	X										
ENSAYO 4	Y										
	X										

Utilizando los datos de la tabla se traza en escala decimal una recta para cada ensayo en la gráfica A.

A partir de la ecuación general:

$$\frac{P A (\theta - \theta_r)}{V - V_r} = \frac{r v}{a} P^s - \frac{\mu a (V + V_r + 2 V_c)}{2A} + \mu \rho' P^m$$

$$R_T = \frac{r v}{a} P^s \quad \text{y} \quad R_M = \rho' P^m$$

$$\frac{P A (\theta - \theta_r)}{V - V_r} = R_T - \frac{\mu a (V + V_r + 2 V_c)}{2A} + \mu R_M$$

Comparando la ecuación anterior con la ecuación de una línea recta:

$$Y = m X + B$$

$m =$  pendiente       $B =$  interfecto

$$Y = R_T - \frac{\mu a}{2} X + \mu R_m$$

$m =$  pendiente  $= (\mu a/2) R_T$        $B =$  interfecto  $= \mu R_m$

A partir de las ecuaciones anteriores se calculan la resistencia de la torta y la resistencia del medio filtrante.

**B) Cálculo de la resistividad y el exponente de la resistividad de la torta.**

Con los datos obtenidos para cada uno de los ensayos de  $R_T$  y  $P$  se construye la siguiente tabla:

	ENSAYO1	ENSAYO2	ENSAYO3	ENSAYO4
$R_T$				
$P$ (psi)				

Utilizando los datos anteriores se traza la gráfica B es escala logarítmica.

Como:

$$R_T = (r v / a) P^s$$

$$\log R_T = \log (r v / a) + s \log P$$

$$\text{Intersecto} = \log (r v / a) \quad ; \quad \text{Pendiente} = s$$

Con los resultados anteriores se calcula la resistividad de la torta ( $r$ ) y el exponente de la resistividad de la torta ( $s$ ).

**C) Cálculo de la resistividad y el exponente de la resistividad del medio filtrante.**

Con los datos obtenidos para cada uno de los ensayos de  $R_M$  y  $P$  se construye la siguiente tabla:

	ENSAYO1	ENSAYO2	ENSAYO3	ENSAYO4
$R_M$				
$P$ (psi)				

Utilizando los datos anteriores se traza la gráfica C en escala logarítmica.

Como:

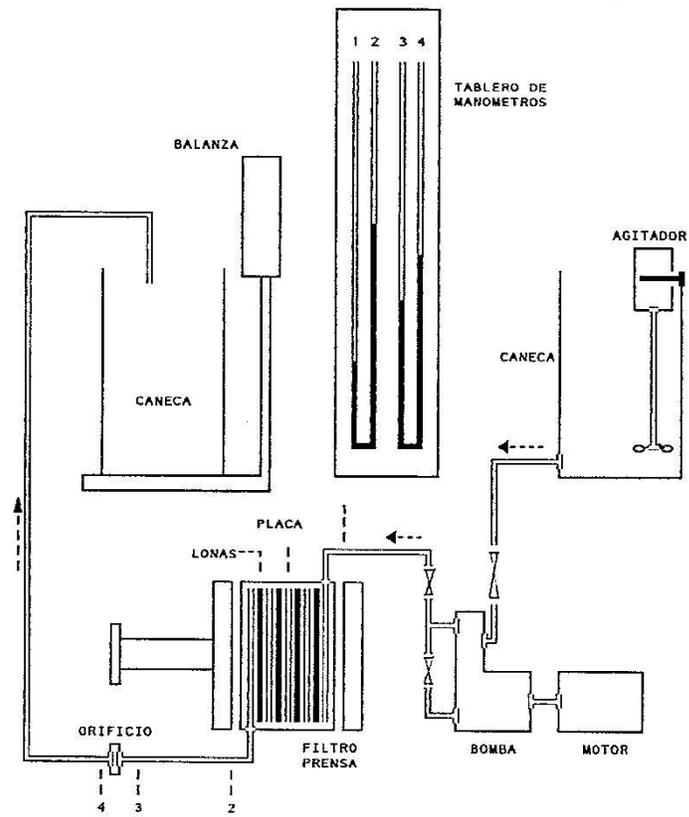
$$R_M = \rho' P^m$$

$$\log R_M = \log \rho' + m \log P$$

$$\text{Pendiente} = m \quad ; \quad \text{Intersecto} = \rho'$$

Con los resultados anteriores se calcula la resistividad del medio filtrante ( $\rho'$ ) y el exponente de la resistividad del medio ( $m$ ).

## DIAGRAMA DE FLUJO EQUIPO DE FILTRACION



## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS I

TABLA DE DATOS : PRACTICA 6 - FILTRACION A PRESION CONSTANTE

		ENSAYO 1						ENSAYO 2			
		I (cm Hg)		D (cmHg)				I (cm Hg)		D (cmHg)	
		FILTRADO (kg)		TIEMPO (mi)				FILTRADO (kg)		TIEMPO (mi)	
1	$V_r =$			$\theta_r =$		1	$V_r =$			$\theta_r =$	
2						2					
3						3					
4						4					
5						5					
6						6					
7						7					
8						8					
9						9					
10						10					
		ENSAYO 3						ENSAYO 4			
		I (cm Hg)		D (cmHg)				I (cm Hg)		D (cmHg)	
		FILTRADO (kg)		TIEMPO (mi)				FILTRADO (kg)		TIEMPO (mi)	
1	$V_r =$			$\theta_r =$		1	$V_r =$			$\theta_r =$	
2						2					
3						3					
4						4					
5						5					
6						6					
7						7					
8						8					
9						9					
10						10					
L		cm	D		cm	CaCO <sub>3</sub>		kg	T <sub>filtrado</sub>		oC

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_ M \_\_\_ A \_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 7

# FILTRACION A FLUJO CONSTANTE



EQUIPO TANQUE, FILTRO Y TABLERO DE MANÓMETROS.

## OBJETIVOS

A) Determinar la resistencia del medio filtrante.

Gráfica A : Caída de presión a través del filtro en función del peso de filtrado recolectado.

B) Determinar la resistividad del medio filtrante y del exponente de dicha resistividad.

Gráfica B : Resistencia del medio filtrante en función de la presión extrapolada.

- C) Determinar la resistencia de la torta y el exponente de la resistencia de la torta.

Gráfica C : Resistencia de la torta en función de la presión.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Preparar en la caneca correspondiente una suspensión de  $\text{CaCO}_3$  en agua. La cantidad y concentración deben consultarse con el profesor.
- 2) Colocar sobre una báscula, una caneca destinada a la recolección de filtrado.
- 3) Poner en funcionamiento el agitador para mantener homogénea la suspensión.
- 4) Cebear la bomba siguiendo las indicaciones del profesor y revisar el manómetro de mercurio realizando la purga de aire si es necesario.
- 5) Iniciar la filtración poniendo en funcionamiento la bomba hasta obtener el flujo deseado y manteniendo constante éste durante todo el ensayo. El flujo puede mantenerse constante mediante un manómetro conectado a un orificio situado en la tubería de descarga del filtrado.  
Al poner en funcionamiento la bomba debe ponerse a funcionar un cronómetro.
- 6) Una vez alcanzada la estabilización del equipo, se anota el tiempo transcurrido, el filtrado recolectado en ese tiempo y la presión a través del filtro indicada en el manómetro correspondiente.
- 7) Se prosigue la operación anterior tomando lecturas de tiempo y de presión a través del filtro cada vez que el filtrado aumente en cinco kilogramos.
- 8) Suspender el ensayo apagando la bomba y cerrando la válvula de salida del tanque de alimentación.
- 9) Proceder enseguida a lavar el filtro y las lonas lo mejor posible antes de comenzar el segundo ensayo.

- 10) Repetir el procedimiento anterior para cada ensayo, variando el flujo de filtrado en cada uno.
- 11) Finalizada la práctica, el filtro debe quedar abierto y limpio al igual que el resto del equipo utilizado.

## EQUIPO

- 1) Filtro prensa de cámaras con un juego de platos, de los cuales el primero y el último tienen sólo una cara útil.
- 2) Bomba centrífuga.
- 3) Manómetro, termómetro, cronómetro, tuberías y accesorios.
- 4) Agitador.
- 5) Báscula.
- 6) Dos canecas, una para preparar la suspensión y la otra para recolectar el filtrado.
- 7) Medio filtrante.

## CALCULOS

Los datos de la práctica deben ser analizados mediante la ecuación de Lewis:

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{P A^2}{\mu [ r v P^s ( V + V_c ) + \rho' A P^m ]}$$

donde:

$(dV/d\theta)$  = flujo de filtrado, lb/mi

$P$  = diferencia de presión a través del medio filtrante y la torta (a través del filtro),  $\text{lb}_f/\text{pulg}^2$ .

$A$  = área del medio filtrante,  $\text{pulg}^2$ .

$\mu$  = viscosidad del filtrado, centipoises.

$r$  = resistividad de la torta.

$v$  = volumen de la torta,  $\text{pulg}^3/\text{lb}$  filtrado.

$s$  = exponente de la resistividad de la torta.

$(V + V_c)$  = peso de filtrado recolectado más peso de filtrado atrapado en la línea de filtrado,  $\text{lb}$ .

$\rho'$  = resistividad del medio filtrante.

$m$  = exponente de la resistividad del medio filtrante.

$P_e$  = presión extrapolada o valor de  $P$  para  $(V + V_c) = 0$

$a$  = concentración de la suspensión,  $\text{lb sólido}/100 \text{ lb de filtrado}$ .

$\theta$  = tiempo.

$\frac{rv}{a} P^s$  = resistencia de la torta.

$\rho' (P_e)^m$  = resistencia del medio filtrante.

Referencia : Walker, Lewis, McAdams, and Gilliland, " Principles of Chemical Engineering " Mc Graw-Hill Book Company, New York, 3rd de., 1937.

### **A) Cálculo de la resistencia del medio filtrante.**

En el desarrollo de los cálculos todas las variables deben manejarse en las unidades indicadas anteriormente.

Para cada una de las presiones leídas a través del filtro se realiza el siguiente cálculo:

$$P = g Z (\rho_{\text{mercurio}} - \rho_{\text{agua}})$$

Para calcular el peso de filtrado atrapado en la tubería  $V_c$  debe medirse la longitud de la tubería desde la salida del filtro hasta la descarga en la caneca (L), el diámetro interno del tubo y la densidad del agua a la temperatura del experimento.

$$V_c = A L \rho$$

El resultado se expresa en lb.

Se calcula ahora para cada lectura ( $V + V_c$ ) y se construye la siguiente tabla:

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ENSAYO 1	P									
	V + V <sub>c</sub>									
ENSAYO 2	P									
	V + V <sub>c</sub>									
ENSAYO 3	P									
	V + V <sub>c</sub>									
ENSAYO 4	P									
	V + V <sub>c</sub>									

Utilizando los datos de la tabla anterior se se trazan cuatro curvas en escala decimal, gráfica A.

Extrapolando cada una de las curvas hasta un valor de  $(V + V_c) = 0$ , en la ecuación general se tiene:

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{P A^2}{\mu \rho' A P^m}$$

donde:  $R_m = \text{resistencia del medio} = \rho' (Pe)^m$

Pe = presión extrapolada

De la ecuación anterior:

$$R_m = \frac{Pe A}{\mu (dV/d\theta)}$$

El valor de  $(dV/d\theta)$  en cada ensayo debe ser constante, pero en caso de que se presentes pequeñas variaciones debe tomarse un promedio aritmético.

**B) Cálculo de resistividad y el exponente de dicha resistividad para el medio filtrante.**

Con los cálculos efectuados en el literal anterior se construye la siguiente tabla:

	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	ENSAYO 4
$R_M$				
Pe (psi)				

Con los datos de la tabla anterior se construye en escala logarítmica la gráfica B.

$$R_m = \rho' (Pe)^m$$

$$\log R_m = \log (\rho') + m \log (Pe)$$

$$\text{Pendiente} = m \quad ; \quad \text{Intersecto} = \log (\rho')$$

**C) Cálculo de la resistencia de la torta y el exponente de la resistividad de la torta.**

De la ecuación general:

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{P A^2}{\mu [r_v P^s (V + V_c) + \rho' A P^m]}$$

$$R_T = \frac{r v P^s}{a}$$

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{P A^2}{\mu [ a R_T (V + V_c) + \rho' A P^m ]}$$

Despejando  $R_T$  :

$$R_T = \frac{A}{a(V + V_c)} \left[ -\frac{P A}{\mu (dV/d\theta)} - \rho' P^m \right]$$

Para cada ensayo se calculan los valores de la resistencia de la torta y junto con los valores de caída de presión se construye una tabla como la siguiente:

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>ENSAYO 1</b>	<b><math>R_T</math></b>									
	<b>P</b>									
<b>ENSAYO 2</b>	<b><math>R_T</math></b>									
	<b>P</b>									
<b>ENSAYO 3</b>	<b><math>R_T</math></b>									
	<b>P</b>									
<b>ENSAYO 4</b>	<b><math>R_T</math></b>									
	<b>P</b>									

Los valores obtenidos para cada ensayo de la tabla anterior se llevan a la gráfica C. Lo anterior debe dar una "lluvia" de puntos con tendencia lineal. Se ajusta en consecuencia una línea recta.

Como:

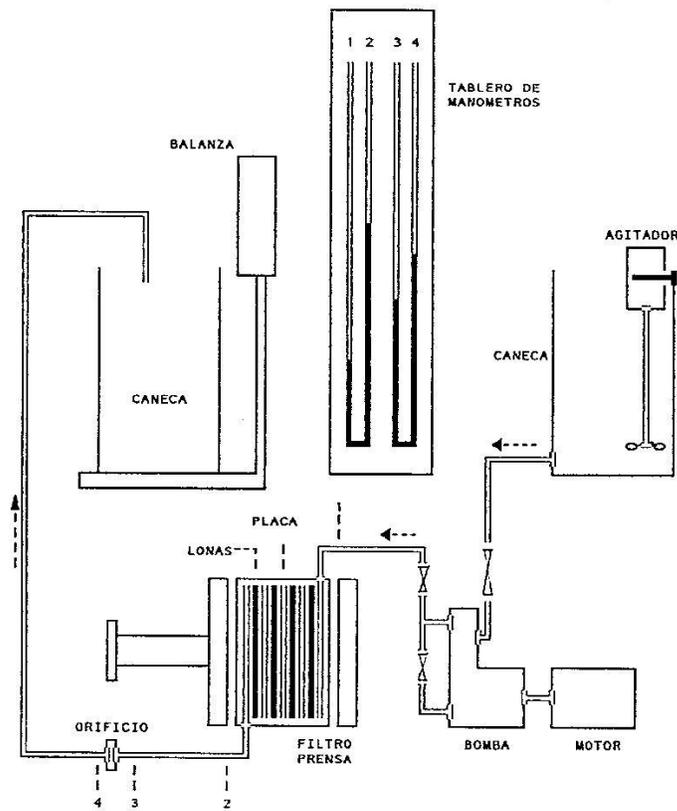
$$R_T = \frac{r v P^s}{a}$$

$$\log R_T = \log ( r v / a ) + s \log P$$

$$\text{Pendiente} = s \quad ; \quad \text{Intersecto} = \log ( r v / a )$$

Con los resultados anteriores se calcula el exponente de la resistividad de la torta ( $s$ ) y la resistividad de la torta ( $r$ ).

DIAGRAMA DE FLUJO - EQUIPO DE FILTRACIÓN



## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS I

TABLA DE DATOS : PRACTICA 7 - FILTRACION A FLUJO CONSTANTE

ENSAYO 1					ENSAYO 2				
FILTRADO		TIEMPO	cm Hg		FILTRADO		TIEMPO	cm Hg	
kg	mi	I	D	kg	mi	I	D		
1					1				
2					2				
3					3				
4					4				
5					5				
6					6				
7					7				
8					8				
9					9				
10					10				

ENSAYO 3					ENSAYO 4				
FILTRADO		TIEMPO	cm Hg		FILTRADO		TIEMPO	cm Hg	
kg	mi	I	D	kg	mi	I	D		
1					1				
2					2				
3					3				
4					4				
5					5				
6					6				
7					7				
8					8				
9					9				
10					10				

L	cm	D	cm	CaCO <sub>3</sub>	kg	T <sub>filtrado</sub>	oC
---	----	---	----	-------------------	----	-----------------------	----

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_ M \_\_\_ A \_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 8

# MOLIENDA Y TAMIZADO



MOLINO DE MANDÍBULAS

### OBJETIVOS

A) Calcular la potencia media experimental.

Gráfica A : Potencia consumida en función del tiempo.

B) Realizar el análisis granulométrico diferencial y acumulativo para el alimento y el producto.

Gráfica B-1 : Análisis acumulativo del alimento.  
Gráfica B-2 : Análisis diferencial del alimento.  
Gráfica B-3 : Análisis acumulativo del producto.  
Gráfica B-4 : Análisis diferencial del producto.

C) Calcular el diámetro medio superficie-volumen y el diámetro medio aritmético para el alimento y el producto.

Gráfica C : Análisis diferencial para finos.

D) Calcular la relación de potencias consumidas en los dos ensayos según las leyes de Rittinger y Bond.

E) Calcular la relación de potencias experimentales.

F) Calcular el índice de trabajo para el material utilizado.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Tomar dos muestras del material seleccionado para la práctica, una de tres (3) kilogramos y la otra de dos (2) kilogramos y analizarlas por tamizado.
- 2) Ajustar las mandíbulas del triturador, poner en marcha el motor y leer la potencia al vacío indicada por el vatímetro.
- 3) Tomar la muestra de 3 kilogramos analizada en el numeral A y alimentar a una velocidad uniforme y suficiente para mantener llenas las mandíbulas del triturador. Durante el ensayo leer el vatímetro tan rápido como sea posible y a intervalos de tiempo pequeños y definidos. Anotar el tiempo total de trituración de la muestra.
- 4) Recolectar el producto triturado y tamizarlo.
- 5) Repetir el procedimiento tomando la muestra de 2 kilogramos y variando la abertura de las mandíbulas.

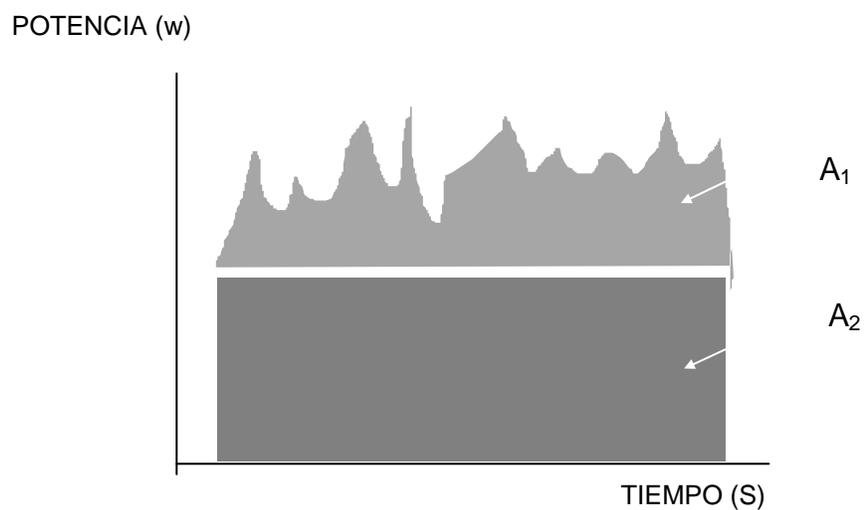
## EQUIPO

- 1) Triturador de mandíbulas.
- 2) Agitador de tamices.
- 3) Un vatímetro trifásico.
- 4) Balanza, cronómetro y elementos auxiliares.
- 5) Juego de tamices para analizar el alimento y el producto.

ALIMENTO									
PRODUCTO									

## CALCULOS

- A) Con los datos de potencia dados por el vatímetro se construye la gráfica A. En la gráfica se indica el valor medido de la potencia en vacío.



$$\text{Potencia media} = \frac{\text{Area total}}{\text{Tiempo total}} = \frac{A}{\theta}$$

$$\text{Area total} = A_1 + A_2$$

$$A_2 = \text{Potencia en vacío} \times \theta$$

$$\text{Potencia media} = (A_1/\theta) + \text{Potencia en vacío}$$

El cálculo anterior puede realizarse de manera gráfica o numérica.

### B) Análisis granulométrico diferencial y acumulativo para el alimento y el producto.

#### ANALISIS DIFERENCIAL.

El análisis diferencial se efectúa hallando las fracciones másicas retenidas por cada malla. Cada fracción se denomina  $\Delta\phi$ .

$$\Delta\phi_n = \frac{\text{masa retenida sobre el tamiz } n}{\text{masa total de la muestra analizada}}$$

La siguiente tabla muestra este tipo de análisis.

MALLA	$\Delta\phi_n$	$D_{pn}$
4/6		
6/8		
8/10		
Plato		

La nomenclatura 4/6 significa que el material pasó la malla 4 y fue retenido por la malla 6.

$D_{pn}$  es el diámetro de la partícula, el cual se toma igual a la abertura de la malla n. La malla n-1 es la colocada encima de la malla n.

**ANALISIS ACUMULATIVO.**

El análisis acumulativo se elabora a partir del análisis diferencial sumando acumulativamente los incrementos individuales comenzando con el retenido sobre la malla más grande. Se tabulan las sumas contra la dimensión de la malla que retuvo la última fracción sumada.

Si  $\phi$  se define como:

$$\phi = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \Delta\phi_3 + \dots + \Delta\phi_{nt} = \sum \Delta\phi_n$$

$\phi$  es la fracción másica de la muestra cuyas partículas son mayores que  $D_p$ . Para la muestra total el valor de  $\phi$  es la unidad.

$D_p$  es el tamaño de la malla n.

La siguiente tabla muestra éste tipo de análisis.

MALLA	$\Delta\phi_n$	$D_{pn}$
4		
6		
8		
10		
Plato		1.0

Una vez elaboradas las tablas anteriores para las dos muestras se construyen en escala decimal las gráficas B-1, B-2, B-3 y B-4.

**C) Cálculo del diámetro medio superficie-volumen y del diámetro medio aritmético para el alimento y el producto.**

El diámetro medio superficie-volumen está definido por la ecuación:

$$\bar{D}_{vs} = \frac{6\lambda}{A_w \rho_p}$$

$$A_w = \frac{6\lambda}{\rho_p} \sum (\Delta\phi_n / D_n) \quad \text{para los gruesos}$$

$$A_w = \frac{6 B \lambda}{\rho_p k} (D_{p1}^k - D_{p2}^k) \quad \text{para los finos}$$

$D_n$  es el promedio aritmético entre  $D_{pn}$  y  $D_{p(n-1)}$ .

En esta forma se tendrá que para el alimento, compuesto casi totalmente por partículas grandes, el diámetro medio superficie-volumen se puede expresar así:

$$\bar{D}_{vs} = \frac{6\lambda}{A_w \rho_p} = \frac{6\lambda}{\frac{6\lambda}{\rho_p} \sum (\Delta\phi_n / D_n)}$$

$$\bar{D}_{vs} = \frac{1}{\sum (\Delta\phi_n / D_n)}$$

Para el producto, donde las partículas finas juegan papel importante, el diámetro medio superficie-volumen se calcula teniendo en cuenta la expresión  $A_w$  para los finos:

$$\bar{D}_{vs} = \frac{6\lambda}{\rho_p (A_{w(\text{gruesos})} + A_{w(\text{finos})})} = \frac{1}{\sum (\Delta\phi_n / D_n) + (B/k) (D_{p1}^k - D_{p2}^k)}$$

Para encontrar los valores de B y k para los finos se utiliza la ecuación:

$$\Delta\phi_n = B' D_{pn}^{k+1}$$

$$\log \Delta\phi_n = (k+1) \log D_{pn} + \log B'$$

Si se tabulan los valores de  $\Delta\phi_n$  y  $D_{pn}$  y luego se grafican en escala logarítmica (gráfica C), la pendiente de la línea es (k+1). Conocido el valor de (k+1) se leen las coordenadas de cualquier punto sobre la línea y se calcula el valor de B'.

Una vez conocido B' se calcula B a partir de la ecuación:

$$B' = \frac{B (r^{(k+1)} - 1)}{k+1}$$

donde r es la relación constante entre  $D_{p(n-1)}$  y  $D_{pn}$  para la serie de tamices utilizada.

$$r = D_{p(n-1)} / D_{pn}$$

En la expresión  $A_w$  para los finos  $D_{p1}$  es el diámetro de la partícula más grande de los finos y  $D_{p2}$  el de la más pequeña de las que cayeron al plato.

En este caso, se pueden considerar como las más grandes aquellas que pasan la malla 30.

Para calcular  $D_{p2}$  se utiliza el siguiente método:

Siendo  $\Delta\phi_p$  la fracción del material que cayó al plato y  $D_{p1}$  el diámetro de la última de las mallas (en este caso la malla 100), se tendrá:

$$\Delta\phi_p = \frac{B}{k+1} (D_{p1}^{(k+1)} - D_{p2}^{(k+1)})$$

De la ecuación anterior se despeja  $D_{p2}$  para utilizarlo en el cálculo

de  $D_{vs}$ .

El diámetro medio aritmético se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{D}_N = \frac{\int_0^{N_w} D_p \, dN}{N_w}$$

Sabiendo que:

$$N = m / (a \rho_p D_p^3)$$

se puede encontrar el  $dN$  :

$$dN = dm / (a \rho_p D_p^3) = d\phi / (a \rho_p D_p^3)$$

con lo cual la expresión del diámetro medio se transformará en:

$$\bar{D}_N = \frac{\int_0^1 D_p \frac{d\phi}{a \rho_p D_p^3}}{N_w}$$

Expresando la integral como sumatoria y reemplazando a  $N_w$  por su valor:

$$\bar{D}_N = \frac{(1 / a \rho_p) \sum (\Delta\phi/D_p^2)}{(1 / a \rho_p) \sum (\Delta\phi/D_p^3)} = \frac{\sum (\Delta\phi/D_p^2)}{\sum (\Delta\phi/D_p^3)}$$

Esta expresión puede ser usada para el alimento.

Para el producto deben tenerse en cuenta los finos.

Para los finos se tiene:

$$-\frac{d\phi}{dD_p} = B D_p^k$$

Así, la integral que aparece en el numerador de  $D_N$  se convertirá en:

$$\frac{1}{a\rho_p} \int_0^1 \frac{d\phi}{D_p^2} = - \frac{B}{a\rho_p} \int_{D_{p1}}^{D_{p2}} \frac{dD_p}{D_p^{2-k}} = \frac{B}{a\rho_p (1-k)} [ (1/D_{p2}^{1-k}) - (1/D_{p1}^{1-k}) ]$$

En síntesis, el diámetro medio aritmético para el producto, constituido por mezcla de finos y gruesos, se expresará de la siguiente manera:

$$\bar{D}_N = \frac{\sum (\Delta\phi/D_p^2) + [B/(1-k)] [(1/D_{p2}^{1-k}) - (1/D_{p1}^{1-k})]}{\sum (\Delta\phi/D_p^3) + [B/(2-k)] [(1/D_{p2}^{2-k}) - (1/D_{p1}^{2-k})]}$$

Para este informe se consideran partículas finas las que pasan la malla 30.

D) Cálculo de la relación de potencias por las leyes de Rittinger y Bond.

Ley de Rittinger para el primer ensayo:

$$\frac{P_1}{T_1} = K_f \left[ \frac{1}{D_{vsb}} - \frac{1}{D_{vsa}} \right]$$

P = potencia en HP

T = alimentación en Ton/mi

$D_{vsa}$  = diámetro medio superficie-volumen del alimento

$D_{vsb}$  = diámetro medio superficie-volumen del producto

Ley de Rittinger para el segundo ensayo:

$$\frac{P_2}{T_2} = K_f \left[ \frac{1}{D_{vsb}} - \frac{1}{D_{vsa}} \right]$$

Relación de potencias:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1 \left[ \frac{1}{D_{vsb}} - \frac{1}{D_{vsa}} \right]_{\text{ensayo 1}}}{T_2 \left[ \frac{1}{D_{vsb}} - \frac{1}{D_{vsa}} \right]_{\text{ensayo 2}}}$$

Ley de Bond para el primer ensayo:

$$\frac{P_1}{T_1} = 1.46 W_i \left[ \frac{1}{(D_{pb})^{0.5}} - \frac{1}{(D_{pa})^{0.5}} \right]$$

Si el 80% del alimento pasa una malla de diámetro  $D_{pa}$  y el 80% del producto pasa una malla de diámetro  $D_{pb}$ .

Ley de Bond para el segundo ensayo:

$$\frac{P_2}{T_2} = 1.46 W_i \left[ \frac{1}{(D_{pb})^{0.5}} - \frac{1}{(D_{pa})^{0.5}} \right]$$

Relación de potencias:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1 \left[ \frac{1}{(D_{pb})^{0.5}} - \frac{1}{(D_{pa})^{0.5}} \right]_{\text{ensayo 1}}}{T_2 \left[ \frac{1}{(D_{pb})^{0.5}} - \frac{1}{(D_{pa})^{0.5}} \right]_{\text{ensayo 2}}}$$

E) Con los datos obtenidos en el literal A se calcula la relación de potencias experimentales y se compara con el cálculo anterior.

F) Cálculo del índice de trabajo.

A partir de las potencias halladas experimentalmente y utilizando la expresión de la ley de Bond, para cada ensayo se puede calcular un índice de trabajo  $W_i$ .



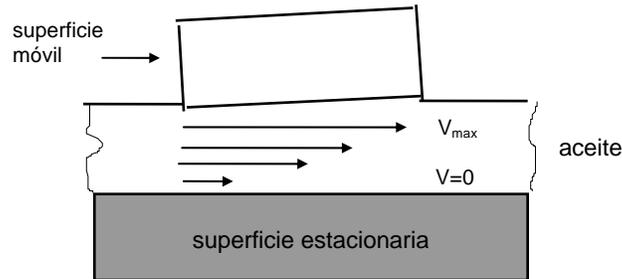
## PRACTICA 9

# VISCOSIDAD SAYBOLT



## FUNDAMENTO TEORICO

Cuando dos superficies deslizantes están separadas por una película lubricante de aceite, este fluye en condiciones tales que el flujo es laminar. Puede suponerse que la película está compuesta por capas extremadamente finas, moviéndose cada una en la misma dirección, pero a velocidad diferente.



Bajo estas condiciones, la capa en contacto con el cuerpo fijo está como si no tuviera movimiento. De forma similar, la capa adyacente al cuerpo en movimiento, viaja a la velocidad del cuerpo en movimiento. Las capas intermedias se mueven a velocidades proporcionales a su distancia al cuerpo en movimiento, la capa intermedia de la película en movimiento, a la mitad de la velocidad del cuerpo en movimiento, la cual puede considerarse aproximadamente la velocidad promedio de la película.

Como las capas viajan a diferentes velocidades, cada lámina debe deslizarse encima de la otra y para hacerlo se requiere cierta fuerza o fuerza de corte. La resistencia de esta fuerza es conocida como tensión de cizallamiento y el efecto acumulativo de ella, es la fricción fluida.

Existen además dos factores que afectan la fricción fluida, uno es la velocidad relativa de las superficies deslizantes y otro es su área efectiva.

La resistencia o frotamiento interno entre las capas moleculares del fluido al deslizarse entre sí es lo que llamamos **viscosidad**.

Según la teoría Newtoniana si:

$F$  = fuerza de corte

$A$  = área

$v$  = velocidad de la película de aceite

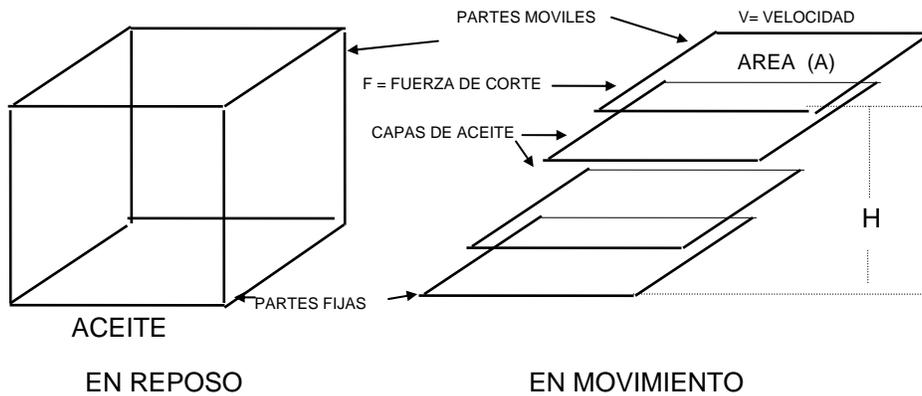
$H$  = espesor de la película de aceite

$(F/A)$  = fuerza de corte unitaria

$(v/H)$  = gradiente de velocidad

$$(F/A) \propto (v/H) \quad (F/A) = \mu (v/H)$$

donde el coeficiente de proporcionalidad  $\mu$  es la viscosidad absoluta del fluido a una determinada temperatura.



$$\text{VISCOSIDAD ABSOLUTA} = \frac{\text{Fuerza de corte unitaria}}{\text{Gradiente de velocidad}}$$

Utilizando el sistema métrico absoluto de unidades se tendrá:

$$\mu (\text{absoluta}) = \frac{\text{dina/cm}^2}{(\text{cm/s})/\text{cm}} = \frac{(\text{dina}) (\text{s})}{\text{cm}^2}$$

Esta última unidad se denomina POISE.

$$1 \text{ POISE} = 1 \frac{(\text{dina}) (\text{s})}{\text{cm}^2}$$

pero: 1 dina = g x (cm/s)

$$1 \text{ POISE} = 1 \frac{\text{g}}{(\text{cm}) (\text{s})}$$

Como el poise es una unidad de viscosidad relativamente grande, se utiliza el centipoise (cp):

$$1 \text{ POISE} = 100 \text{ centipoises}$$

Para medir la viscosidad absoluta se han desarrollado varios viscosímetros, tales como el STORMER, BROOKFIELD, los viscosímetros de bola de GIBSON y JACOBS, el de Mac-MICHEL y los viscosímetros de bola rodante de FLOWER y HERSEY.

Para la medición de la viscosidad en aceites lubricantes y productos del petróleo en general, son muy utilizados los viscosímetros de tubo capilar o de orificio, donde el líquido a una altura determinada se deja caer, en cuyo caso la fuerza para provocar el descenso depende de la densidad del fluido. Cuando la viscosidad se mide así, se denomina **viscosidad cinamática** y la unidad es el stoke.

$$\text{POISE} = \text{STOKE} \times \text{DENSIDAD}$$

$$\text{Centipoise (cp)} = \text{centistoke (sSt)} \times \text{densidad}$$

En el sistema métrico absoluto las unidades serán:

$$1 \text{ STOKE} = \frac{\text{g}/(\text{cm} \times \text{s})}{\text{g}/\text{cm}^3}$$

$$1 \text{ STOKE} = 1 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

$$1 \text{ STOKE} = 100 \text{ CENTISTOKES}$$

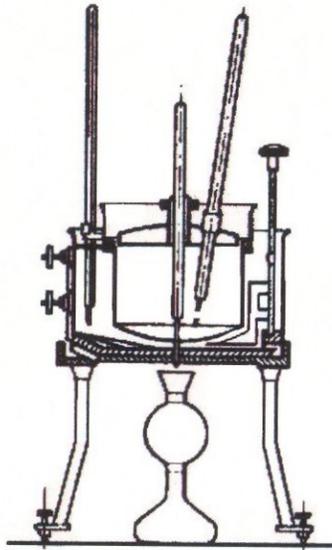
$$1 \text{ CENTISTOKE (cSt)} = 1 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

Los viscosímetros más utilizados para medir la viscosidad cinemática son los de OSWALD, el SAYBOLT , el REDWOOD, y el ENGLER.

A continuación se dan las características de medición de los viscosímetros enumerados anteriormente:

### **VISCOSIMETRO ENGLER (Utilizado en Europa Continental)**

Cantidad de aceite empleada:  $200 \text{ cm}^3$   
Temperaturas utilizadas:  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $100 \text{ }^\circ\text{C}$



**Resultados:** Tiempo de escurrimiento del aceite, dividido por el de  $200 \text{ cm}^3$  de agua a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , expresado en GRADOS ENGLER.

**VISCOSIMETRO REDWOOD (Utilizado en Inglaterra)**

Cantidad de aceite empleada:  $50 \text{ cm}^3$

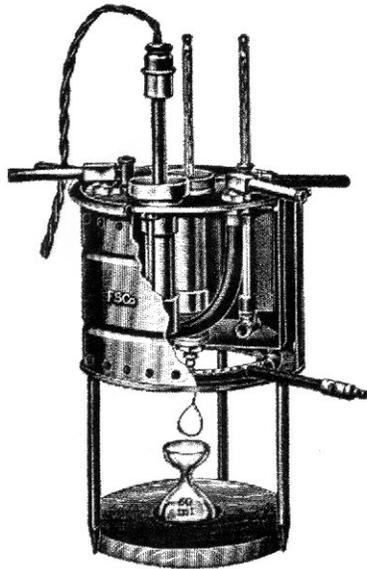
Temperaturas utilizadas:  $70^\circ\text{F}$ ,  $100^\circ\text{F}$ ,  $140^\circ\text{F}$ ,  $200^\circ\text{F}$

**Resultados:** Tiempo de escurrimiento del aceite expresado en SEGUNDOS REDWOOD.

**VISCOSIMETRO SAYBOLT (Utilizado en Estados Unidos)**

Cantidad de aceite empleada:  $60 \text{ cm}^3$

Temperaturas utilizadas:  $100^\circ\text{F}$ ,  $122^\circ\text{F}$ ,  $210^\circ\text{F}$



**Resultados:** Tiempo de escurrimiento del aceite expresado en SEGUNDOS SAYBOLT FUROL o SEGUNDOS SAYBOLT UNIVERSAL.

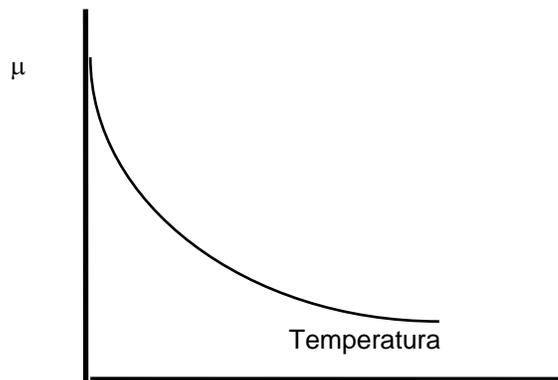
La diferencia entre Segundos Saybolt Universal (SSU) y Segundos Saybolt Furol (SSF) se determina por el tamaño del orificio calibrado que se utilice en el viscosímetro. El tiempo de escurrimiento en el orificio Furol es aproximadamente 10 veces menor que en el orificio Universal.

Al final de la guía se da un nomograma para conversiones de viscosidad a la misma temperatura.

### Relación Viscosidad - Temperatura

Tal como se dijo anteriormente la viscosidad de un lubricante disminuye cuando su temperatura aumenta y viceversa.

Si se representa la viscosidad en función de la temperatura en un sistema de coordenadas de base aritmética, la curva resultante sería la indicada por la gráfica:



Muchas han sido las fórmulas matemáticas propuestas para expresar la relación existente entre la viscosidad y la temperatura de los aceites minerales.

La " American Society for Testing Materials" (ASTM) construyó un diagrama basado en la siguiente fórmula propuesta por Mac Coull:

$$\text{Log Log } (\mu + A) = - B \text{ Log } T_0 + C$$

$T_0$  = Temperatura absoluta del líquido en  $^{\circ}\text{K}$

$\mu$  = viscosidad cinemática en centistokes

A = constante de valor 0.6 para todas las viscosidades superiores a 1.5 centistokes

B y C constantes características de cada aceite

El diagrama "viscosidad vs temperatura" ASTM se encuentra disponible para viscosidades en SSU y cSt como una función de las temperaturas en °F y °C respectivamente.

Al final de guía se incluye el diagrama ASTM.

Mediante el diagrama, conociendo dos valores de viscosidad a dos temperaturas, puede trazarse una línea recta entre ellos. El resultado permite conocer la viscosidad del lubricante a cualquier temperatura. En la práctica para la construcción de estas líneas se recomienda conocer al menos tres viscosidades obtenidas por vía experimental.

#### Indice de Viscosidad. (IV)

El índice de viscosidad es un número empírico que indica el efecto de cambio de la viscosidad con la temperatura del aceite. Un índice bajo indica un gran cambio de la viscosidad con la temperatura.

El cálculo de este valor está normalizado por la norma ASTM D-567 la cual utiliza las viscosidades a 100 °F y 210 °F. Actualmente estas temperaturas han sido cambiadas por 40 °C y 100 °C, sin embargo el procedimiento que utilizaremos será a las primeras temperaturas.

El índice de viscosidad se calcula a partir de las siguientes ecuaciones:

$$IV = \frac{L - U}{L - H} \times 100 \qquad IV = \frac{L - U}{D} \times 100$$

donde:

U = Viscosidad a 100 °F del aceite cuyo índice de viscosidad se está calculando.

L = Viscosidad a 100 °F de un aceite de índice de viscosidad 0 que tiene la misma viscosidad a 210 °F que el aceite cuyo índice de viscosidad se calcula.

H = Viscosidad a 100 °F de un aceite de índice de viscosidad 100 que tiene la misma viscosidad a 210 °F del aceite cuyo índice de viscosidad se calcula. Este valor no se muestra en la tablas porque su uso no es necesario cuando D se conoce.

Al final de guía se dan los valores de L y D en función de la viscosidad cinemática a 210 °F en cSt.

Al final se dan los valores de L y D en función de los valores de la viscosidad cinemática en Segundos Saybolt Universal a 210 °F.

Si la viscosidad cinemática de un aceite a 210 °F está por debajo de 2.0 cSt, los valores de L y D se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$D = X (0.1725 + 0.34984 X)$$

$$L = X (1.655 + 1.2665 X)$$

donde: X = viscosidad cinemática a 210 °F

Si la viscosidad Saybolt de un aceite a 210 °F está por encima de 350 SSU, los valores de L y D se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$D = 0.1752 Y^2 - 0.498 Y - 245.8$$

$$L = 0.216 Y^2 + 12.07 Y - 721.2$$

donde: Y = Viscosidad en Segundos Saybolt Universal a 210 °F.

## OBJETIVOS

A) Obtener la relación viscosidad-temperatura.

Gráfica A : Viscosidad Saybolt Universal en función de la temperatura (Diagrama ASTM).

B) Obtener la relación densidad-temperatura.

Gráfica B : Densidad en función de la temperatura.

C) Calcular las constantes a y b en la ecuación:  $\log \mu = a + (b/T)$

Gráfica C ; Log  $\mu$  en función de  $1/T$ .

D) Determinar la viscosidad en grados Engler a 20°C, 50°C y 100°C.

E) Determinar la viscosidad en segundos Redwood a 70°F, 100°F, 140°F y 200°F.

F) Determinar la viscosidad en centistokes y centipoises a 40°C y 100°C.

G) Calcular el índice de viscosidad mediante las tablas correspondientes y confrontar el cálculo anterior mediante el nomograma que corresponda.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Colocar en el viscosímetro Saybolt la muestra de aceite problema teniendo cuidado que el tapón de corcho esté colocado. Cuando la temperatura especificada se encuentre estable, quitar el tapón y medir con un cronómetro el tiempo para que fluyan por el orificio 60 cm<sup>3</sup> de aceite. Repetir el procedimiento anterior para otras dos temperaturas utilizando en cada ensayo el orificio adecuado.
- 2) Simultáneamente con las mediciones anteriores deben tomarse por lo menos cinco datos de densidad para el mismo aceite sin sobrepasar los 50°C. Los datos anteriores pueden extrapolarse si es necesario.

## EQUIPO

- 1) Viscosímetro Saybolt, marca Fisher/Tag de cuatro tubos, diseñado para determinar la viscosidad de aceites ligeros y pesados según la norma ASTM D-88.  
Posee un baño interno de aceite controlado termostáticamente.  
El aparato opera a 115 voltios, 50-60 ciclos y tiene un consumo máximo de potencia de 1200 vatios.

- 2) Equipo auxiliar: orificios universal y furol, cronómetro, termómetro, densímetros, probeta, etc.

## CALCULOS

- A) Las tres viscosidades obtenidas para el aceite de prueba consignarlas en una tabla como la siguiente:

t (°C)	t (°F)	VISCOSIDAD SAYBOLT UNIVERSAL (SSU)

Si alguna de las viscosidades se midió en Segundos Saybolt Furol (SSF) debe convertirse a (SSU) utilizando el nomograma. Los datos anteriores se llevan a la gráfica A y se ajusta una línea recta.

- B) Las cinco densidades tomadas se consignan en una tabla como la siguiente:

TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )

Con los datos anteriores construir la gráfica B.

- C) Convertir cada una de las anteriores viscosidades a centistokes utilizando el nomograma y luego a centipoises utilizando la siguiente relación:

$$\text{centipoises} = \text{centistokes} \times \text{densidad}$$

La densidad debe tomarse a la misma temperatura a la que se toma la viscosidad.

Los resultados anteriores se llevan a una tabla como la siguiente:

VISCOSIDAD ABSOLUTA (CENTIPOISES)	log $\mu$	TEMPERATURA ( $^{\circ}$ C)	TEMPERATURA ( $^{\circ}$ K)	1/T ( $^{\circ}$ K) $^{-1}$

Con los datos de la segunda y última columna se construye la gráfica C. Si los puntos obtenidos sobre la gráfica no presentan una relación lineal debe analizarse dicha desviación.

Ajustando una línea recta y considerando la ecuación:

$$\log \mu = a + b/T$$

determine las constantes a y b, utilizando la pendiente y el intersepto.

Verifique el comportamiento de esta última gráfica con respecto al comportamiento de la gráfica ASTM, mediante la lectura de una viscosidad a una temperatura dada.

D) Utilizar el nomograma de conversión de viscosidades.

E) Utilizar el nomograma de conversión de viscosidades.

F) Utilizar el nomograma de viscosidades y la gráfica B.

G) Para calcular el Índice de Viscosidad (IV) determine la viscosidad del aceite en Segundos Saybolt Universal (SSU) a 100 $^{\circ}$ F y 210 $^{\circ}$ F, utilizando para ello la gráfica A (ASTM). Con los datos obtenidos anteriormente y con ayuda de las tablas para Índice de Viscosidad aplique la siguiente fórmula:

$$IV = \frac{L - U}{D} \times 100$$

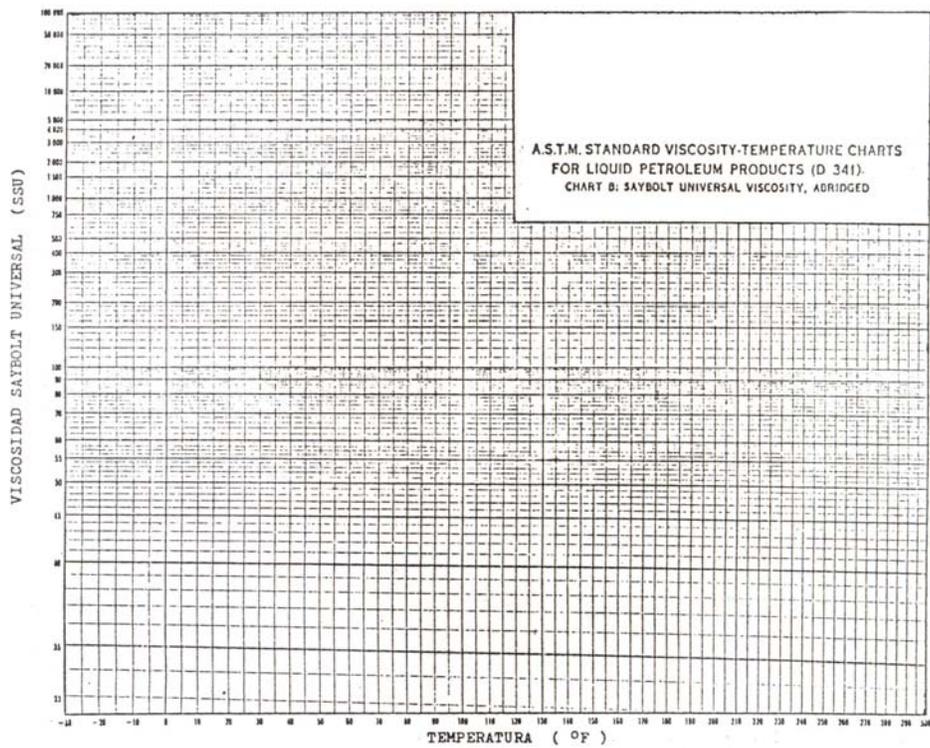
U = Viscosidad a 100°F

L, D se determinan con la viscosidad a 210°F en la tabla.

Compare el resultado anterior con el reportado por el nomograma.

## GRAFICA A

### DIAGRAMA (ASTM) VISCOSIDAD-TEMPERATURA PARA PRODUCTOS LIQUIDOS DEL PETROLEO



## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS I

## TABLA DE DATOS : PRACTICA 9

## VISCOSIDAD SAYBOLT

VISCOSIDAD SAYBOLT					
ACEITE 1			ACEITE 2		
T °C	SSF	SSU	T °C	SSF	SSU

GRAVEDAD ESPECIFICA			
ACEITE 1		ACEITE 2	
t °C	G	t °C	G

## IDENTIFICACION DEL ACEITE UTILIZADO

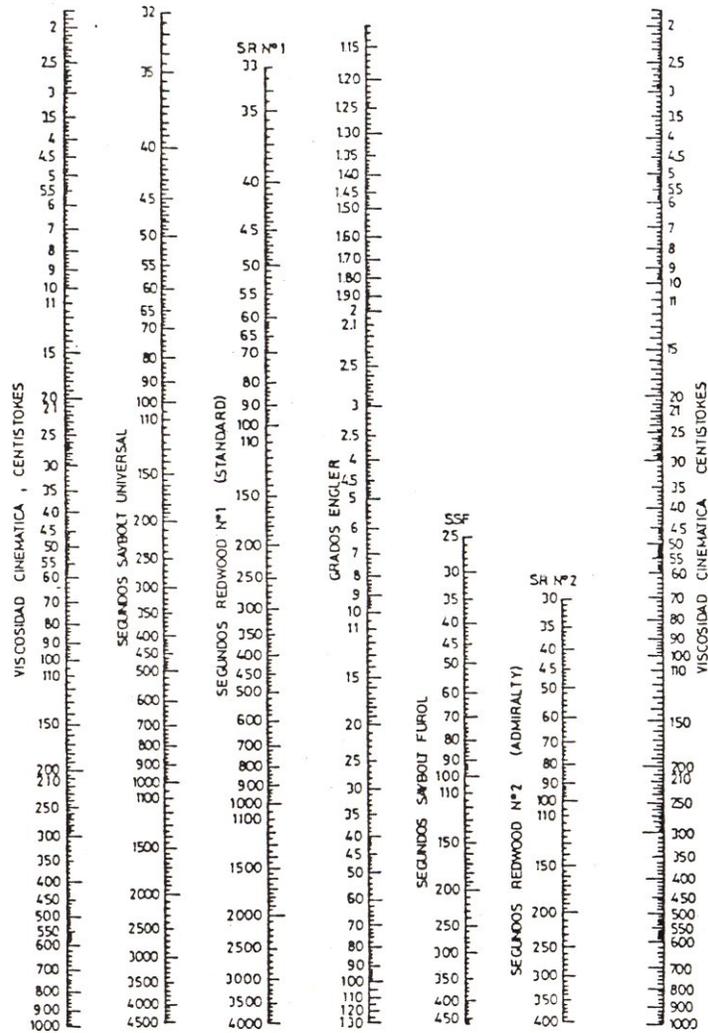
ACEITE 1	ACEITE 2

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## APENDICE 1

### CONVERSION DE VISCOSIDADES



APENDICE 2

TABLA PARA INDICE DE VISCOSIDAD

Saybolt Universal Viscosity at 210 F, sec	L	D (L-H)	Saybolt Universal Viscosity at 210 F, sec	L	D (L-H)	Saybolt Universal Viscosity at 210 F, sec	L	D (L-H)
40.0	137.9	30.8	65.0	976.1	462.1	90.0	2115	1129
40.5	147.3	34.2	65.5	906.2	473.3	90.5	2141	1145
41.0	157.9	38.6	66.0	1016.3	484.5	91.0	2166	1160
41.5	169.4	43.5	66.5	1036.7	495.9	91.5	2192	1176
42.0	181.7	49.0	67.0	1057.1	507.3	92.0	2217	1191
42.5	194.7	55.0	67.5	1077.7	518.8	92.5	2244	1208
43.0	208.4	61.5	68.0	1098.3	530.5	93.0	2270	1224
43.5	222.4	69.2	68.5	1119.2	542.2	93.5	2296	1240
44.0	236.5	75.0	69.0	1140.1	554.0	94.0	2322	1256
44.5	250.9	82.0	69.5	1161.1	565.9	94.5	2349	1272
45.0	265.1	88.8	70.0	1182	578	95.0	2375	1288
45.5	279.4	95.6	70.5	1204	590	95.5	2402	1305
46.0	293.9	102.6	71.0	1225	602	96.0	2428	1321
46.5	308.2	109.6	71.5	1247	615	96.5	2455	1337
47.0	322.4	116.2	72.0	1268	627	97.0	2481	1353
47.5	337.0	123.0	72.5	1290	639	97.5	2509	1371
48.0	352.3	130.3	73.0	1311	651	98.0	2536	1388
48.5	368.5	138.2	73.5	1333	664	98.5	2564	1406
49.0	386.2	147.2	74.0	1355	677	99.0	2591	1423
49.5	404.2	157.0	74.5	1377	689	99.5	2619	1440
50.0	422.0	166.9	75.0	1399	702	100.0	2646	1457
50.5	439.2	175.8	75.5	1422	715	101.0	2701	1491
51.0	456.1	184.4	76.0	1444	728	102.0	2757	1526
51.5	473.1	193.1	76.5	1468	743	103.0	2814	1562
52.0	490.5	202.1	77.0	1489	755	104.0	2870	1597
52.5	507.7	210.9	77.5	1512	768	105.0	2928	1634
53.0	525.2	219.9	78.0	1534	781	106.0	2985	1670
53.5	543.0	229.2	78.5	1557	794	107.0	3043	1706
54.0	560.5	238.3	79.0	1580	808	108.0	3102	1744
54.5	578.1	247.4	79.5	1604	822	109.0	3161	1782
55.0	596.0	256.8	80.0	1627	836	110.0	3220	1819
55.5	614.1	266.3	80.5	1651	850	111.0	3280	1858
56.0	632.3	275.9	81.0	1674	864	112.0	3340	1896
56.5	650.2	285.3	81.5	1698	878	113.0	3400	1934
57.0	668.6	295.1	82.0	1721	892	114.0	3462	1974
57.5	687.0	304.8	82.5	1745	906	115.0	3523	2013
58.0	705.5	314.7	83.0	1769	920	116.0	3585	2053
58.5	723.9	324.5	83.5	1793	934	117.0	3648	2094
59.0	742.8	334.6	84.0	1817	949	118.0	3711	2135
59.5	761.7	344.8	84.5	1841	963	119.0	3774	2176
60.0	780.6	355.0	85.0	1865	977	120.0	3838	2218
60.5	799.7	365.4	85.5	1890	992	121.0	3902	2259
61.0	818.9	375.8	86.0	1914	1007	122.0	3966	2301
61.5	838.1	386.2	86.5	1939	1022	123.0	4031	2343
62.0	857.4	396.8	87.0	1964	1037	124.0	4097	2387
62.5	876.9	407.4	87.5	1989	1052	125.0	4163	2430
63.0	896.5	418.1	88.0	2014	1067	126.0	4229	2473
63.5	916.2	429.0	88.5	2039	1082	127.0	4296	2517
64.0	936.2	440.1	89.0	2064	1098	128.0	4363	2561
64.5	955.9	450.9	89.5	2090	1114	129.0	4430	2605

## APENDICE 2

### TABLA PARA INDICE DE VISCOSIDAD

Saybolt Universal Viscosity at 210 F, sec	L	D (L-H)	Saybolt Universal Viscosity at 210 F, sec	L	D (L-H)	Saybolt Universal Viscosity at 210 F, sec	L	D (L-H)
130	4498	2650	180	8450	5341	230	13481	8907
131	4567	2696	181	8540	5404	231	13593	8988
132	4636	2742	182	8630	5467	232	13705	9069
133	4705	2787	183	8721	5530	233	13818	9150
134	4775	2834	184	8813	5595	234	13930	9230
135	4845	2880	185	8904	5658	235	14044	9313
136	4915	2927	186	8997	5723	236	14158	9395
137	4986	2974	187	9089	5787	237	14272	9477
138	5058	3022	188	9182	5853	238	14387	9560
139	5130	3070	189	9276	5919	239	14502	9643
140	5202	3118	190	9370	5985	240	14617	9726
141	5275	3167	191	9464	6050	241	14733	9810
142	5348	3216	192	9559	6117	242	14850	9895
143	5422	3266	193	9654	6184	243	14966	9978
144	5496	3316	194	9750	6252	244	15084	10064
145	5570	3365	195	9846	6319	245	15201	10148
146	5645	3416	196	9942	6387	246	15319	10234
147	5721	3467	197	10039	6455	247	15438	10320
148	5796	3518	198	10137	6524	248	15557	10406
149	5873	3570	199	10235	6594	249	15676	10492
150	5949	3621	200	10333	6663	250	15796	10579
151	6026	3673	201	10431	6732	251	15917	10667
152	6104	3726	202	10531	6803	252	16037	10754
153	6182	3779	203	10630	6873	253	16158	10842
154	6260	3832	204	10730	6944	254	16280	10931
155	6339	3886	205	10831	7015	255	16402	11020
156	6418	3940	206	10931	7086	256	16524	11108
157	6498	3995	207	11033	7159	257	16647	11198
158	6578	4049	208	11134	7230	258	16771	11288
159	6659	4105	209	11237	7304	259	16894	11377
160	6740	4160	210	11339	7376	260	17019	11469
161	6821	4215	211	11442	7449	261	17143	11559
162	6903	4272	212	11546	7523	262	17268	11650
163	6985	4328	213	11649	7596	263	17394	11742
164	7068	4385	214	11754	7671	264	17520	11834
165	7151	4442	215	11858	7745	265	17646	11926
166	7234	4499	216	11964	7821	266	17773	12018
167	7318	4557	217	12069	7896	267	17900	12111
168	7403	4615	218	12175	7972	268	18028	12205
169	7488	4674	219	12282	8048	269	18156	12298
170	7573	4733	220	12389	8125	270	18284	12392
171	7659	4792	221	12496	8201	271	18413	12486
172	7745	4852	222	12604	8279	272	18542	12580
173	7832	4912	223	12712	8356	273	18672	12674
174	7919	4972	224	12820	8433	274	18802	12771
175	8006	5032	225	12930	8512	275	18933	12867
176	8094	5094	226	13039	8590	276	19064	12963
177	8182	5155	227	13149	8669	277	19196	13060
178	8271	5217	228	13259	8748	278	19328	13156
179	8360	5278	229	13370	8828	279	19460	13253

APENDICE 2

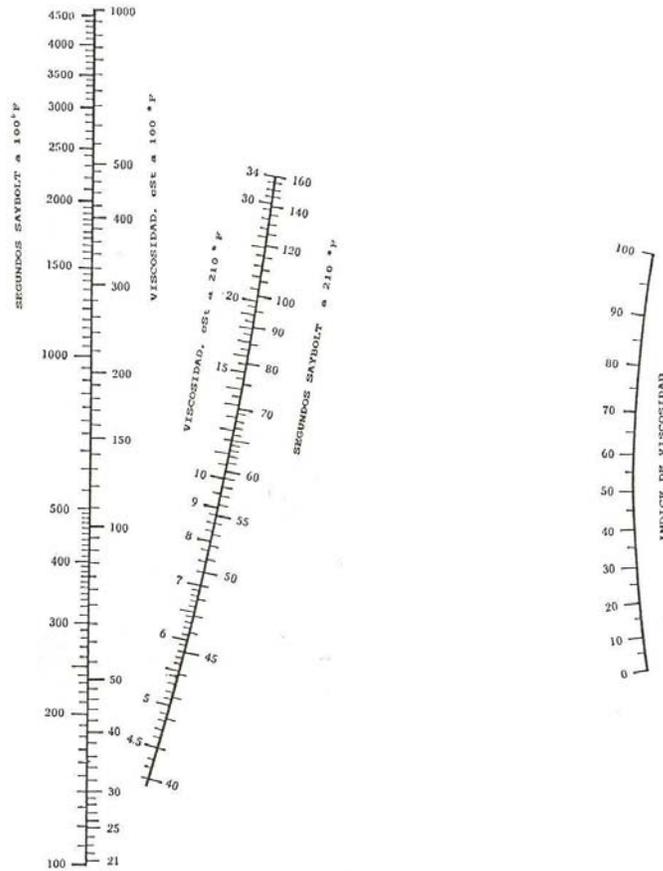
TABLA PARA INDICE DE VISCOSIDAD

Saybolt Universal Viscosity at 210 F, sec	L	D (L-H)	Saybolt Universal Viscosity at 210 F, sec	L	D (L-H)	Saybolt Universal Viscosity at 210 F, sec	L	D (L-H)
280	19583	13351	305	23054	15901	330	26784	18689
281	19726	13448	306	23198	16007	331	26939	18784
282	19860	13547	307	23342	16114	332	27094	18900
283	19994	13646	308	23487	16221	333	27250	19016
284	20128	13743	309	23632	16328	334	27406	19132
285	20263	13843	310	23778	16436	335	27563	19249
286	20399	13943	311	23924	16545	336	27720	19366
287	20535	14043	312	24071	16654	337	27877	19483
288	20671	14143	313	24218	16762	338	28035	19601
289	20808	14244	314	24366	16872	339	28193	19719
290	20945	14344	315	24513	16981	340	28352	19838
291	21082	14445	316	24662	17092	341	28511	19956
292	21220	14547	317	24808	17199	342	28671	20076
293	21359	14649	318	24960	17313	343	28831	20195
294	21498	14752	319	25110	17424	344	28991	20315
295	21637	14854	320	25260	17536	345	29152	20435
296	21777	14958	321	25410	17647	346	29314	20556
297	21917	15061	322	25561	17759	347	29475	20677
298	22057	15164	323	25712	17871	348	29638	20799
299	22198	15268	324	25864	17984	349	29800	20920
300	22340	15373	325	26017	18098	350	29963	21042
301	22482	15478	326	26169	18211			
302	22624	15583	327	26322	18325			
303	22767	15688	328	26476	18440			
304	22910	15794	329	26630	18554			

### APENDICE 3

## NOMOGRAMA PARA INDICE DE VISCOSIDAD

VALORES DE : 0 - 100 (ASTM D 2270)

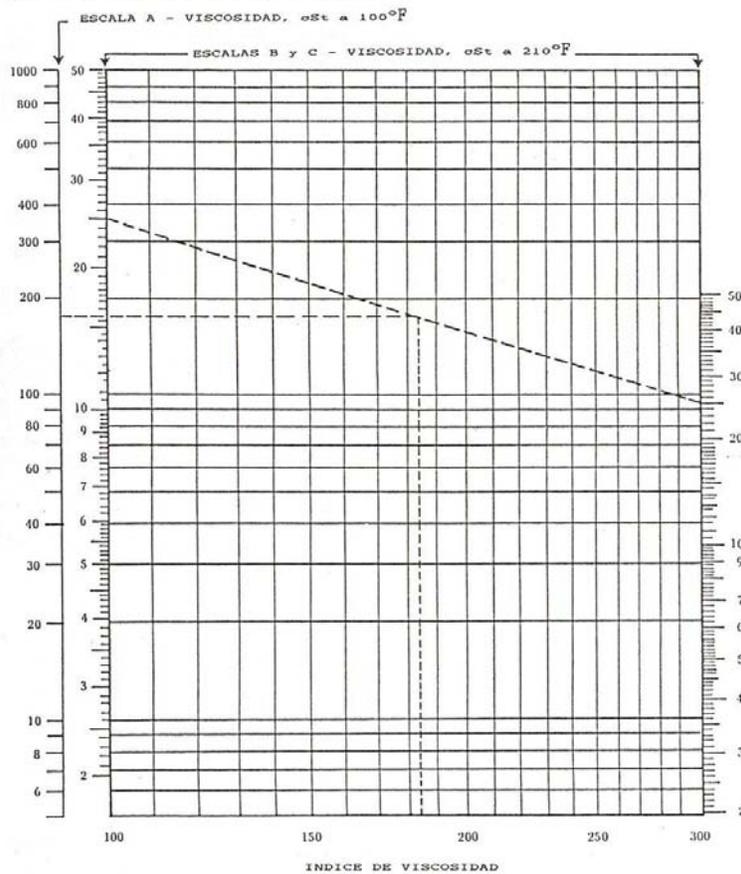


### APENDICE 4

## NOMOGRAMA PAR INDICE DE VISCOSIDAD

### VALORES DE : 100 - 300 (ASTM D 2270)

COLOQUE LA VISCOSIDAD A 210°F SOBRE LAS ESCALAS B y C; TRACE UNA LINEA QUE CONECTE ESOS DOS PUNTOS; COLOQUE LA VISCOSIDAD A 100°F SOBRE LA ESCALA A y TRACE UNA LINEA HORIZONTAL. EN EL PUNTO DONDE SE INTERSECTAN LAS DOS LINEAS TRACE LA VERTICAL Y LEA DIRECTAMENTE EN LA ESCALA DE INDICE DE VISCOSIDAD



## PRACTICA 10

# FLUJO EN CANAL ABIERTO CON RESALTO HIDRAULICO

Por: Ing. Jorge Spinel Gómez



EQUIPO PARA RESALTO HIDRÁULICO

## 1.FUNDAMENTO TEORICO

### 1.1 FLUJO EN CANALES ABIERTOS

Durante el proceso de flujo en un canal abierto, el líquido transportado presenta una superficie libre y no experimenta presiones que no sean causadas por su propio peso

o por la atmósfera. Algunos procesos de flujo de este tipo se verifican de manera natural, como es el caso del transporte de agua en ríos y quebradas, los cuales tienen lugar a través de secciones transversales irregulares. Otros, con la característica de ser desarrollados a través de canales artificiales, generalmente presentan un área de flujo más regular (rectangular, trapezoidal, triangular, circular con ducto parcialmente lleno, etc).

Como se señaló antes, el flujo en canales está caracterizado por una superficie libre en contacto con la atmósfera; dado que el fluido circula sólo por acción de su propio peso y de la presión atmosférica, el flujo se denomina **gravitatorio**. Consecuentemente, en los canales abiertos el flujo se mueve en una dirección descendente, siendo la velocidad de flujo función de la pendiente del canal.

**1.1.1 Aspectos energéticos.** Como todo fluido en movimiento, sus formas mecánicas de energía están relacionadas con la velocidad (energía cinética), con la posición en el campo gravitacional (energía potencial) y con las fuerzas de presión a que se encuentra sometido (energía de flujo). La energía cinética (expresada como cabeza de velocidad) en cualquier punto del campo de flujo se representa como  $V^2/2g$ . Estrictamente hablando, este término, referido a una sección transversal de ducto, debería ser operado por un coeficiente que diera cuenta de la distribución de velocidades en dicha sección. En las descripciones matemáticas que siguen, no obstante, se considera que el coeficiente de corrección de la energía cinética es unitario y que  $V$  representa la velocidad promedio de flujo en la sección transversal que se trate.

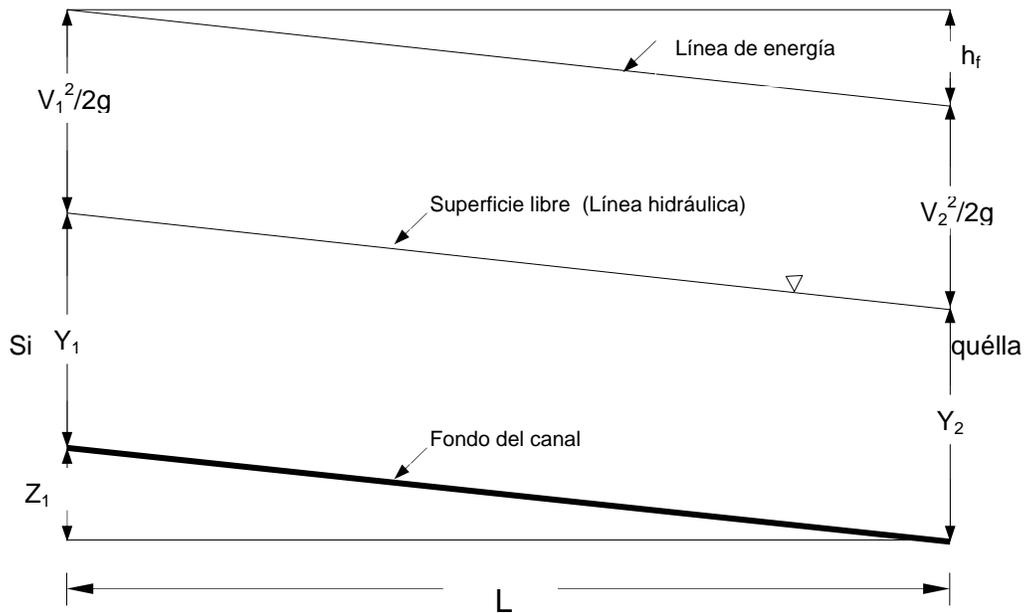


Figura 1 – Energía en un canal abierto (flujo uniforme)

se expresa en términos de cabeza de presión (entendida como el espesor de la lámina de líquido en la Figura 1), \$Y\$ representa dicha energía. La energía potencial \$Z\$ (expresada como cabeza de altura), es costumbre referenciarla con una localización arbitrariamente escogida en el fondo del canal, en su terminal más bajo (ver Figura 1). En relación con la Figura 1, resulta claro que la energía mecánica, \$E\$, en cualquier sección es:

$$E = \frac{V^2}{2g} + Y + Z \quad (1)$$

La línea que representa \$E\$ entre las secciones 1 y 2 se denomina **línea de energía** y la superficie libre **línea hidráulica**. En el caso particular de flujo estable y uniforme, como el sugerido en la Figura 1, \$V\$ permanece constante y las líneas de energía e hidráulica resultan paralelas al fondo del canal. La caída en la línea de energía (\$h\_f\$)

corresponde a las "pérdidas de carga" entre las secciones 1 y 2, siendo la relación  $h_f/L$  la pérdida de carga unitaria o **gradiente hidráulico** (representado en la Figura 1 por la pendiente de la línea de energía). Cuando se dan cambios graduales en el área de flujo en régimen estable, la velocidad media se modifica resultando el flujo no uniforme (ver Figura 2).

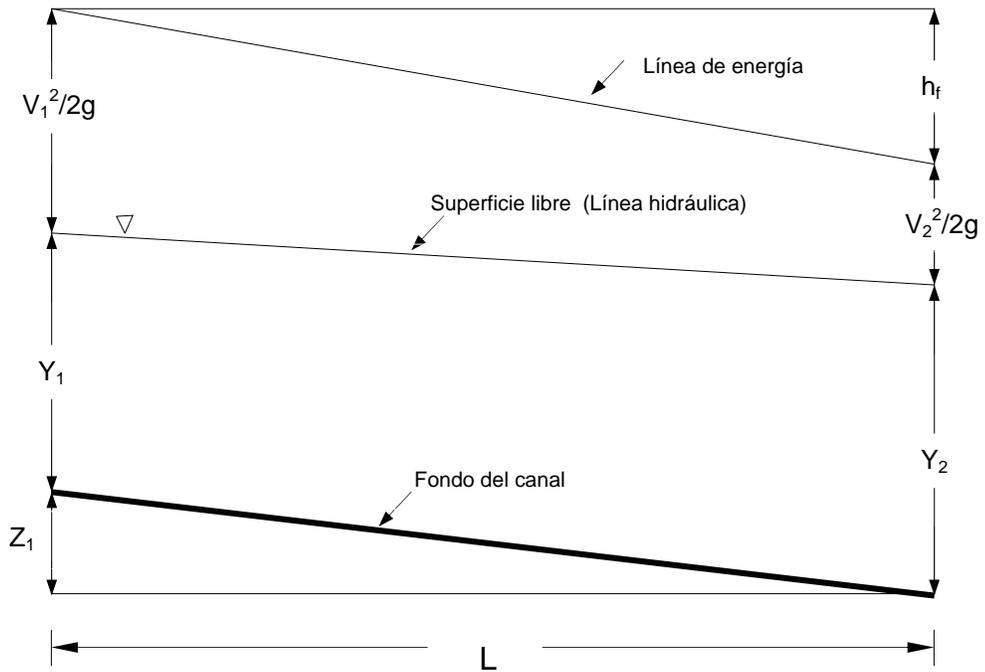


Figura 2 Energía en un canal abierto (Flujo no uniforme)

Al aplicar el principio de conservación de energía entre las secciones 1 y 2 resulta:

$$\frac{V_1^2}{2g} + Y_1 + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + Y_2 + h_f \quad (2)$$

El término  $Z_1$  puede sustituirse por  $m_c L$  (donde  $m_c$  representa la pendiente del canal); asimismo, el término  $h_f$  puede reemplazarse por  $m_e L$  (donde  $m_e$  se refiere a la pendiente de la línea de energía), resultando la ecuación (2) transformada en:

$$L = \frac{\left( \frac{V_2^2}{2g} + Y_2 \right) - \left( \frac{V_1^2}{2g} + Y_1 \right)}{(m_c - m_e)} \quad (3)$$

Para el caso de un flujo volumétrico circulante ( $Q$ ), y de una geometría dada para la sección transversal del canal, todos los términos de la ecuación (3) resultan conocidos, excepto  $m_e$ . No obstante, si se recurre a los resultados experimentales de Manning para canales abiertos, es posible estimar de manera aproximada  $m_e$ .

En efecto, Manning desarrolló las siguientes fórmulas para canales abiertos:

- En el Sistema Americano de Ingeniería:

$$V = \frac{1.486}{n} R^{2/3} m_e^{1/2} \quad (4)$$

donde:

- $V$   $\equiv$  Velocidad media de flujo, en pies/s
- $n$   $\equiv$  Coeficiente de rugosidad de Manning, adimensional
- $R$   $\equiv$  Radio hidráulico, en pies
- $m_e$   $\equiv$  Pendiente de la línea de energía, adimensional

- En el Sistema Internacional:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} m_e^{1/2} \quad (5)$$

En la ecuación (5) los términos tienen el mismo significado que en la ecuación (4), pero el radio hidráulico se expresa en m y la velocidad en m/s.

Cuando se despeja  $m_e$  de las ecuaciones (4) y (5) y se representa  $V$  por  $V_m = (V_1 + V_2) / 2$  y  $R$  por  $R_m = (R_1 + R_2) / 2$ , resulta:

$$m_e = \left( \frac{n V_m}{1.486 R_m^{2/3}} \right)^2 \quad (6)$$

y

$$m_e = \left( \frac{n V_m}{R_m^{2/3}} \right)^2 \quad (7)$$

Valores típicos del coeficiente de Manning pueden consultarse en la referencia (1), página 232.

Las ecuaciones (1) a (7), representativas del flujo en canales abiertos, pueden llevarse a un nivel de especificación particular cuando, como ocurre en el caso de esta práctica, la geometría del canal es rectangular.

En efecto, en un canal rectangular el área de flujo en cualquier sección transversal es:

$$A = W Y \quad (8)$$

siendo  $W$  el ancho e  $Y$  el espesor de la capa de líquido. Para un flujo volumétrico particular:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{WY} \quad (9)$$

El radio hidráulico (área de la sección transversal / Perímetro húmedo) viene dado por:

$$R = \frac{A}{W + 2Y} = \frac{WY}{W + 2Y} = \frac{Y}{1 + 2\left(\frac{Y}{W}\right)} \quad (10)$$

**1.1.2 Energía específica y condiciones críticas de flujo.** Cuando se mide la energía en cualquier sección de un canal abierto con respecto al fondo del mismo, ésta resulta ser simplemente la suma de la energía cinética y de la energía de flujo. Esta energía se conoce como **energía específica (Es)**, de manera que:

$$E_s = Y + \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

En función del flujo volumétrico la ecuación (11) se transforma en:

$$E_s = Y + \frac{(Q/A)^2}{2g} \quad (12)$$

A su vez, tratándose de un canal rectangular, la ecuación (12) deriva en:

$$E_s = Y + \frac{(Q/WY)^2}{2g} \quad (13)$$

Una representación gráfica de Y vs.  $E_s$  permite obtener la denominada **curva de energía específica** (ver Figura 3).

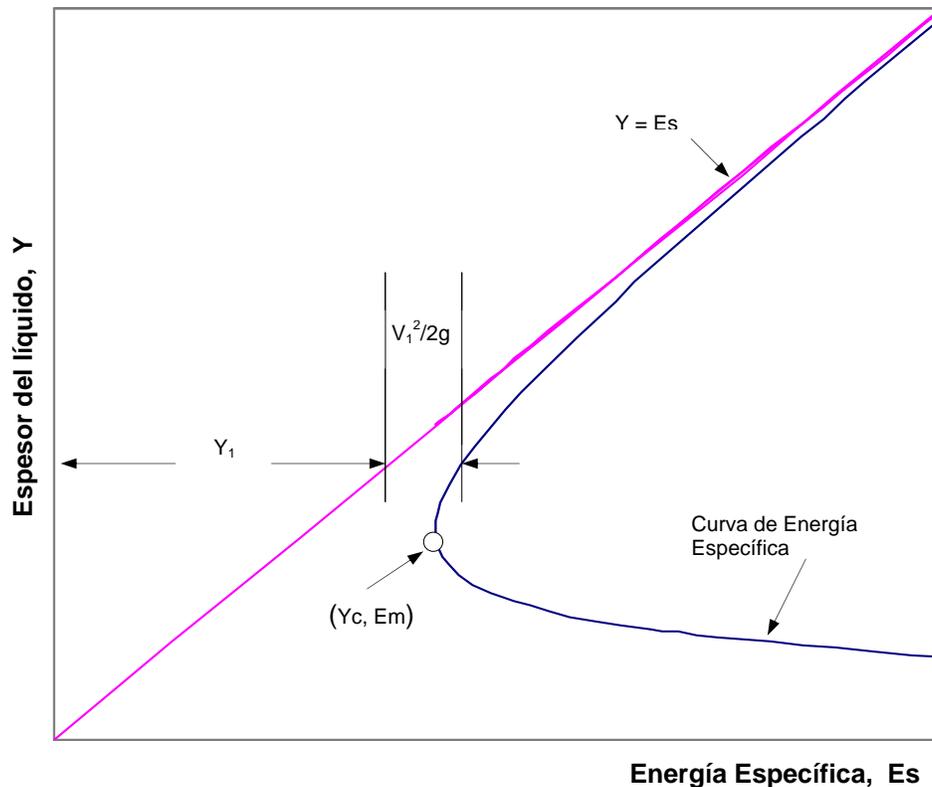


Figura 3 Curva de Energía Específica

La línea trazada como  $Y = Es$  representa una guía que señala que para cualquier espesor  $Y$ , la distancia horizontal desde la ordenada hasta la línea citada representa el "término  $Y$ " de la ecuación (11) y la distancia desde dicha línea hasta la curva de energía específica representa el "término  $V^2/2g$ ".

Es claro en la Figura 3 que existe un valor mínimo de la energía específica, denominado **Em**; la condición de flujo en este punto se conoce como **estado crítico** y el espesor correspondiente se llama **espesor crítico (Yc)**. El flujo, a cualquier espesor superior a  $Yc$  se llama **subcrítico** y a cualquier espesor inferior a  $Yc$ , **supercrítico**.

La caracterización del flujo en crítico, supercrítico y subcrítico puede realizarse con base en el valor del parámetro adimensional conocido como **Número de Froude ( $N_{FR}$ )**, el cual es representativo de la relación entre fuerzas inerciales y fuerzas gravitacionales, así:

$$N_{FR} = \frac{V}{\sqrt{gY}} \quad (14)$$

Cuando el flujo es crítico el  $N_{FR}$  presenta un valor unitario, caso en el cual, si el canal es rectangular con ancho  $W$ , el espesor crítico resulta ser:

$$Y_c = \frac{(Q/WY_c)^2}{g} \quad (15)$$

o

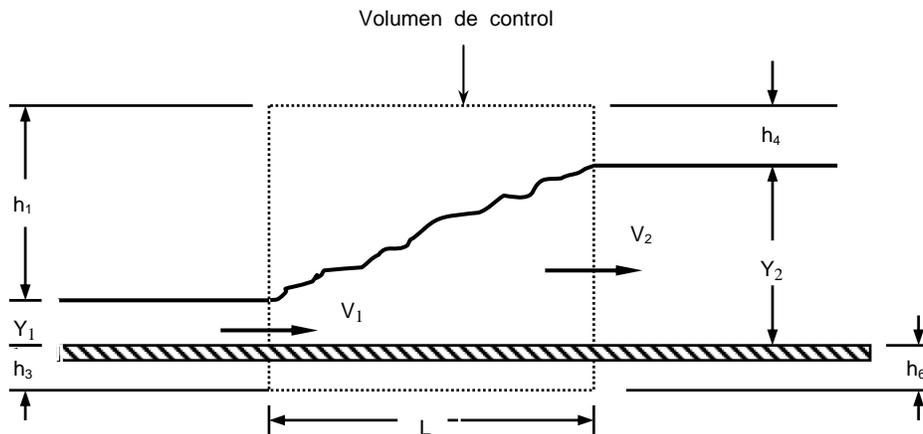
$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{(Q/W)^2}{g}} \quad (16)$$

Cuando el  $N_{FR}$  es menor que uno el flujo resulta subcrítico ("flujo tranquilo"), en tanto que cuando es mayor que uno el flujo resulta supercrítico ("flujo rápido").

## 1.2 RESALTO HIDRAULICO

Cuando en un canal sin obstrucción se presenta un aumento espontáneo de nivel (ver Figura 4), se caracteriza al flujo como **Resalto Hidráulico**. La región contenida entre dos regiones de aparente flujo uniforme está caracterizada por un flujo altamente turbulento con elevada inestabilidad en su superficie y, en consecuencia, resulta de

difícil descripción. No obstante, si se aplica el teorema de la cantidad de movimiento, pueden relacionarse las condiciones del flujo antes y después de esta región inestable.



**Figura 4. Resalto Hidráulico**

El teorema de momentum aplicado al volumen de control de la Figura 4, en la dirección horizontal (eje x), expresa que, en régimen estacionario:

$$\sum F_x = m(V_2 - V_1) \quad (17)$$

donde,  $\sum F_x$  es la fuerza resultante que actúa sobre el volumen de control,  $m$  es la velocidad másica y  $V_1$  y  $V_2$  son, respectivamente, las velocidades medias de flujo en la dirección  $x$ , a la entrada y a la salida del volumen de control.

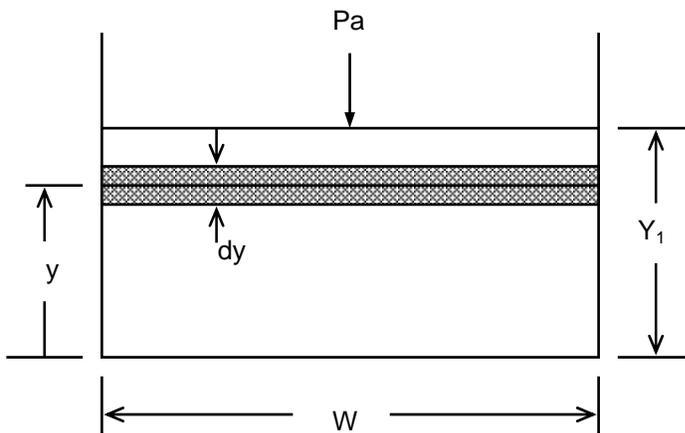
La cara lateral izquierda del volumen de control soporta una fuerza total ( $F_{L1}$ ), dada por:

$$F_{L1} = P_a h_1 W + \int_0^{Y_1} [P_a + \rho g (Y_1 - y)] W dy + P_a h_3 W \quad (18)$$

donde  $P_a$  es la presión atmosférica y  $\rho g(Y_1 - y)$  es la presión hidrostática que se ejerce sobre un elemento diferencial de área como el señalado en la Figura 5.

Por analogía, la cara lateral derecha del volumen de control soporta una fuerza total ( $F_{LD}$ ), dada por:

$$F_{LD} = - \left\{ P_a h_4 W + \int_0^{Y_2} [P_a + \rho g (Y_2 - y)] W dy + P_a h_6 W \right\} \quad (19)$$



**Figura 5. Vista lateral del canal en la sección de entrada al resalto hidráulico.**

Dado que no existen otras fuerzas significativas actuando sobre el volumen de control (por ejemplo, se desprecian las fuerzas viscosas que actúan sobre el cauce de la corriente y las fuerzas gravitacionales debidas a la pendiente del ducto), la combinación de las ecuaciones (18) y (19), después de simplificar, permite obtener:

$$\sum F_x = F_{L1} + F_{LD} = \int_0^{Y_1} \rho g(Y_1 - y)W dy - \int_0^{Y_2} \rho g(Y_2 - y)W dy \quad (20)$$

Al ejecutar las integrales de la ecuación (20) resulta:

$$\sum F_x = \frac{\rho g W}{2} [Y_1^2 - Y_2^2] \quad (21)$$

La aplicación de la ley de conservación de masa al volumen de control puede resumirse en:

$$m = \rho V_1 Y_1 W = \rho V_2 Y_2 W \quad (22)$$

Por lo tanto, al sustituir las ecuaciones (21) y (22) en la ecuación (17), después de reorganizar y simplificar, resulta:

$$\frac{g}{2} [Y_1^2 - Y_2^2] + Y_1 V_1^2 - Y_2 V_2^2 = 0 \quad (23)$$

De la ecuación (22) se obtiene:

$$V_1 = V_2 \frac{Y_2}{Y_1} \quad (24)$$

que al sustituir en la ecuación (23) brinda:

$$\frac{g}{2} [Y_1^2 - Y_2^2] + Y_2 V_2^2 \left[ \frac{Y_2}{Y_1} - 1 \right] = 0 \quad (25)$$

de donde se deriva:

$$\frac{V_2^2}{gY_2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{Y_1}{Y_2} \right] \left[ \frac{Y_1}{Y_2} + 1 \right] \quad (26)$$

Sustituyendo  $V_2$  de la ecuación (24), en la ecuación (26) se llega a:

$$\frac{V_1^2}{gY_1} = \frac{1}{2} \left[ \frac{Y_2}{Y_1} \right] \left[ 1 + \frac{Y_2}{Y_1} \right] \quad ((27)$$

Si se hace evidente la observación de que el nivel del líquido siempre se incrementa a través de un resalto hidráulico ( $Y_2 > Y_1$ ), las ecuaciones (26) y (27) pueden presentarse así:

$$\frac{V_2^2}{gY_2} < 1 \quad \text{y} \quad \frac{V_1^2}{gY_1} > 1 \quad (28)$$

lo cual permite concluir que el flujo aguas arriba debe tener una velocidad suficientemente grande y una profundidad pequeña, de modo que:

$$V_1 > \sqrt{gY_1} \quad (29)$$

y el flujo resulta ser **supercrítico**, dado que se traslada más rápido que las ondas gravitatorias en la interfase líquido-aire.

La ecuación (28) permite concluir, también, que el flujo aguas abajo satisface:

$$V_2 < \sqrt{gY_2} \quad (30)$$

por lo que se caracteriza como **subcrítico**.

Tomando como referencia la ecuación (27), puede escribirse:

$$Y_R^2 + Y_R - 2N_{FR1}^2 = 0 \quad (31)$$

siendo  $Y_R = Y_2/Y_1$ .

La raíz, con significado físico, resultante de solucionar la ecuación cuadrática (31) es:

$$Y_R = \frac{Y_2}{Y_1} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8N_{FR1}^2}}{2} \quad (32)$$

con lo cual se observa que la relación entre las profundidades  $Y_1$  y  $Y_2$ , denominadas "conjugadas" o "secuentes", depende sólo del  $N_{FR}$  antes del resalto. Se espera, en consecuencia, que otras relaciones de interés como la pérdida de carga relativa producida durante el resalto y su propia longitud relativa ( $L/Y_2$ ) sean, también, dependientes de  $N_{FR1}$ . En efecto, esta última relación se ha encontrado que responde bien a la siguiente correlación:

$$\frac{L}{Y_2} = 5 \left[ 1 - \frac{1}{Y_R} \right] = \psi(N_{FR1}) \quad (33)$$

**1.2.1 Pérdidas de carga.** En relación con la Figura 4, puede establecerse un balance de energía mecánica entre las secciones 1 y 2 con el propósito de determinar la pérdida de energía  $\Delta E_{1-2}$  (pérdida de carga) ocasionada por el resalto. Si, como ocurre

en el caso de esta práctica, se desprecia el efecto del cambio de nivel por la pendiente del canal, el balance de energía permite obtener:

$$\Delta E_{1,2} = \Delta E_{\text{RESALTO}} = Y_1 - Y_2 + \frac{1}{2g}(V_1^2 - V_2^2) \quad (34)$$

Tomando como referencia la ecuación (32), en la cual se sustituye  $N^2_{FR,1}$  por la relación  $V_1^2/gY_1$ , puede establecerse que:

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{Y_1}{4} [(Y_2/Y_1)^2 + Y_2/Y_1] \quad (35)$$

Por otra parte, de la ecuación (24) puede derivarse:

$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{V_1^2}{2g} (Y_1/Y_2)^2 \quad (36)$$

Al sustituir las ecuaciones (35) y (36) en la ecuación (34), después de realizar los pasos algebraicos pertinentes se obtiene:

$$\Delta E_{\text{RESALTO}} = \frac{(Y_2 - Y_1)^3}{4 Y_1 Y_2} \quad (37)$$

**1.2.2 Fuerza específica.** La ecuación (23) puede presentarse así:

$$\frac{Y_1^2}{4} + \frac{Y_1 V_1^2}{2g} = \frac{Y_2^2}{4} + \frac{Y_2 V_2^2}{2g} \quad (38)$$

Como quiera que la "cabeza de velocidad" puede representarse, en cualquier sección transversal de un canal como:

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (39)$$

la ecuación (38) deriva en:

$$\frac{A_1 Y_1}{2} + \frac{Q^2}{gA_1} = \frac{A_2 Y_2}{2} + \frac{Q^2}{gA_2} \quad (40)$$

La ecuación (40) es dimensionalmente homogénea y cada término tiene dimensiones de fuerza por peso específico de fluido (dimensiones de Volumen o L<sup>3</sup>). Puede, en consecuencia, asociarse una fuerza específica (Fs) a cada sección transversal, una vez se especifique el gasto o flujo volumétrico; así, para un canal con geometría rectangular donde A = WY, resulta:

$$Fs = \frac{W Y_1^2}{2} + \frac{Q^2}{gW Y_1} = \frac{W Y_2^2}{2} + \frac{Q^2}{gW Y_2} \quad (41)$$

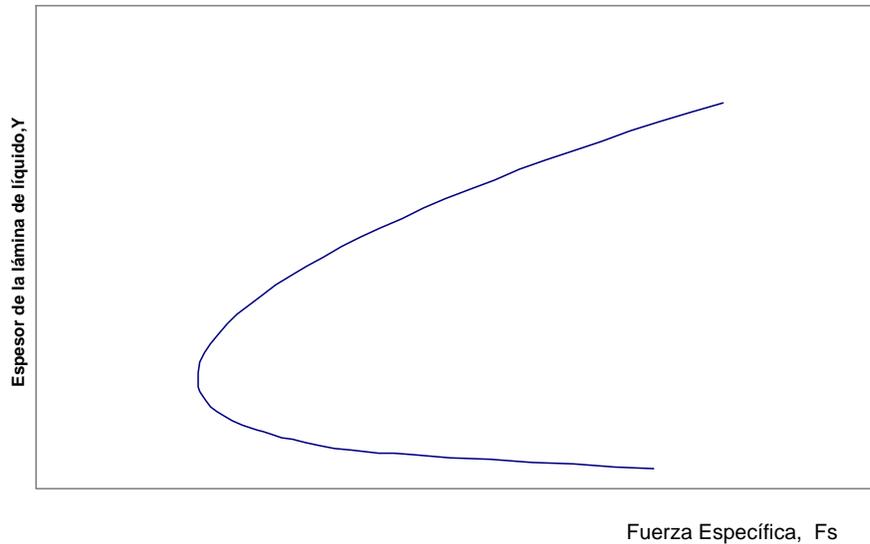


Figura 6 Curva de Fuerza Específica

La representación gráfica de la ecuación (41) puede observarse en la Figura 6.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 GENERALES.

- Estudiar experimentalmente el flujo en un canal rectangular y reafirmar los conceptos básicos relacionados con las leyes de conservación de materia, energía y cantidad de movimiento.
- Estudiar experimentalmente el resalto hidráulico en un canal rectangular y verificar la validez de las relaciones teóricas y empíricas que lo describen.

### 2.2 ESPECIFICOS.

- Dibujar, para cada uno de los ensayos realizados, la línea de energía. Tomar como referencia los piezómetros 15 (inicial) y 35 (final).
- Construir, para el flujo volumétrico de trabajo, la Curva de Energía Específica. Con base en los datos obtenidos ( $Y_1$ ,  $Y_2$ ) para los resaltos establecidos, evaluar la pérdida de energía que éstos ocasionan.
- Verificar la validez de la ecuación (37) y estimar el estado crítico ( $Y_c$ ,  $E_m$ ).
- Establecer la exactitud que brinda la ecuación (33) y verificar la validez de la ecuación (32).

- Construir, para el flujo volumétrico de trabajo, la Curva de Fuerza Específica. Con base en los datos obtenidos, verificar la validez de la ecuación (41).
- Establecer, en el intervalo de trabajo, una correlación matemática que ajuste la pérdida de carga adimensional en el resalto ( $\Delta E_{\text{RESALTO}}/E_1$ ) en función del Número de Froude al inicio del Resalto ( $N_{FR, 1}$ ).

### **3. INSTALACION Y EQUIPOS**

La instalación donde se verifica la práctica se encuentra ubicada en el segundo nivel del laboratorio de Hidráulica y comprende un conjunto de líneas de flujo, equipos de medida, elementos para regulación de caudales y para modificar parámetros geométricos y de flujo. Actualmente, en dichas instalaciones se realizan dos prácticas complementarias, a saber: "Flujo a través de una compuerta" y "Flujo en canal rectangular con resalto hidráulico".

Los principales elementos constitutivos de la instalación son:

- Válvula que permite regular el caudal circulante.
- Tanque de aquietamiento y compuerta desplazable que da paso hacia el canal rectangular.
- Tablero de piezómetros conectados al fondo del canal y a la pared de la compuerta.
- Medidor de aguja montado sobre un carro desplazable a lo largo del canal, utilizado para determinar la profundidad de la capa de agua en el canal, a cualquier posición longitudinal.
- Medidor de cotas horizontales, empleado para determinar la longitud del resalto.
- Manija regulable, colocada al final del canal, que permite conformar el resalto y desplazarlo a lo largo del mismo.
- Tanque volumétrico, con cinta desplazable articulada al nivel del agua en el mismo, lo cual permite determinar el flujo volumétrico con ayuda de cronómetro.

Las especificaciones más significativas de la instalación son:

- Ancho del canal ( $W$ ) = 31.35 cm.
- Longitud por unidad de volumen (cinta del tanque volumétrico) =  $5 \text{ cm/m}^3$

#### 4. PROCEDIMIENTO.

- Ajustar la altura de la compuerta en 2 cm y realizar las lecturas iniciales de los piezómetros (13 a 35).
- Abrir la válvula que permite el ingreso de agua a la instalación y ajustar su apertura de manera que el nivel alcanzado en el tanque anterior a la compuerta sea lo más alto posible, sin permitir, bajo ninguna circunstancia, que se presente rebosamiento.
- Regular la cortina ubicada al final del canal, con el objeto de conformar el resalto hidráulico, preferiblemente, en la zona central del mismo.
- Identificar la localización del inicio y finalización del resalto, utilizando como ayuda el goteo de material coloreado (tinta, por ejemplo).
- Registrar, con ayuda del medidor de punzón y la reglilla auxiliar, las alturas de las capas de agua ( $Y_1$  y  $Y_2$ ) y las cotas horizontales ( $L_1$  y  $L_2$ ), en las secciones de inicio y finalización del resalto.
- Manipular la palanca que conduce el agua al tanque volumétrico y registrar el tiempo ( $\theta$ ) que transcurre mientras la cinta experimenta un desplazamiento de 1 cm.

- Regresar la palanca del tanque volumétrico a su posición original.
- Registrar las lecturas piezométricas ( 13 a 35).
- Ajustar la altura de la compuerta en 2.5 cm y repetir el procedimiento desde 4.3 hasta 4.8.
- Repetir el procedimiento desde 4.3 hasta 4.8, con ajustes de la altura de la compuerta en 3, 3.5 y 4 cm.
- Cerrar la válvula de entrada de agua y ajustar la altura de la compuerta en 2 cm.

#### **BIBLIOGRAFIA**

1. Evett, J. B. & Liu Ch. **Fundamentals of Fluid Mechanics**. McGraw Hill. New York, 1987
2. Fay J. A. **Mecánica de Fluidos**. CECSA. Primera Edición. México, 1996.
3. Fox, R. W. & McDonald, A. T. **Introducción a la Mecánica de Fluidos**. McGraw Hill. Cuarta Edición. México, 1995.
4. Streeter, V. **Mecánica de los Fluidos**. McGraw Hill. Octava Edición. México, 1988.

## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS I

### TABLA DE DATOS

### RESALTO HIDRAULICO

LECTURA PIEZOMETROS	INICIALES	ABERTURA DE LA COMPUERTA				
		2 cm	2.5 cm	3 cm	3.5 cm	4 cm
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
33						
34						
35						
<b>TANQUE DE AFORO ( 5 cm = 1 m<sup>3</sup> )</b>						
Lectura inicial (cm)						
Lectura final (cm)						
Tiempo (minutos)						
<b>CARACTERISTICAS DEL RESALTO</b>						
Altura (Y <sub>1</sub> ) cm						
Altura (Y <sub>2</sub> ) cm						
Longitud (L) cm						

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 11

# CONDUCCION



EQUIPO DE CONDUCCIÓN

## OBJETIVOS

- A) Mediante un diagrama temperatura-longitud para cada una de las unidades, determinar el gradiente de temperaturas entre los diferentes metales y sus respectivas uniones.
- B) Determinar el calor total suministrado por la unidad generadora de calor y el calor suministrado a cada unidad.
- C) Determinar la conductividad térmica para cada uno de los metales utilizados en la práctica.

- D) Determinar la resistencia térmica de los diferentes metales y las resistencias térmicas de contacto.
- E) Determinar la resistencia térmica de cada unidad.
- F) Determinar las pérdidas de calor en cada unidad a través del aislamiento

## PROCEDIMIENTO

- 1) Se selecciona la temperatura a la cual debe trabajar el sistema generador de calor.
- 2) Suministrar agua a cada una de las unidades. El flujo debe ser pequeño para permitir un gradiente apreciable de temperatura para el agua.
- 3) Se conecta el sistema y se deja por un período no inferior a 5 horas, al final de las cuales la estabilización del sistema puede ser verificada mediante los tiempos de prendido y apagado en la unidad generadora. Cada tiempo que dura prendido el equipo debe ser igual al del siguiente período.
- 4) Una vez que ha sido verificada la estabilización del equipo se conecta un termómetro digital a éste, se selecciona la unidad sobre la cual se han de tomar las mediciones y mediante el selector de termopares (1 a 12) se anotan cada una de las temperaturas, y los demás datos.
- 5) Una vez finalizada la práctica se suspende la alimentación de energía, se aumenta el flujo de agua de enfriamiento y se deja éste por un tiempo prudente para permitir un enfriamiento gradual del equipo.

## EQUIPO

El equipo está formado de los siguientes elementos:

- 1) **Unidad Generadora de Calor.** Está constituida por una resistencia eléctrica que debe ser conectada a una red de 110 voltios, sin sobrepasar el límite de temperatura indicado por el equipo en el controlador. Esta unidad también viene equipada con un voltímetro y un amperímetro.
- 2) **Unidad de Prueba N° 1.** Está formada por tres barras de 2 pulgadas de diámetro de los siguientes materiales: acero inoxidable, cobre y SAE 10-20.

Al final de la unidad existe un dispositivo de intercambio térmico que utiliza como medio de enfriamiento agua.

- 3) **Unidad de Prueba N° 2.** La construcción es idéntica a la unidad anterior pero los materiales son acero inoxidable, aluminio y latón 60-40.
- 4) **Termopares.** Son del tipo hierro-constantán y están colocados sobre cada unidad con separación de 2 pulgadas.
- 5) **Elementos auxiliares.** Termómetro digital, termómetros, cronómetros, probeta de 1000 cm<sup>3</sup>, etc.

## CALCULOS

A) Construir un gráfico para cada unidad de la temperatura indicada por los termopares en función de la posición de los mismos. Determinar a partir del gráfico el  $\Delta T$  para cada uno de los metales y para las uniones entre ellos.

B) Balance térmico en las unidades I y II.

$$Q_T = V I \times \frac{T_p}{T_p + T_a} \quad (1)$$

$$Q_T = Q_I + Q_{II} \quad (2)$$

donde:

$Q_T$  = Flujo total de calor total generado por el equipo.

$Q_I$  = Flujo de calor transferido a la unidad I

$Q_{II}$  = Flujo de calor transferido a la unidad II

$T_p$  = tiempo de prendido

$T_a$  = tiempo de apagado

Para cada unidad y en la sección de acero inoxidable, se tiene:

$$Q_I = K_{\text{acero}} \cdot A \cdot [\Delta T / \Delta X]_I$$

$$Q_{II} = K_{\text{acero}} \cdot A \cdot [\Delta T / \Delta X]_{II}$$

Reemplazando en (2):

$$Q_T = K_{\text{acero}} \cdot A \cdot [\Delta T / \Delta X]_I + K_{\text{acero}} \cdot A \cdot [\Delta T / \Delta X]_{II}$$

$$Q_T = K_{\text{acero}} \cdot A \cdot [(\Delta T / \Delta X)_I + (\Delta T / \Delta X)_{II}]$$

$$K_{\text{acero}} = \frac{Q_T}{A [(\Delta T / \Delta X)_I + (\Delta T / \Delta X)_{II}]}$$

Una vez obtenido el  $K_{\text{acero}}$  se calculan los calores  $Q_I$  y  $Q_{II}$ .

C) Conocidos los calores  $Q_I$  y  $Q_{II}$ , se calculan las conductividades térmicas empleando la fórmula:

$$K = Q / A (\Delta T / \Delta X)$$

El resultado de los cálculos anteriores se compara con los valores dados en la literatura.

D) Para calcular la resistencia térmica de los metales y la resistencia térmica de contacto se emplean las siguientes relaciones:

$$Q = K \cdot A \cdot (\Delta T / \Delta X)$$

$$Q = \Delta T / R$$

donde: R = resistencia térmica

$$R = \Delta T / Q = \Delta X / k \cdot A$$

E) La resistencia térmica de cada unidad se calcula por la fórmula:

$$R = \sum R_i$$

F) En la determinación de pérdidas en cada unidad es necesario calcular la cantidad de calor transferida a cada unidad así:

$$Q = m C_p \Delta T$$

donde:

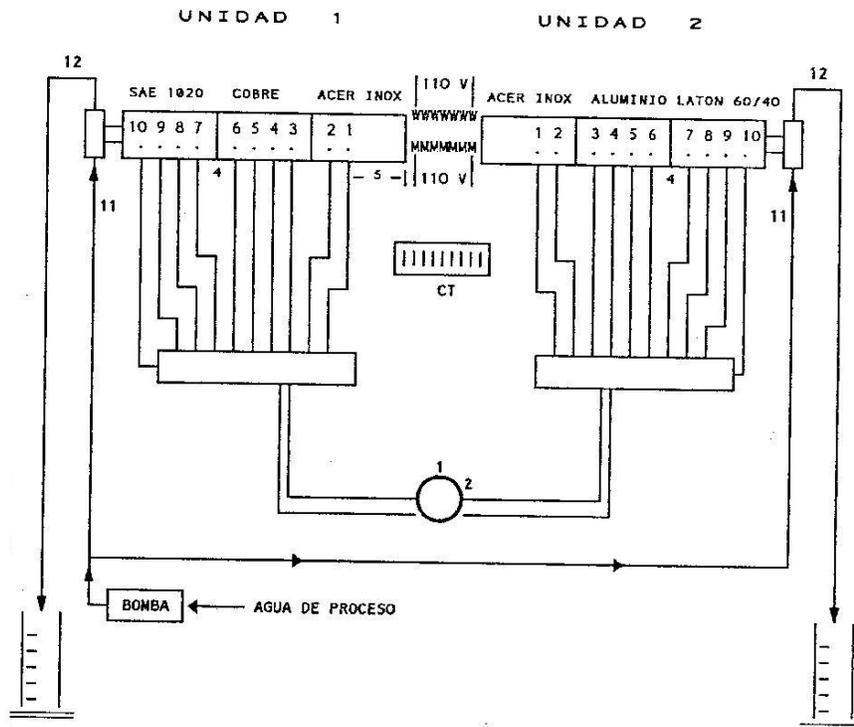
$m$  = flujo de masa de agua utilizado para disipar el calor al final de la unidad.

$C_p$  = calor específico del agua.

$\Delta T$  = diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del agua.  
Termopares 11 y 12 o la diferencia medida con los termómetros.

Este calor se relaciona con el calculado en el literal B y se determinan las pérdidas.

## DIAGRAMA DE FLUJO EQUIPO DE CONDUCCION



LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS I I

TABLA DE DATOS : PRACTICA 11

CONDUCCION

	UNIDAD 1	UNIDAD 2
TEMPERATURA UNIDAD GENERADORA (°C)		
VOLTIOS		
AMPERIOS		
TIEMPO DE PRENDIDO ( segundos )		
TIEMPO DE APAGADO ( segundos )		
FLUJO DE AGUA (cm <sup>3</sup> / mi )		
TEMPERATURA ENTRADA DEL AGUA (°C)		
TEMPERATURA SALIDA DEL AGUA (°C)		
LECTURA DE TERMOPARES °C	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	
	11	
	12	

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_ M \_\_\_ A \_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 12

# CONVECCION LIBRE



## OBJETIVOS

- A) Realizar el balance de energía y determinar sus pérdidas.
- B) Para los datos obtenidos determinar el tipo de convección dada en la práctica, utilizando para ello los criterios de la literatura.
- C) Utilizando las ecuaciones apropiadas determine los coeficientes de película teóricos para el agua y para el vapor.

- D) Comparar los coeficientes obtenidos en el literal anterior con los datos dados por la literatura.
- E) Determine los coeficientes de película prácticos para el agua y el vapor.
- F) Representar gráficamente el  $\log(Nu)$  vs  $\log[(Gr)(Pr)]$  y desarrollar una ecuación empírica aproximada mediante una técnica de ajuste.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Hacer una revisión del equipo y establecer las válvulas que deben estar abiertas y las que deben permanecer cerradas.
- 2) Colocar la escala de medida para el nivel cero.
- 3) Con el tanque de alimentación abierto a la atmósfera, abrir lentamente V-9 hasta obtener un nivel constante en dicho tanque. El flujo a través del tubo de prueba es nulo, lo cual se puede evidenciar porque apenas asoma una pequeña gota de agua por la salida de éste.
- 4) Con la válvula de purga V-10 abierta, suministrar vapor muy lentamente cuidando de no sobrepasar en nivel indicado por el manómetro de agua colocado en la parte superior del aparato.
- 5) Cuando la purga ha sido suficiente y hay seguridad que no existen gases no condensables dentro de la cámara de vapor, se cierran simultáneamente V-1 y V-10 e inmediatamente se regula la presión con V-1 guiados por el manómetro de agua.
- 6) El equipo está ahora trabajando con un suministro de vapor a presión atmosférica y el flujo que se establece obedece únicamente a la convección libre. Mientras el sistema se estabiliza debe conectarse el termómetro digital al selector de termopares.
- 7) Cuando el sistema está estable, lo cual se evidencia porque la temperatura de salida del agua no cambia, se anotan los valores indicados en la tabla de datos.
- 8) Para un segundo ensayo se modifica la posición de la escala de medida y se ajustan nuevamente la alimentación de agua V-9 y V-1.

- 9) Para apagar el equipo se suspende primero el vapor, se abre la purga y luego de 15 minutos se suspende el suministro de agua.

## EQUIPO

El equipo Modelo 9054 diseñado por Scott para prácticas en sistemas de convección libre y forzada consta de las siguientes partes:

1) **Tanque de alimentación constante.** Consta de un tubo de vidrio de 15.25 cm de diámetro exterior y 14.28 cm de altura. La tubería de drenaje es ajustable en un intervalo de 8.1 cm.

2) **Cámara de prueba.** Consta de una cámara tubular de vidrio para el vapor, de 12.7 cm de diámetro exterior y 91.44 cm de altura que encierra un tubo de cobre de diámetro nominal 12.7 mm (15.875 mm OD y 1.016 mm de espesor). La longitud de prueba de éste tubo es de 60.96 cm.

3) **Termopares en la sección de prueba.** Dos para la medición de la temperatura de pared y otros dos para la entrada y salida del agua.

4) Termómetro digital, recipiente de condensado, probeta graduada, termómetro y cronómetro.

5) Tuberías y válvulas dispuestas según el diagrama de flujo.

## CALCULOS

A) Para realizar el balance de energía en el equipo se procede en la siguiente forma:

$$Q_V = m_V \cdot h_{fg}$$

$Q_V$  = Flujo de calor cedido por el vapor

$m_V$  = flujo de condensado

$h_{fg}$  = entalpía de condensación a la presión de la cámara de vapor.

$$Q_A = m_A \cdot C_p \cdot (T_4 - T_1)$$

$Q_A$  = Flujo de calor tomado por el agua

$m_A$  = flujo de agua

$T_1$  = temperatura de entrada del agua

$T_4$  = temperatura de salida del agua.

$C_p$  = calor específico del agua.

Una vez realizados los cálculos anteriores se determinan las pérdidas de calor en el equipo, así:

$$Q_V = Q_A + Q_p$$

$Q_p$  = Flujo de calor perdido.

B) Para determinar el tipo de convección y si se trata de convección libre en régimen laminar o turbulento se calcula primero el número de Grashof:

$$Gr = \frac{g \beta D^3 (T_w - T_a) \rho^2}{\mu^2}$$

donde:

$g$  = aceleración de la gravedad

$\beta$  = coeficiente de expansión volumétrica del fluido.

$$\beta = \frac{G_1^2 - G_4^2}{2 G_1 G_4 (T_4 - T_1)}$$

$G_1$  = gravedad específica del agua a  $T_1$

$G_4$  = gravedad específica del agua a  $T_4$

$D$  = diámetro del tubo

$T_w$  = temperatura media de la pared del tubo.

$$T_w = [(T_2 + T_3) / 2]$$

$T_a$  = temperatura media del fluido.

$$T_a = [(T_1 + T_4) / 2]$$

$\mu$  = viscosidad absoluta del fluido.

Se calcula ahora el número de Reynolds:

$$Re = \frac{D.G}{\mu}$$

$G = m / A =$  velocidad másica

$m =$  flujo de masa

$A =$  área de flujo

$\mu =$  viscosidad absoluta

Si  $(Gr / Re^2)$  es  $> 1.0$  la convección es libre.

Si  $(Gr / Re^2)$  es  $< 1.0$  la convección es combinada.

Se calcula ahora el número de Prandtl:

$$Pr = C_p \mu / k$$

$k =$  conductividad térmica del fluido.

$\mu =$  viscosidad absoluta

$C_p =$  capacidad calorífica

Se calcula ahora el número de Nusselt por la ecuación:

$$Nu = C (Gr.Pr)^n$$

Para régimen laminar:

$$(Gr.Pr) = 10^4 \text{ a } 10^9$$

$$Nu = 0.59 (Gr.Pr)^{1/4}$$

Para régimen turbulento:

$$(Gr.Pr) = 10^9 \text{ a } 10^{13}$$

$$Nu = 0.1 (Gr.Pr)^{1/3}$$

Las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura de película ( $T_f$ ).

$$T_f = (T_w + T_a) / 2$$

C) Cálculo de los coeficientes de película teóricos:

Para convección libre en un tubo vertical donde el agua circula por el tubo y se calienta mediante vapor saturado, se tiene:

$$Nu = \frac{h_i D_i}{k} = C (Gr.Pr)^n$$

$h_i$  = coeficiente de película teórico interior.

$D_i$  = diámetro interior.

$k$  = conductividad térmica del agua.

$C, n$  = constantes.

Para el vapor saturado que se condensa en el exterior del tubo vertical, el coeficiente de película teórico exterior  $h_o$  se determina mediante la siguiente fórmula empírica para condensación laminar tipo película:

$$h_o = 1.13 \left( \frac{g \rho_L^2 h_{fg} k_L^3}{\mu_L \Delta T_o L} \right)^{0.25}$$

donde:

$$\Delta T_o = (T_v - T_w)$$

$T_v$  = temperatura del vapor.

$T_w$  = temperatura de pared.

$g$  = aceleración de la gravedad.

$\rho_L$  = densidad del condensado a  $T_f$

$h_{fg}$  = entalpía de vaporización.

$k_L$  = conductividad térmica del condensado a  $T_f$ .

$\mu_L$  = viscosidad del condensado a  $T_f$ .

$L$  = longitud del tubo

La ecuación anterior es válida para  $Re$  en la película menores de 1800. Cuando el número de Reynolds en la película es mayor de 1800, el cual se calcula por la ecuación:

$$Re = \frac{4 \sigma}{\mu_L} = \frac{4 m}{\pi D \mu_L}$$

$\sigma$  = flujo de condensado por unidad perimetral del tubo.  
 $\mu_L$  = viscosidad del condensado a  $T_f$ .  
 $m$  = flujo de condensado.  
 $D$  = diámetro exterior del tubo.

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_o = 0.0076 Re^{0.4} \left\{ \frac{\rho_L g k_L^3 (\rho_L - \rho_V)}{\mu_L^2} \right\}^{0.33}$$

D) Los valores calculados anteriormente deben compararse con los datos dados en la literatura.

E) Los coeficientes de película prácticos se calculan de la siguiente forma:

Para el agua:

$$h_i = \frac{Q_A}{A_i (T_w - T_a)}$$

$A_i$  = área interior del tubo =  $\pi D_i L$   
 $T_w$  = temperatura media de pared.  
 $T_a$  = temperatura media del fluido.  
 $Q_A$  = Flujo de calor tomado por el agua.

Para el vapor:

$$h_o = \frac{Q_V}{A_o (T_V - T_w)}$$

$Q_v$  = Flujo de calor cedido por el vapor.

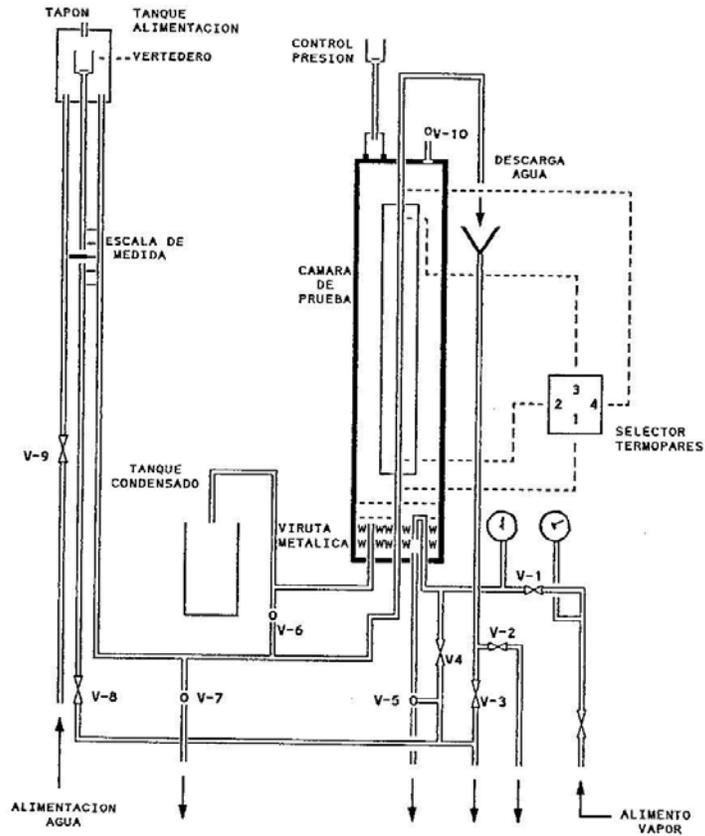
$T_v$  = temperatura del vapor saturado.

$A_o$  = área exterior del tubo =  $\pi D_o L$

F) En un papel logaritmico graficar el número de Nusselt en función del producto Gr.Pr. y mediante la pendiente y el intersecto calcular las constante C y n en la ecuación:

$$Nu = C (Gr.Pr)^n$$

## DIAGRAMA DE FLUJO EQUIPO DE CONVECCION



LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS II

TABLA DE DATOS : PRACTICA 12

CONVECCION LIBRE

DATOS			POSICION DE LA ESCALA			
			1	2	3	4
TEMPERATURA ENTRADA DE AGUA	$T_1$	$^{\circ}\text{C}$				
TEMPERATURA PARED INFERIOR	$T_2$	$^{\circ}\text{C}$				
TEMPERATURA PARED SUPERIOR	$T_3$	$^{\circ}\text{C}$				
TEMPERATURA SALIDA DE AGUA	$T_4$	$^{\circ}\text{C}$				
TEMPERATURA DE CONDENSADO	$T_c$	$^{\circ}\text{C}$				
FLUJO DE AGUA	$m_A$	$\text{cm}^3/\text{mi}$				
FLUJO DE CONDENSADO	$m_v$	$\text{cm}^3/\text{mi}$				

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 13

# CONDENSACION TIPO GOTA Y TIPO PELICULA



## OBJETIVOS

- A) Efectuar el balance de energía y determinar las pérdidas por radiación en el sistema.
- B) Determinar los coeficientes de película prácticos, interior y exterior. Comparar los resultados anteriores para condensación en película con los obtenidos mediante las fórmulas empíricas.

- C) Determinar el coeficiente total de transferencia de calor  $U$  tanto práctico como teórico.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Se abre la válvula V-0 que permite la entrada al sistema de agua fría y por medio del rotámetro se controla el flujo de entrada.
- 2) Se abren las válvulas V-3 y V-2 para dar paso de agua a través del tubo cromado.
- 3) Desalojar el condensado en la tubería de suministro de vapor, operando lentamente la válvula S-1 que se encuentra en la parte posterior del equipo.
- 4) Abrir la válvula S-2 para dar paso de vapor a la cámara y simultáneamente abrir la válvula V-6 que se encuentra en la parte superior de la cámara para evacuar el aire contenido en ésta. Abra también la válvula de drenaje C-1 que permite el desalojo de condensado que se pueda encontrar retenido en la cámara por efecto de una práctica anterior.
- 5) Una vez purgada la cámara cierre las válvulas V-6 y C-1. Empiece a controlar la presión dentro de la cámara por intermedio del piezómetro situado cerca a V-6. La columna de agua no debe pasar de 2 pulgadas y una presión en el manómetro de  $2 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ . El vidrio de la cámara debe permanecer completamente cristalino.
- 6) Comenzar a tomar los datos, cuando el sistema se encuentre en equilibrio, lo cual se consigue midiendo la temperatura de salida del tubo T-3 hasta que el indicador digital de la temperatura no varíe al realizar medidas con un intervalo de tiempo de 30 segundos.
- 7) Una vez alcanzado el equilibrio del sistema, procedemos a medir las temperaturas por medio del selector de los termopares. La especificación de temperaturas es la siguiente:

$T_1$  = temperatura del agua a la entrada del tubo cromado.

$T_2$  = temperatura media de la pared del tubo cromado.

$T_3$  = temperatura del agua a la salida del tubo cromado.

$T_7$  = temperatura a la entrada de la cámara de condensación.

$T_8$  = temperatura de la pared interna de la cámara a la salida.

8) El flujo de condensado se mide en una probeta graduada que existe para tal fin, tomando un tiempo de un minuto y por lo menos tres veces para poder promediar un valor. Medir también la temperatura del condensado.

9) Terminado el proceso para el tubo cromado, se pasa con el mismo flujo al tubo negro en la siguiente forma:

Se abre la válvula de entrada de agua fría al tubo negro V-1 y posteriormente la válvula de salida del agua V-4.

Se cierra la válvula de entrada de agua al tubo cromado V-2 y su respectiva válvula de salida de agua V-3. Esta secuencia de abrir y cerrar las válvulas se tiene que hacer así, ya que no se pueden dejar en ningún momento los tubos sin flujo de agua.

10) Medir las temperaturas para este tubo así:

$T_4$  = temperatura del agua a la entrada del tubo.

$T_5$  = temperatura media de la pared del tubo negro.

$T_6$  = temperatura del agua a la salida del tubo negro.

$T_7$  = temperatura a la entrada de la cámara de condensación.

$T_8$  = temperatura de la pared interna de la cámara de salida.

Medir además el flujo de condensado desalojado así como su temperatura.

11) Terminada la práctica, cerrar las válvulas S-1 y V-0 y verificar que el equipo quede tal como se encontró.

## EQUIPO

1) Cámara de condensación.

Está localizada en la parte superior del equipo y consiste básicamente de una caja metálica dispuesta horizontalmente, provista en su parte frontal de un vidrio que nos permite observar los fenómenos de condensación que se suceden dentro de ella. Esta cámara contiene dos tubos, uno cromado completamente liso que se emplea para estudiar la condensación por goteo y otro denominado "tubo negro", el cual por su mayor rugosidad permite que el vapor se condense en forma de película.

Las dimensiones de los tubos son las siguientes:

Diámetro interior ( $D_i$ ) = 0.5 pulgadas

Longitud ( $L$ ) = 36 pulgadas.

La cámara posee en la parte superior una válvula que permite evacuar el aire con la ayuda del vapor suministrado. Cerca a esta válvula se halla localizado un piezómetro para controlar la presión del vapor dentro de la cámara de condensación. Existe además una tubería de entrada de vapor y drenaje de condensado.

2) Rotámetro.

Hay un rotámetro dispuesto para la medición del flujo de agua fría (gal/mi) suministrada al tubo cromado o al tubo negro.

3) Selector de termopares.

Es un interruptor múltiple que permite seleccionar los diferentes termopares (cromel-alumel) para determinar las temperaturas de entrada y salida del agua de los tubos localizados en el interior de la cámara, la temperatura media en los tubos, la temperatura del vapor en la cámara, y la temperatura en la pared exterior del tubo.

4) Para la práctica se requiere el uso de un cronómetro y una probeta graduada para determinar el caudal de condensado. Además se requiere un termómetro para conocer la temperatura del condensado una vez haya sido evacuado de la cámara y un termómetro digital para conectarlo a la caja selectora de termopares.

## CALCULOS

A) El balance de energía alrededor de cada tubo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$Q_v = Q_a + Q_p$$

donde:

$Q_v$  = Flujo de calor cedido por el vapor de agua =  $m_v (h_e - h_s)$

$m_v$  = flujo de vapor.

La entalpía  $h_e$  puede tomarse como la entalpía de vapor saturado a la presión de entrada a la cámara y la entalpía  $h_s$  como la entalpía de líquido sub-enfriado a la temperatura de salida del condensado. Esta última entalpía puede tomarse como la entalpía de líquido saturado a la temperatura del condensado.

$$Q_a = \text{Flujo calor tomado por el agua} = m_a C_p (t_s - t_e)$$

$m_a$  = flujo de agua.

Las temperaturas  $t_s$  y  $t_e$  son las temperaturas de salida y entrada respectivamente.

$Q_p$  = Flujo de calor perdido en el equipo.

B) El coeficiente de película práctico interior  $h_i$  se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$h_i = \frac{Q_a}{A_i (T_p - T_f)}$$

$Q_a$  = Flujo de calor ganado por el agua de enfriamiento.

$A_i$  = área interior del tubo =  $\pi D_i L$

$T_p$  = temperatura media de la pared del tubo.

$T_f$  = temperatura media del agua.

$L$  = longitud del tubo.

El coeficiente de película práctico exterior se calcula por la siguiente fórmula:

$$h_e = \frac{Q_v}{A_e (T_v - T_p)}$$

$Q_v$  = Flujo de calor cedido por el vapor.

$A_e$  = área exterior del tubo. =  $\pi D_e L$

$T_v$  = temperatura del vapor saturado.

$T_p$  = temperatura media de la pared del tubo.

Para determinar los coeficientes de película teóricos las siguientes ecuaciones pueden aplicarse en condensación de vapores tipo película.

Para flujo laminar:

Se determina el número de Reynolds por la ecuación:

$$Re = \frac{4 \Gamma_H}{\mu_L}$$

$\Gamma_H$  = flujo másico de condensado por unidad de longitud en la parte inferior del tubo.  
=  $m_c/L$

En el presente caso (tubo horizontal) la transición de régimen laminar a turbulento ocurre a números de Reynolds alrededor de 3600 debido a que la película de condensado entre ambos lados del tubo se junta en el fondo del tubo.

Si el flujo es laminar como se espera en ésta práctica se utiliza la ecuación para calcular el coeficiente de película exterior:

$$h_o = 0.725 \left\{ \frac{g \rho_L (\rho_L - \rho_V) h_{fg} k_L^3}{\mu_L D (T_S - T_w)} \right\}^{1/4}$$

donde:

$g$  = aceleración de la gravedad.

$h_{fg}$  = entalpía de condensación.

$k_L$  = conductividad térmica del líquido.

$\rho_L, \rho_V$  = densidad del líquido y el vapor.

$\mu_L$  = viscosidad del líquido.

$D$  = diámetro exterior del tubo.

$T_S$  = temperatura de saturación.

$T_w$  = temperatura de pared.

Las propiedades del líquido se determinan a la temperatura media.

Para determinar el coeficiente de película teórico interior  $h_i$  se utilizan las ecuaciones empíricas para convección forzada dentro de tubos.

Para régimen laminar dentro de un tubo en el que la temperatura de la pared es constante puede utilizarse:

$$\frac{h_i D_i}{k} = 3.66 + \frac{0.0668 (D_i/L) (Re)(Pr)}{1 + 0.04 [(D_i/L) (Re) (Pr)]^{2/3}}$$

$L$  = longitud del tubo.

Todas las propiedades del fluido se determinan a la temperatura media.

Para régimen turbulento puede utilizarse la ecuación:

$$\frac{h_i D_i}{k} = 0.023 (Re)^{0.8} (Pr)^n$$

$n = 0.4$  para calentamiento.

En la ecuación anterior  $h_i$  es el coeficiente de película teórico interior, el cual se puede aplicar cuando las diferencias de temperatura son pequeñas, para  $Pr$  entre 0.7 y 100,  $Re$  mayores de 10000 y  $L/D$  mayor de 60. Las propiedades del fluido se determinan a la temperatura media.

Si la diferencia de temperaturas entre la pared del tubo y el fluido es grande, puede utilizarse la ecuación de Sieder y Tate:

$$\frac{h_i D_i}{k} = 0.027 (Re)^{0.8} (Pr)^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14}$$

$\mu$  = viscosidad del fluido a la temperatura media.

$\mu_w$  = viscosidad del fluido a la temperatura de pared del tubo.

$k$  = conductividad térmica del fluido dentro del tubo.

Esta ecuación es aplicable para  $Pr$  entre 0.7 y 16700,  $Re$  mayor de 10000 y  $L/D$  mayor de 60.

Las propiedades del fluido se toman a la temperatura media de éste.

Nota: Para condensación en gota no hay una correlación empírica para calcular los coeficientes de película y sólo puede decirse que los coeficientes de película son de cinco a diez veces mayores, pero el coeficiente total de transferencia de calor entre el vapor y el agua es de dos a tres veces mayor.

C) Los coeficientes totales pueden determinarse así:

$$U_{\text{práctico}} = \frac{Q}{A \cdot \Delta T}$$

$\Delta T$  = diferencia media de temperaturas entre el vapor y el agua.

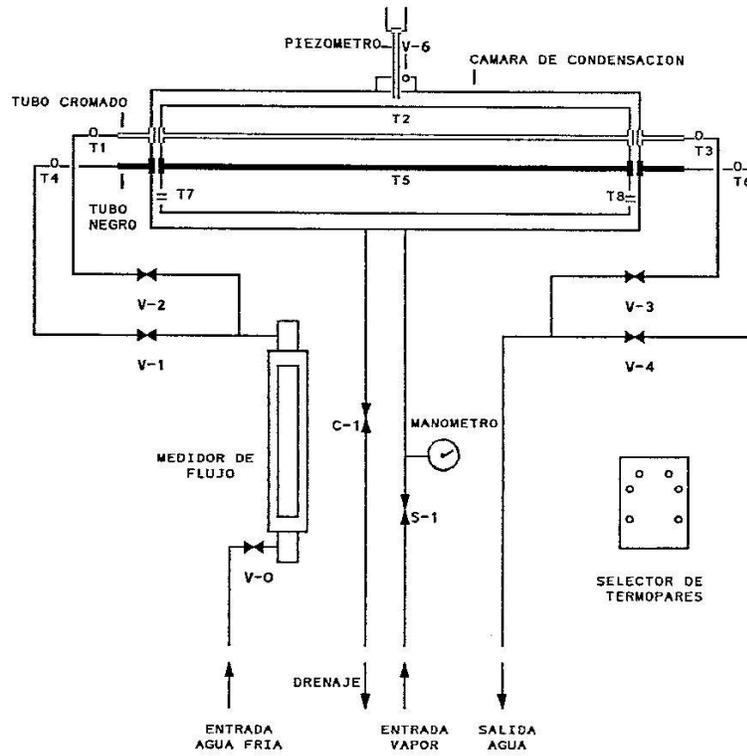
A = área exterior del tubo.

Q = Flujo de calor cedido por el vapor.

$$U_{\text{teórico}} = \frac{1}{(1/h_i)(D_e/D_i) + (1/h_o)}$$

## DIAGRAMA DE FLUJO

### EQUIPO DE CONDENSACION EN GOTA Y PELICULA



## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS II

## TABLA DE DATOS : PRACTICA 13

## CONDENSACION EN GOTA Y PELICULA

<b>ENSAYO DE CONDENSACION TUBO CROMADO</b>			
FLUJO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO		gal/mi	
VOLUMEN DE CONDENSADO		cm <sup>3</sup>	
TIEMPO DE ENSAYO		s	
TEMPERATURA DE ENTRADA DEL AGUA	T <sub>1</sub>	°C	
TEMPERATURA MEDIA DE LA PARED	T <sub>2</sub>	°C	
TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA	T <sub>3</sub>	°C	
TEMPERATURA IZQUIERDA PARED DE CAMARA	T <sub>7</sub>	°C	
TEMPERATURA DERECHA PARED DE CAMARA	T <sub>8</sub>	°C	

<b>ENSAYO DE CONDENSACION TUBO NEGRO</b>			
FLUJO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO		gal/mi	
VOLUMEN DE CONDENSADO		cm <sup>3</sup>	
TIEMPO DE ENSAYO		s	
TEMPERATURA DE ENTRADA DEL AGUA	T <sub>4</sub>	°C	
TEMPERATURA MEDIA DE LA PARED	T <sub>5</sub>	°C	
TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA	T <sub>6</sub>	°C	
TEMPERATURA IZQUIERDA PARED DE CAMARA	T <sub>7</sub>	°C	
TEMPERATURA DERECHA PARED DE CAMARA	T <sub>8</sub>	°C	

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 14

# INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS CONCENTRICOS



INTERCAMBIADOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS

## OBJETIVOS

- A) Realizar el balance de energía del intercambiador, tanto en la sección de calentamiento, como en la sección de enfriamiento. Determinar las pérdidas por radiación del sistema.
- B) Elaborar una gráfica de temperatura vs longitud para todo el intercambiador.
- C) Determinar la diferencia media logarítmica de temperaturas (LMTD) considerando dos intercambiadores: vapor-aceite y agua-aceite.

- D) Determinar los coeficientes de película para cada uno de los intercambiadores: vapor-aceite y agua-aceite.
- E) Determinar los coeficientes globales de transferencia de calor para los dos intercambiadores.
- F) Calcular el factor de suciedad ( $R_d$ ) combinado.
- G) Comparar los coeficientes obtenidos con los suministrados en la literatura.

### PROCEDIMIENTO

- 1) Revisión de equipo. Ver si las válvulas correspondientes están cerradas o están abiertas.
- 2) Colocar los termómetros.
- 3) Poner el agua de refrigeración en circulación abriendo la válvula correspondiente y mantener un valor constante indicado por el rotámetro. Este valor será dado a conocer por el profesor al comienzo de la práctica.
- 4) Prender la bomba.
- 5) Abrir la válvula que controla el flujo de aceite lentamente hasta obtener un valor indicado por el rotámetro. Este valor también será indicado por el profesor al comienzo de la práctica.
- 6) Abrir la válvula que da paso al vapor hasta un valor de presión que será fijado al iniciar la práctica y se mantendrá constante.
- 7) Permitir la estabilización del equipo.
- 8) Tomar los datos indicados en la correspondiente tabla de datos.
- 9) Suspender el funcionamiento del equipo utilizando la siguiente secuencia: cerrar la válvula que da paso al vapor, cerrar la válvula que da paso al aceite, apagar la bomba, esperar mínimo 10 minutos y cerrar la válvula que controla el flujo de agua; recoger los termómetros.

## EQUIPO

1) Intercambiador de tubos concéntricos con cuatro horquillas.

Material de construcción: cobre

Tubos internos DI = 0.995 pulgadas  
DE = 1.125 pulgadas

Tubos externos: DI = 1.481 pulgadas  
DE = 1.625 pulgadas

Longitud de cada Tubo = 111 pulgadas

2) Bomba centrífuga.

3) Depósito de aceite.

4) Rotámetro para agua y aceite.

5) Trampas de vapor, válvulas de control de flujo y termómetros.

6) Caldera de vapor DISTRAL. Las especificaciones deben ser consultadas en el laboratorio e incluidas en el informe final.

## CALCULOS

A) El balance de energía para cada una de las secciones de calentamiento se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_V = Q_{ac} + Q_p$$

donde:

$Q_V$  = Flujo de calor entregado por el vapor =  $m_V \cdot (h_s - h_e)$

$h_e$  = entalpía del vapor a la entrada.

$h_s$  = entalpía del líquido a la salida.

$Q_{ac}$  = Flujo de calor tomado por el aceite =  $m_{Ac} C_p (T_s - T_e)$

$T_e$  = temperatura del aceite a la entrada.

$T_s$  = temperatura del aceite a la salida.

$Q_p$  = Flujo de calor perdido.

El balance de energía para la sección de enfriamiento se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{Ac} = Q_a + Q_p$$

donde:

$$Q_{Ac} = \text{Flujo de calor entregado por el aceite} = m_{Ac}C_p(T_s - T_e)$$

$$Q_a = \text{Flujo de calor tomado por el agua} = m_aC_p(T_s - T_e)$$

$$Q_p = \text{Flujo de calor perdido.}$$

B) Construir en el papel adecuado una gráfica de temperatura en función de la longitud para toda la sección de calentamiento y para la sección de enfriamiento.

C) La diferencia media logarítmica de temperatura en cada sección de calentamiento se calcula así:

$T_1 = T_2 =$  temperatura de saturación del vapor de agua a la presión de trabajo.

$$\Delta t_1 = T_2 - t_1 \quad \text{y} \quad \Delta t_2 = T_1 - t_2$$

$$LMTD = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln (\Delta t_1 / \Delta t_2)}$$

$t_1 =$  temperatura de entrada del fluido frío.

$t_2 =$  temperatura de salida del fluido frío.

El valor anterior es igual si se calcula suponiendo paralelo o contracorriente. La diferencia media logarítmica de temperatura en la sección de enfriamiento suponiendo flujo en contracorriente se calcula así:

$$\Delta t_1 = T_2 - t_1 \quad \text{y} \quad \Delta t_2 = T_1 - t_2$$

$$LMTD = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln (\Delta t_2 / \Delta t_1)}$$

$T_1 =$  temperatura de entrada fluido caliente.

$T_2$  = temperatura de salida del fluido caliente.

$t_1$  = temperatura de entrada del fluido frío.

$t_2$  = temperatura de salida del fluido frío.

D) Cálculo de los coeficientes de película para el aceite, el agua. y el vapor

1) Temperaturas calóricas ( $T_c$  y  $t_c$ ).

Para fracciones del petróleo o hidrocarburos viscosos las temperaturas calóricas pueden calcularse por las siguientes fórmulas:

$$T_c = T_2 + F_c (T_1 - T_2)$$

$$t_c = t_1 + F_c (t_2 - t_1)$$

$F_c$  se determina con un gráfico como lo indica Kern.

Si los líquidos no son muy viscosos, no más de 1.0 centipoises, si el intervalo de temperaturas no excede de 50 a 100°F y si la diferencia de temperaturas es menor de 50°F, la media aritmética entre  $T_1$ ,  $T_2$  y entre  $t_1$ ,  $t_2$  puede utilizarse en lugar de las temperaturas calóricas para la evaluación de las propiedades físicas. Para fluidos no viscosos  $\phi = (\mu / \mu_w)^{0.14}$  puede tomarse como 1.0.

2) Coficiente de película para el aceite (tubo interior).

$$\text{Area de flujo} = a_p = \pi D^2/4$$

$D$  = diámetro interno del tubo interior.

$$\text{Velocidad másica} = G_p = m_{Ac} / a_p$$

$m_{Ac}$  = flujo de masa del aceite.

$$(Re)_p = \frac{D G_p}{\mu}$$

$\mu$  = viscosidad a la temperatura calórica.

A partir de la figura dada por Kern, se determina:

$$j_H = (h_i D / k) (C\mu / k)^{-1/3} (\mu / \mu_w)^{-0.14}$$

Se calcula ahora:

$$(C\mu/k)^{1/3} \text{ y } (\mu/\mu_w)^{0.14}$$

$C$ ,  $\mu$ ,  $k$  : se determinan a la temperatura calórica.

$\mu_w$  : se determina a la temperatura de pared.

Se despeja  $h_i$  y se corrige para obtener  $h_{io}$  mediante la fórmula:

$$h_{io} = h_i (DI/DE)$$

$h_{io}$  = coeficiente de película referido al diámetro exterior.

DI = diámetro interno

DE = diámetro externo.

### 3) Coficiente de película para el agua (ánulo).

$$\text{Area de flujo} = a_a = \pi (D_2^2 - D_1^2) / 4$$

$D_2$  = diámetro interno del tubo exterior.

$D_1$  = diámetro externo del tubo interior.

$$\text{Velocidad másica} = G_a = m_a / a_a$$

$m_a$  = flujo de masa de agua.

$$(Re)_a = \frac{D_e G_a}{\mu}$$

$D_e$  = diámetro equivalente

$$D_e = \frac{4 \times \text{área de flujo}}{\text{perímetro húmedo}} = \frac{(D_2^2 - D_1^2)}{D_1}$$

$\mu$  = viscosidad del agua a la temperatura media.

A partir de la figura dada por Kern se calcula  $j_H$ .

El coeficiente de película para el agua será:

$$h_o = j_H (k / D_e) (C\mu / k)^{1/3} (\mu / \mu_w)^{0.14}$$

4) Coeficiente de película para el vapor en la sección de calentamiento.

Como la medición de la temperatura de pared no es posible en este equipo, la siguiente fórmula debe utilizarse:

$$T_w = T_a + \frac{h_o}{h_{io} + h_o} (T_s - T_a)$$

$T_a$  = temperatura media del fluido frío.

Para el cálculo anterior puede suponerse un valor adecuado del coeficiente de película ( $h_o$ ) para el vapor de agua de 1500 BTU/h.pie<sup>2</sup>.°F.

Se utiliza la ecuación de Nusselt para condensación laminar tipo película sobre la superficie de un tubo horizontal:

$$h_o = 0.725 \left\{ \frac{g \rho_L (\rho_L - \rho_v) h_{fg} k^3}{\mu_L (T_s - T_w) D} \right\}^{0.25}$$

donde:

- g = aceleración de la gravedad.
- $\rho_L$  = densidad del condensado a  $T_s$ .
- $\rho_v$  = densidad del vapor a  $T_s$ .
- $T_s$  = temperatura de saturación del vapor.
- $T_w$  = temperatura de pared del tubo.
- $h_{fg}$  = entalpía de condensación.
- k = conductividad térmica del líquido a  $T_s$ .
- $\mu_L$  = viscosidad del condensado a  $T_s$ .
- D = diámetro exterior del tubo.

E) Coeficiente global limpio  $U_C$ .

$$U_C = \frac{h_{i_o} \cdot h_o}{h_{i_o} + h_o}$$

Coefficiente de diseño  $U_D$ .

$$U_D = \frac{Q}{A \cdot \Delta t}$$

$Q$  = Flujo de calor transferido en el intercambiador.

$A$  = área total de transferencia de calor.

$$A = \pi (DE) L$$

$DE$  = diámetro externo del tubo interno.

$L$  = longitud total del intercambiador.

$\Delta t$  = diferencia media logaritmica de temperatura.

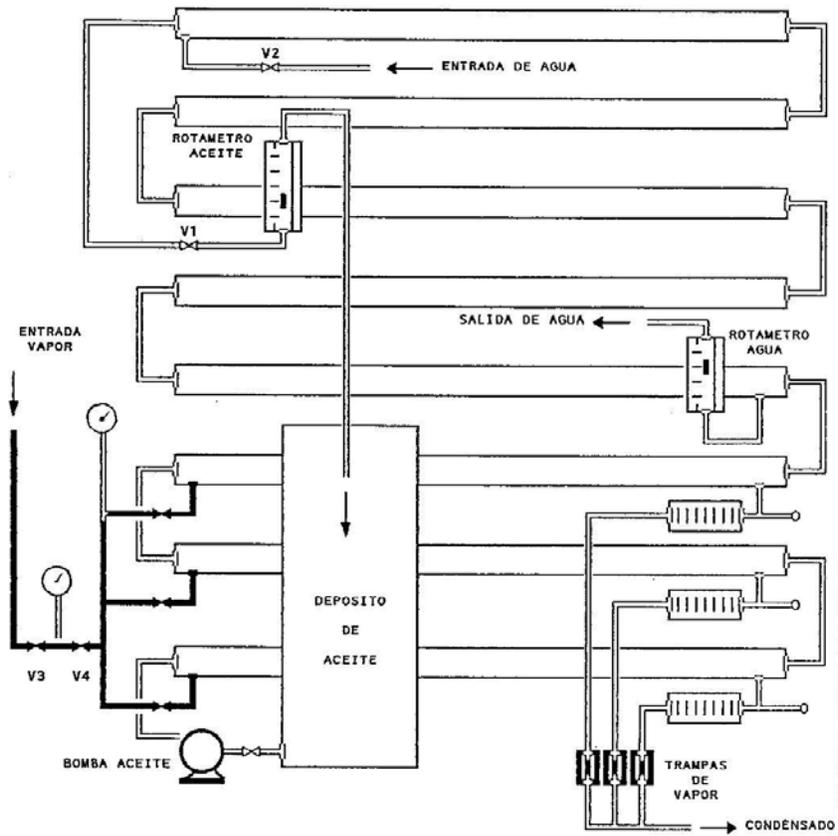
F) Factor de suciedad ( $R_d$ ) combinado.

$$R_d = \frac{U_C - U_D}{U_C \cdot U_D}$$

G) Los coeficientes obtenidos deben compararse con los dados en la literatura.

## DIAGRAMA DE FLUJO

### INTERCAMBIADORES DE TUBOS CONCENTRICOS



LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS II

TABLA DE DATOS : PRACTICA 14

INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS CONCENTRICOS

<b>PRESION DEL VAPOR DE AGUA ( psig )</b>				
<b>LECTURA DEL ROTAMETRO DE AGUA</b>				
<b>LECTURA DEL ROTAMETRO DE ACEITE</b>				

<b>SECCION DE CALENTAMIENTO</b>	<b>TEMPERATURAS DEL ACEITE (°C)</b>			
ENTRADA PRIMERA SECCION				
SALIDA PRIMERA SECCION				
ENTRADA SEGUNDA SECCION				
SALIDA SEGUNDA SECCION				
ENTRADA TERCERA SECCION				
SALIDA TERCERA SECCION				

<b>SECCION DE ENFRIAMIENTO</b>	<b>TEMPERATURAS (°C)</b>			
ENTRADA ACEITE				
SALIDA ACEITE				
ENTRADA AGUA				
SALIDA AGUA				

<b>TEMPERATURA DE CONDENSADO (°C)</b>				
PRIMERA SECCION				
SEGUNDA SECCION				
TERCERA SECCION				

<b>FLUJO DE CONDENSADO (cm<sup>3</sup>/mi)</b>				
PRIMERA SECCION				
SEGUNDA SECCION				
TERCERA SECCION				

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 15

# INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA



INTERCAMBIADOR DE TUBOS Y CORAZA

## OBJETIVOS

Para cada uno de los intercambiadores calcular:

A) El balance de energía y las pérdidas de calor.

- B) La diferencia media logaritmica de temperaturas (LMTD) en cada intercambiador.
- C) Los coeficientes de película para el fluido caliente y el fluido frío.
- D) El coeficiente global limpio  $U_C$  y el coeficiente global de diseño  $U_D$ .
- E) El factor de suciedad  $R_d$ .

## PROCEDIMIENTO

- 1) Revisión del equipo. Ver si las válvulas correspondientes están cerradas o están abiertas.
- 2) Abrir las válvulas del primer intercambiador y colocar los termómetros.
- 3) Poner en circulación el agua de proceso y el agua de enfriamiento mediante las válvulas que correspondan y fijar los flujos indicados por el profesor.
- 4) Poner en circulación el vapor mediante la válvula correspondiente y fijar la presión en el valor indicado por el profesor. Este valor debe mantenerse constante durante toda la práctica.
- 5) Purgar el calentador utilizando la válvula de purga.
- 6) Permitir la estabilización del equipo.
- 7) Tomar los datos indicados en la correspondiente tabla de datos.
- 8) Abrir las válvulas correspondientes al siguiente intercambiador y cerrar las del anterior.
- 9) Permitir la estabilización de equipo.
- 10) Tomar los datos indicados en la tabla de datos.
- 11) Suspender el funcionamiento luego de concluir la toma de datos en los cuatro intercambiadores utilizando la siguiente secuencia: cerrar la válvula que da paso al vapor, abrir todas las válvulas y la purga y retirar los termómetros.

12) Luego de diez (10) minutos cerrar las válvulas que dan entrada al agua.

## EQUIPO

1) Cuatro intercambiadores de tubo y coraza tipo 1-4.

Material de construcción: cobre.  
Diámetro interno de la coraza = 4 pulg  
Número de tubos por paso = 11  
Arreglo: cuadrado  
Paso por los tubos = 7/16 pulg  
Longitud de los tubos = 35.25 pulg  
Diámetro interno del tubo = 0.25 pulg  
Diámetro externo del tubo = 3/8 pulg

El número de baffles para cada intercambiador es el siguiente:

1 - cinco baffles (5)  
2 - nueve baffles (9)  
3 - quince baffles (15)  
4 - veintiun baffles (21)

2) Calentador de agua horizontal que utiliza vapor de agua.

3) Rotámetros para agua de proceso y agua de enfriamiento. Las curvas de calibración deben obtenerse en el laboratorio.

4) Válvulas para control de flujo.

5) Termómetros.

6) Trampa de vapor.

## CALCULOS

A) Balance de energía para el intercambiador:

$$Q_{ac} = Q_{af} + Q_p$$

donde:

$Q_{ac}$  = Flujo de calor entregado por el agua caliente =  $m_{ac} C_p (T_s - T_e)$

$Q_{af}$  = Flujo de calor tomado por el agua fría =  $m_{af} C_p (t_s - t_e)$

$Q_p$  = Flujo de calor perdido.

$m_{ac}$  = flujo de masa de agua caliente.

$m_{af}$  = flujo de masa de agua fría.

$T_e, t_e$  = temperaturas de entrada.

$T_s, t_s$  = temperaturas de salida.

B) El LMTD se calcula mediante la fórmula:

$$\text{LMTD} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln (\Delta t_1 / \Delta t_2)}$$

$$\Delta t_1 = T_2 - t_1 \quad \text{y} \quad \Delta t_2 = T_1 - t_2$$

$T_1$  = temperatura de entrada fluído caliente.

$T_2$  = temperatura de salida del fluído caliente.

$t_1$  = temperatura de entrada del fluído frío.

$t_2$  = temperatura de salida del fluído frío.

C) Cálculo del coeficiente de película para el fluído caliente (tubos).

$$a_t = \text{área de flujo} \frac{N_t a'_t}{n}$$

$N_t$  = número de tubos

$a'_t$  = área de flujo de cada tubo

$n$  = número de pasos en los tubos.

$$G_t = \text{velocidad másica} = m_{ac} / a_t$$

$$\text{Re}_t = D G_t / \mu$$

$\mu$  = viscosidad del agua caliente a la temperatura media.

Con el factor (L/D) utilizando el gráfico dado por Kern se calcula  $j_H$ .

L = longitud de los tubos

D = diámetro interior de los tubos.

A la temperatura media del agua se calculan C,  $\mu$ , k.

$$h_i = j_H (k/D)(C\mu/k)^{1/3} \phi_i$$

$$\phi = (\mu/\mu_w) = 1$$

$$h_{i0} = h_i (DI/DE)$$

DI = diámetro interior del tubo.

DE = diámetro exterior del tubo.

Cálculo del coeficiente de película para el fluido frío (coraza).

$$a_s = \text{área de flujo} = \frac{DI \cdot C'B}{P_T}$$

DI = diámetro interior de la coraza

C' = distancia entre tubos.

B = espacio entre baffles.

$$G_s = \text{velocidad másica} = m_{af} / a_s$$

$$Re_s = D_e G_s / \mu$$

$\mu$  = viscosidad del fluido evaluada a la temperatura media.

$D_e$  = diámetro equivalente

$$D_e = \frac{4 \times \text{área libre}}{\text{perímetro húmedo}}$$

$$D_e = \frac{4 \times (P_T^2 - \pi d_o^2/4)}{\pi d_o}$$

$P_T$  = paso entre tubos.

$d_o$  = diámetro exterior del tubo.

A partir del diagrama dado por Kern se obtiene  $j_H$ .

$$h_o = j_H (k/D_e) (C\mu/k)^{1/3} \phi$$

A la temperatura media del agua se calcula  $k$ ,  $C$ ,  $\mu$ . Para este caso  $\phi = 1$ .

D) Coeficiente global limpio  $U_C$ .

$$U_C = \frac{h_{io} \cdot h_o}{h_{io} + h_o}$$

Coeficiente de diseño  $U_D$ .

$$U_D = \frac{Q}{A \cdot \Delta t}$$

$Q$  = Flujo de calor transferido en el intercambiador.

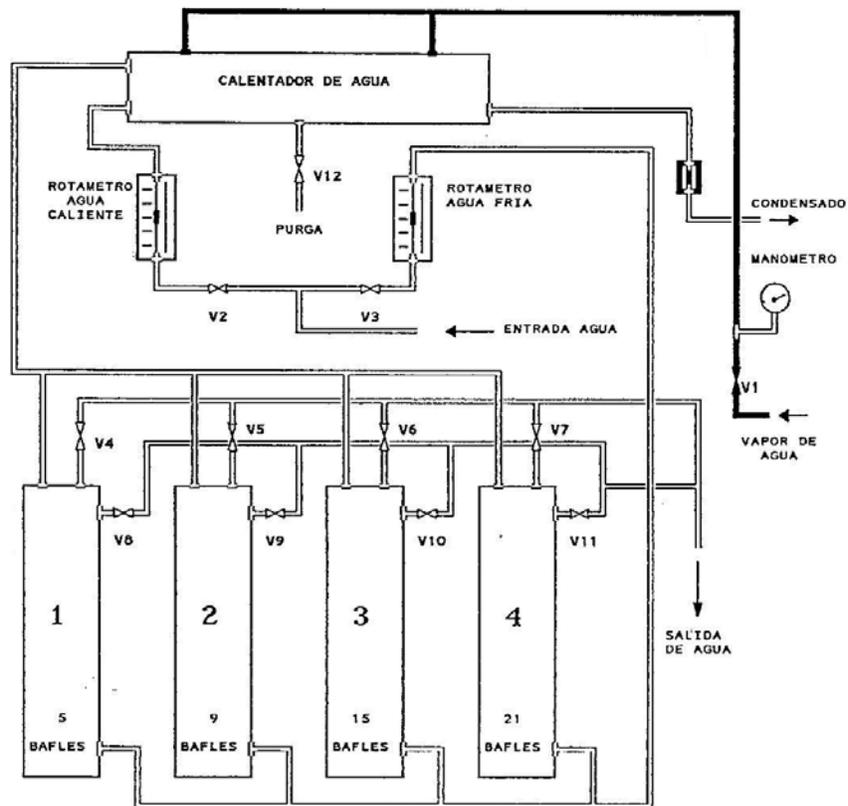
$A$  = área total de transferencia de calor.

$\Delta t$  = diferencia media logaritmica de temperatura.

E) Factor de suciedad ( $R_d$ ) combinado.

$$R_d = (U_C - U_D) / (U_C \cdot U_D)$$

## DIAGRAMA DE FLUJO INTERCAMBIADORES DE TUBO Y CORAZA



## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS II

### TABLA DE DATOS : PRACTICA 15

#### INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBO Y CORAZA

<b>PRESION DEL VAPOR DE AGUA ( psig )</b>				
<b>LECTURA ROTAMETRO DE AGUA FRIA</b>				
<b>LECTURA ROTAMETRO AGUA CALIENTE</b>				

<b>INTERCAMBIADOR 1</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>			
<b>ENTRADA AGUA FRIA</b>				
<b>SALIDA AGUA FRIA</b>				
<b>ENTRADA AGUA CALIENTE</b>				
<b>SALIDA AGUA CALIENTE</b>				

<b>INTERCAMBIADOR 2</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>			
<b>ENTRADA AGUA FRIA</b>				
<b>SALIDA AGUA FRIA</b>				
<b>ENTRADA AGUA CALIENTE</b>				
<b>SALIDA AGUA CALIENTE</b>				

<b>INTERCAMBIADOR 3</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>			
<b>ENTRADA AGUA FRIA</b>				
<b>SALIDA AGUA FRIA</b>				
<b>ENTRADA AGUA CALIENTE</b>				
<b>SALIDA AGUA CALIENTE</b>				

<b>INTERCAMBIADOR 4</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>			
<b>ENTRADA AGUA FRIA</b>				
<b>SALIDA AGUA FRIA</b>				
<b>ENTRADA AGUA CALIENTE</b>				
<b>SALIDA AGUA CALIENTE</b>				

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 16

# EVAPORACION CON UN EFECTO



CONJUNTO DE EVAPORADORES

## OBJETIVOS

- A) En papel milimetrado construir un gráfico para cada una de las evaporaciones, de la masa de condensado de vapor vivo y de la masa de condensado del vapor producido en función del tiempo.
- B) Realizar el balance de energía completo para el evaporador y establecer las pérdidas de calor.
- C) Determinar la economía de la evaporación.

D) Determinar el coeficiente global aparente de transferencia de calor.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Revisión del equipo. Para cumplir con los objetivos propuestos ver qué válvulas deben permanecer cerradas y cuáles abiertas.
- 2) Colocar una caneca para recolección de condensado sobre una balanza.
- 3) Abrir la válvula que da paso de agua a la bomba de vacío y conectar la bomba hasta obtener la presión de vacío deseada. Hay que verificar si efectivamente hay paso de agua por la bomba.
- 4) Alimentar vapor de agua y mantener la presión constante durante la práctica en el valor indicado por el profesor.
- 5) Cuando la temperatura del agua se aproxima al punto de ebullición esperado para la presión seleccionada, suministrar agua de refrigeración al condensador (válvula de entrada) abriendo más o menos media vuelta. La cantidad de agua dependerá de la temperatura del condensado.
- 6) Cuando el sistema esté estable, anotar los datos solicitados.
- 7) Llevar el equipo a presión atmosférica, apagando la bomba de vacío, y abriendo muy lentamente la válvula que comunica el tanque de condensado con la atmósfera.
- 8) Estabilizar nuevamente el equipo y tomar los datos correspondientes.
- 9) Suprimir la alimentación de vapor, cerrando la válvula correspondiente.
- 10) Luego de algunos minutos, cerrar la válvula de agua de refrigeración del condensador (entrada).
- 11) Tarar el tanque de condensado.

## EQUIPO

- 1) Evaporador de tubos horizontales. El área de transferencia de calor está formada por 22 tubos de cobre de 48 cm de longitud útil y cuyos diámetros interno y externo son de 35 y 39.5 mm respectivamente.
- 2) Condensador.
- 3) Bomba de vacío.
- 4) Caneca y tanque para condensados.
- 5) Báscula e instrumentos de medida.

## NOMENCLATURA DE DATOS

Los subíndices hacen referencia al diagrama de flujo.

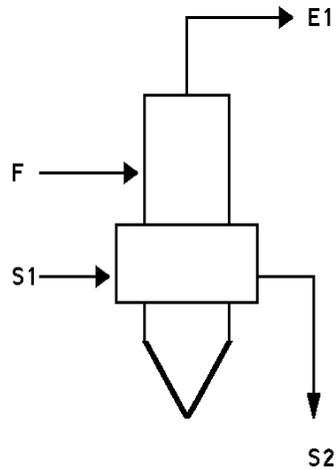
- $P_6$  : presión de vacío en el tanque de recolección (pulg Hg).  
 $P_3$  : presión de vacío en el evaporador (pulg Hg).  
 $P_2$  : presión del vapor de agua alimentado al evaporador (psig).  
 $T_6$  : temperatura de los vapores de cima ( $^{\circ}$ F).  
 $T_4$  : temperatura de salida de condensado de vapor vivo ( $^{\circ}$ C).  
 $T_9$  : temperatura del condensado producido en el evaporador ( $^{\circ}$ C).  
 $T_5$  : temperatura del agua en el evaporador ( $^{\circ}$ F).  
 $m_{S1}$  : masa de vapor de agua (kg).  
 $m_{E1}$  : masa de agua evaporada (kg).  
 $\theta$  : tiempo (mi).  
 $Z$  : altura en el tanque de recolección (cm).  
(m/Z) : tara del tanque (kg/cm).

## CALCULOS

Todos los cálculos hacen referencia al siguiente diagrama de flujo simplificado.

- A) A partir de los gráficos se determina el flujo de condensado de vapor vivo ( $m_s$ ) y el flujo de condensado de vapor producido que corresponde al flujo de

agua alimentada ( $m_F$ ). Cada flujo corresponde a la pendiente de la recta ajustada.



Para determinar el flujo de vapor producido se multiplica la tara del tanque ( $m/Z$ ) por la diferencia de alturas ( $\Delta z$ ) en el tanque durante un intervalo de tiempo ( $\Delta\theta$ ).

B) El balance de energía se determina por la siguiente ecuación:

$$H_F + H_{S1} = H_{E1} + H_{S2} + Q_p$$

donde:

$H_F$  = entalpía total del agua alimentada =  $m_F \cdot h_F$

La entalpía específica  $h_F$  para el agua alimentada se evalúa conociendo la temperatura del agua y tomando la entalpía de líquido saturado ( $h_f$ ) a ésta temperatura.

$H_{S1}$  = entalpía total del vapor vivo alimentado al evaporador.  
=  $m_S \cdot h_{S1}$

La entalpía específica del vapor vivo ( $h_{S1}$ ) se determina suponiendo vapor saturado seco ( $h_g$ ) en función de la presión absoluta de alimentación.

La presión atmosférica ( $P_{atm}$ ) en Santafé de Bogotá es 10.83 psi.

La presión absoluta ( $P_{abs}$ ) se calcula:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man}$$

$P_{man}$  = presión indicada por el manómetro.

$H_{E1}$  = entalpía total del vapor producido =  $m_{E1} \cdot h_{E1}$

La entalpía específica  $h_{E1}$  se calcula suponiendo vapor saturado seco ( $h_g$ ) a la presión absoluta en la cámara de evaporación. Si se está trabajando al vacío la presión absoluta se determina:

$$P_{abs} = P_{atm} - P_v$$

$P_v$  = presión de vacío indicada por el vacuómetro.

$H_{S2}$  = entalpía total del condensado de vapor vivo =  $m_S \cdot h_{S2}$

La entalpía específica  $h_{S2}$  se calcula suponiendo líquido sub-enfriado a la temperatura medida con el termómetro de la línea de condensado a la salida del evaporador. Puede suponerse la entalpía de líquido saturado ( $h_f$ ) a ésta temperatura.

Despejando  $Q_p$  se determina el flujo de calor perdido.

C) La economía de la evaporación se calcula:

$$\text{Economía} = m_{E1}/m_S$$

D) Determinación del coeficiente global aparente.

$$U_D = \frac{Q}{A (\Delta t)_a}$$

$Q$  = Flujo de calor entregado por el vapor vivo =  $m_S (h_{S2} - h_{S1})$

A = área total de transferencia de calor.

$$A = N_t \times L \times \pi \times DE$$

$N_t$  = número de tubos.

L = longitud de los tubos.

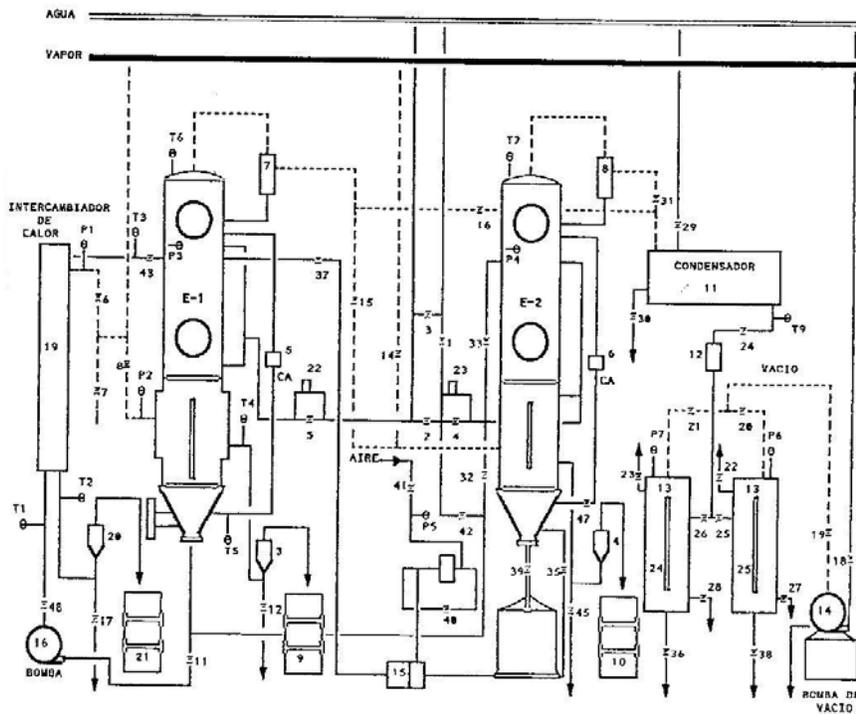
DE = diámetro exterior de cada tubo.

$(\Delta t)_a$  = diferencia aparente de temperatura =  $(T_{S1} - T_{E1})$

$T_{S1}$  = temperatura de saturación del vapor vivo.

$T_{E1}$  = temperatura de saturación a la presión de la cámara de evaporación.

## DIAGRAMA DE FLUJO EQUIPO DE EVAPORACION



## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS II

TABLA DE DATOS : PRACTICA 16

EVAPORACION CON UN EFECTO

<b>ENSAYO 1 - EVAPORACION AL VACIO</b>												
<b>DATOS</b>			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
INTERVALO DE TIEMPO	$\theta$	mi										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 24	$Z_{24}$	cm										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 25	$Z_{25}$	cm										
TEMPERATURA AGUA EVAPORADOR	$T_5$	$^{\circ}\text{C}$										
PRESION DE LA CALDERA	$P_c$	psig										

PRESION DEL VAPOR DE AGUA	$P_2$	psig		TEMPERATURA VAPOR PRODUCIDO	$T_6$	$^{\circ}\text{F}$	
PRESION DE VACIO TANQUE	$P_6$	in Hg		TEMPERATURA CONDENSADO VAPOR	$T_4$	$^{\circ}\text{C}$	
PRESION DE VACIO EVAPORADOR	$P_3$	in Hg		TEMPERATURA SALIDA CONDENSADOR	$T_9$	$^{\circ}\text{C}$	

<b>ENSAYO 2 - EVAPORACION A PRESION ATMOSFERICA (560 mm Hg)</b>												
<b>DATOS</b>			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
INTERVALO DE TIEMPO	$\theta$	mi										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 24	$Z_{24}$	cm										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 25	$Z_{25}$	cm										
TEMPERATURA AGUA EVAPORADOR	$T_5$	$^{\circ}\text{C}$										
PRESION DE LA CALDERA	$P_c$	psig										

PRESION DEL VAPOR DE AGUA	$P_2$	psig		TEMPERATURA VAPOR PRODUCIDO	$T_6$	$^{\circ}\text{F}$	
PRESION DEL EVAPORADOR	$P_3$	psig		TEMPERATURA CONDENSADO VAPOR	$T_4$	$^{\circ}\text{C}$	
TARA TANQUE DE CONDENSADO 24	$Z_{24}$	kg/cm		TARA TANQUE DE CONDENSADO 25	$Z_{25}$	kg/cm	

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 17

# EVAPORACION CON CIRCULACION FORZADA



CONJUNTO DE EVAPORADORES

## OBJETIVOS

- A) En papel milimetrado construir un gráfico para cada una de las evaporaciones, de la masa de condensado de vapor vivo y de la masa de condensado del vapor producido en función del tiempo.
- B) Realizar el balance de energía completo para el evaporador-intercambiador y establecer las pérdidas de calor.

- C) Determinar la economía de la evaporación.
- D) Determinar el coeficiente global de diseño  $U_D$  en el intercambiador.

## PROCEDIMIENTO

- 1) Revisión del equipo. Para cumplir con los objetivos propuestos ver que válvulas deben permanecer cerradas y cuáles abiertas.
- 2) Colocar una caneca para la recolección de condensado sobre una balanza.
- 3) Abrir la válvula que da paso de agua a la bomba de vacío y conectar la bomba hasta obtener la presión de vacío deseada.
- 4) Conectar la bomba de circulación de agua.
- 5) Alimentar vapor de agua y mantener una presión de 15 psig constante durante toda la práctica.
- 6) Cuando la temperatura del agua se aproxime al punto de ebullición esperado para esta presión, suministrar agua de refrigeración al condensador con la válvula de entrada. La cantidad de agua dependerá de la temperatura del condensado.
- 7) Cuando el sistema esté estable, anotar los datos solicitados.
- 8) Disminuir la presión de vacío y permitir nuevamente la estabilización del equipo. Tomar los datos correspondientes a ésta nueva presión.
- 9) Suprimir la alimentación de vapor cerrando la válvula correspondiente.
- 10) Llevar el equipo a presión atmosférica apagando la bomba de vacío y abriendo muy lentamente la válvula que comunica el tanque de condensado con la atmósfera.
- 11) Luego de algunos minutos cerrar la válvula de entrada de agua al condensador.
- 12) Tarar el tanque de condensado.

## EQUIPO

- 1) Primer efecto del sistema.
- 2) Intercambiador de calor con 13 tubos de cobre con las siguientes especificaciones:  $D_o = 1$  pulg, BWG, longitud = 55.125 pulg, arreglo triangular, diámetro de la carcaza = 6 pulg.
- 3) Bomba centrífuga y de vacío.
- 4) Condensador.
- 5) Caneca y tanque de recolección.
- 6) Báscula e instrumentos de medida.

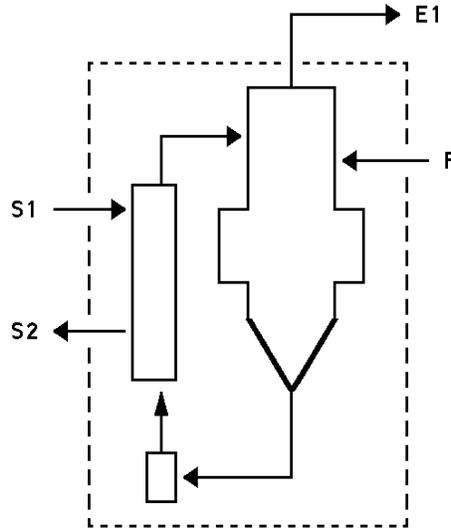
## NOMENCLATURA DE DATOS

Los subíndices hacen referencia al diagrama de flujo.

- $P_6$  : presión de vacío en el tanque de recolección (pulg Hg).
- $P_3$  : presión de vacío en el evaporador (psig).
- $P_1$  : presión del vapor de agua alimentado al intercambiador (psig).
- $T_6$  : temperatura de los vapores de cima ( $^{\circ}$ F).
- $T_5$  : temperatura del agua dentro del evaporador ( $^{\circ}$ F).
- $T_2$  : temperatura de condensado de vapor vivo ( $^{\circ}$ C).
- $T_9$  : temperatura de condensado producido en el evaporador ( $^{\circ}$ C).
- $T_1$  : temperatura de entrada del agua al intercambiador ( $^{\circ}$ F).
- $T_3$  : temperatura de salida del agua del intercambiador ( $^{\circ}$ F).
- $m_{S1}$  : masa de vapor de agua (kg).
- $m_{E1}$  : masa de agua evaporada (kg).
- $\theta$  : tiempo (mi).
- $Z$  : altura en el tanque de recolección de condensado.
- $(m/Z)$  : tara del tanque (kg/cm).

## CALCULOS

Todos los cálculos hacen referencia al siguiente diagrama de flujo simplificado.



A) A partir de los gráficos se determina el flujo de condensado de vapor vivo ( $m_s$ ) y el flujo de condensado de vapor producido que corresponde al flujo de agua alimentada ( $m_F$ ).

Para determinar la masa de vapor producido se multiplica la tara del tanque ( $m/Z$ ) por la diferencia de alturas ( $\Delta z$ ) en el tanque, durante un intervalo de tiempo ( $\Delta \theta$ ).

B) El balance de energía se determina por la siguiente ecuación:

$$H_F + H_{S1} = H_{E1} + H_{S2} + Q_p$$

donde:

$H_F$  = entalpía total del agua alimentada =  $m_F \cdot h_F$

La entalpía específica  $h_F$  para el agua alimentada se evalúa conociendo la temperatura del agua y tomando la entalpía de líquido saturado ( $h_f$ ) a ésta temperatura.

$H_{S1}$  = entalpía total del vapor vivo alimentado al evaporador.  
 $= m_S \cdot h_{S1}$

La entalpía específica del vapor vivo ( $h_{S1}$ ) se determina suponiendo vapor saturado seco ( $h_g$ ) en función de la presión absoluta de alimentación.

La presión atmosférica ( $P_{atm}$ ) en Santafé de Bogotá es 10.83 psi.

La presión absoluta ( $P_{abs}$ ) se calcula:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man}$$

$P_{man}$  = presión indicada por el manómetro.

$H_{E1}$  = entalpía total del vapor producido =  $m_{E1} \cdot h_{E1}$ .

La entalpía específica  $h_{E1}$  se calcula suponiendo vapor saturado seco ( $h_g$ ) a la presión absoluta en la cámara de evaporación. Si se está trabajando al vacío la presión absoluta se determina:

$$P_{abs} = P_{atm} - P_v$$

$P_v$  = presión de vacío indicada por el vacuómetro.

$H_{S2}$  = entalpía total del condensado de vapor vivo =  $m_S \cdot h_{S2}$

La entalpía específica  $h_{S2}$  se calcula suponiendo líquido sub-enfriado a la temperatura medida con el termómetro de la línea de condensado a la salida del intercambiador. Puede suponerse la entalpía de líquido saturado ( $h_f$ ) a ésta temperatura.

Despejando  $Q_p$  se determina el flujo de calor perdido.

C) La economía de la evaporación se calcula:

$$\text{Economía} = m_{E1}/m_S$$

D) La diferencia media logarítmica de temperatura en el intercambiador de calor se calcula así:

$$\Delta t_1 = T_2 - t_1 \quad \text{y} \quad \Delta t_2 = T_1 - t_2$$

$$\text{LMTD} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln (\Delta t_1 / \Delta t_2)}$$

$T_1 = T_2 = T_s$  = temperatura de saturación del vapor de agua a la presión absoluta indicada del vapor dentro del intercambiador.

$t_1$  = temperatura de entrada del agua .

$t_3$  = temperatura de salida del agua.

Coficiente de diseño  $U_D$ :

$$U_D = \frac{Q}{A \cdot \Delta t}$$

$Q$  = Flujo de calor cedido por el vapor =  $m_s (h_{s1} - h_{s2})$

$m_s$  = masa de condensado de vapor vivo.

$A$  = área total de transferencia de calor.

$$A = N_t \times L \times DE \times \pi$$

$N_t$  = número de tubos.

$L$  = longitud de los tubos.

$DE$  = diámetro exterior de cada tubo.

$\Delta t$  = diferencia media logarítmica de temperatura.

## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS II

### TABLA DE DATOS : PRACTICA 17

#### EVAPORACION CON CIRCULACION FORZADA

ENSAYO 1												
DATOS			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INTERVALO DE TIEMPO	$\theta$	mi										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 24	$Z_{24}$	cm										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 25	$Z_{25}$	cm										
TEMPERATURA AGUA EVAPORADOR	$T_5$	$^{\circ}\text{C}$										
PRESION DE LA CALDERA	$P_c$	psig										

PRESION DEL VAPOR DE AGUA	$P_1$	psig		TEMPERATURA VAPOR PRODUCIDO	$T_6$	$^{\circ}\text{F}$	
PRESION DE VACIO TANQUE	$P_6$	in Hg		TEMPERATURA CONDENSADO VAPOR	$T_2$	$^{\circ}\text{F}$	
PRESION DE VACIO EVAPORADOR	$P_3$	in Hg		TEMPERATURA SALIDA CONDENSADOR	$T_9$	$^{\circ}\text{C}$	
TEMPERATURA ENTRADA INTERCAMB.	$T_1$	$^{\circ}\text{F}$		TEMPERATURA SALIDA INTERCAMB.	$T_3$	$^{\circ}\text{F}$	

ENSAYO 1												
DATOS			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INTERVALO DE TIEMPO	$\theta$	mi										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 24	$Z_{24}$	cm										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 25	$Z_{25}$	cm										
TEMPERATURA AGUA EVAPORADOR	$T_5$	$^{\circ}\text{C}$										
PRESION DE LA CALDERA	$P_c$	psig										

PRESION DEL VAPOR DE AGUA	$P_1$	psig		TEMPERATURA VAPOR PRODUCIDO	$T_6$	$^{\circ}\text{F}$	
PRESION DE VACIO TANQUE	$P_6$	in Hg		TEMPERATURA CONDENSADO VAPOR	$T_2$	$^{\circ}\text{F}$	
PRESION DE VACIO EVAPORADOR	$P_3$	in Hg		TEMPERATURA SALIDA CONDENSADOR	$T_9$	$^{\circ}\text{C}$	
TEMPERATURA ENTRADA INTERCAMB.	$T_1$	$^{\circ}\text{F}$		TEMPERATURA SALIDA INTERCAMB.	$T_3$	$^{\circ}\text{F}$	

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N<sup>o</sup> \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_ M \_\_\_ A \_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 18

# EVAPORACION CON DOBLE EFECTO



## OBJETIVOS

- A) En papel milimetrado construir un gráfico para cada una de las evaporaciones, de la masa de condensado de vapor vivo, de la masa de condensado del primer efecto y de la masa de condensado del vapor producido en el segundo efecto, en función del tiempo.

- B) Realizar el balance de energía para todo el sistema de evaporación, cuando se trabaja en paralelo y en contracorriente y establecer las pérdidas de calor en el equipo en cada caso
- C) Determinar la economía de la evaporación para evaporación en paralelo y en contracorriente.
- D) Determinar el coeficiente global aparente de transferencia de calor para cada efecto.

## **PROCEDIMIENTO**

- 1) Revisar el equipo para cumplir con los objetivos propuestos. Inicialmente se trabaja con alimentación de agua en paralelo.
- 2) Colocar las dos canecas para recolectar el condensado proveniente de cada uno de los evaporadores.
- 3) Abrir la válvula que da paso de agua a la bomba de vacío y conectar la bomba hasta obtener la presión de vacío deseada.
- 4) Alimentar vapor de agua al primer evaporador a presión de 15 psig constante.
- 5) Cuando la temperatura del agua del segundo efecto se aproxima al valor de su punto de ebullición a la presión seleccionada, abrir la válvula de agua de refrigeración del condensador hasta obtener la temperatura adecuada de condensado. Inferior a la temperatura de saturación a la presión del evaporador.
- 6) Cuando el sistema está estable, anotar los datos de la tabla.
- 7) Sin suspender el suministro de vapor, cambiar la posición de las válvulas de alimentación de agua con el fin de obtener alimentación de agua en contracorriente.
- 8) Estabilizar de nuevo el equipo y anotar los datos de la tabla.
- 9) Suprimir la alimentación de vapor cerrando la válvula que corresponde.

- 10) Llevar el equipo hasta la presión atmosférica apagando la bomba de vacío y abriendo muy lentamente la válvula que comunica el tanque de condensado con la atmósfera. Cerrar la válvula de agua de la bomba.
- 11) Luego de algunos minutos cerrar la válvula de entrada de agua al condensador.
- 12) Tarar el tanque de condensado.

## **EQUIPO**

- 1) Primer efecto .

Evaporador de tubos horizontales. El área de transferencia de calor está formada por 22 tubos de cobre de 48 cm de longitud útil y cuyos diámetros interno y externo son respectivamente 35 y 39.5 mm.

- 2) Segundo efecto .

Evaporador de calandria con 24 tubos verticales de cobre cuyo diámetro interno es 1.125 pulg y espesor de pared de 1.5 mm. La calandria posee un tubo central de 3.75 pulg de diámetro interno y 2 mm de espesor. La longitud es de 48 cm.

- 3) Condensador.
- 4) Bomba de vacío.
- 5) 2 canecas, 2 balanzas y tanque de recolección de condensado.
- 6) Instrumentos de medida.

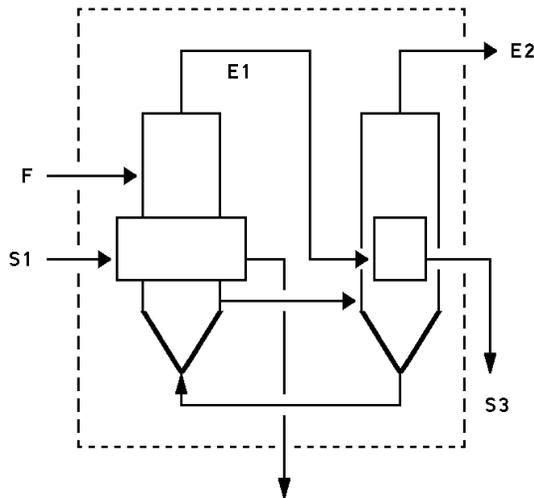
## **NOMENCLATURA DE DATOS**

$P_6$  : presión de vacío en el tanque de recolección (pulg Hg).  
 $P_3$  : presión en el primer efecto (psig).  
 $P_4$  : presión de vacío en el segundo efecto (pulg Hg).  
 $P_2$  : presión del vapor de agua alimentado al evaporador (psig).  
 $T_6$  : temperatura de los vapores de cima, primer efecto ( $^{\circ}$ F).  
 $T_7$  : temperatura de los vapores de cima, segundo efecto ( $^{\circ}$ F).  
 $m_{S1}$  : masa de vapor vivo alimentado (kg).

$m_{E1}$  : masa de vapor de agua producido en el primer efecto (kg).  
 $m_{E2}$  : masa de vapor de agua producido en el segundo efecto (kg).  
 $T_4$  : temperatura de condensado  $m_{S2}$  ( $^{\circ}F$ )  
 $T_5$  : temperatura agua primer efecto ( $^{\circ}F$ ).  
 $T_8$  : temperatura agua segundo efecto ( $^{\circ}F$ ).  
 $T_9$  : temperatura condensado  $m_{E2}$  ( $^{\circ}C$ ).  
 $T_{10}$  : temperatura condensado  $m_{S3}$  ( $^{\circ}C$ ).  
 $\theta$  : tiempo (mi)  
 $Z$  : altura en el tanque de condensado (cm)  
 $(m/Z)$  : tara del tanque de condensado (kg/cm).

## CALCULOS

Para cada uno de los cálculos, se hace referencia al siguiente diagrama de flujo



A) A partir de los gráficos se determina el flujo de condensado de vapor vivo ( $m_S$ ), el flujo de condensado del vapor producido en el primer efecto ( $m_{E1}$ ) y el flujo de condensado de vapor producido en el segundo efecto ( $m_{E2}$ ).

Para determinar el flujo de vapor ( $m_{E2}$ ) producido se multiplica la tara del tanque ( $m/Z$ ) por la diferencia de alturas ( $\Delta z$ ) en el tanque, durante un intervalo de tiempo ( $\Delta \theta$ ).

B) El balance de energía se determina por la siguiente ecuación, tanto para operación en paralelo como para operación en contracorriente.

$$H_F + H_{S1} = H_{E2} + H_{S2} + H_{S3} + Q_p$$

donde:

$H_F$  = entalpía total del agua alimentada =  $m_F \cdot h_F$

La entalpía específica  $h_F$  para el agua alimentada se evalúa conociendo la temperatura del agua y tomando la entalpía de líquido saturado ( $h_f$ ) a ésta temperatura.

$H_{S1}$  = entalpía total del vapor vivo alimentado al evaporador.  
=  $m_S \cdot h_{S1}$

La entalpía específica del vapor vivo ( $h_{S1}$ ) se determina suponiendo vapor saturado seco ( $h_g$ ) en función de la presión absoluta de alimentación.

La presión atmosférica ( $P_{atm}$ ) en Santafé de Bogotá es 10.83 psi.

La presión absoluta ( $P_{abs}$ ) se calcula:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man}$$

$P_{man}$  = presión indicada por el manómetro.

$H_{E2}$  = entalpía total del vapor producido en el segundo efecto.  
=  $m_{E2} \cdot h_{E2}$

La entalpía específica  $h_{E2}$  se calcula suponiendo vapor saturado seco ( $h_g$ ) a la presión absoluta en la cámara de evaporación del segundo efecto. Si se está trabajando al vacío la presión absoluta se determina:

$$P_{abs} = P_{atm} - P_v$$

$P_v$  = presión de vacío indicada por el vacuómetro.

$H_{S2}$  = entalpía total del condensado de vapor vivo =  $m_S \cdot h_{S2}$

La entalpía específica  $h_{S2}$  se calcula suponiendo líquido sub-enfriado a la temperatura medida con el termómetro de la línea de condensado a la salida del intercambiador. Puede suponerse la entalpía de líquido saturado ( $h_f$ ) a ésta temperatura.

$$H_{S3} = \text{entalpía total del condensado de vapor producido en el segundo efecto.} \\ = m_{E1} \cdot h_{S3}$$

La entalpía específica  $h_{S3}$  se toma como la entalpía de líquido saturado a la presión absoluta del primer efecto.  
Despejando  $Q_p$  se determina el flujo de calor perdido.

C) La economía de la evaporación para todo el sistema tanto para operación en paralelo como en contracorriente se calcula:

$$\text{Economía} = m_{E2}/m_{S1}$$

D) Para calcular el coeficiente global aparente del primer efecto se procede así:

$$U_D = \frac{Q}{A (\Delta t)_a}$$

$Q$  = Flujo de calor entregado por el vapor vivo =  $m_S (h_{S1} - h_{S2})$

$A$  = área total de transferencia de calor.

$A = N_t \times L \times DE \times \pi$

$N_t$  = número de tubos.

$L$  = longitud de los tubos.

$DE$  = diámetro exterior de cada tubo.

$(\Delta t)_a$  = diferencia aparente de temperatura =  $(T_{S1} - T_{E1})$

$T_{S1}$  = temperatura de saturación del vapor vivo.

$T_{E1}$  = temperatura de saturación a la presión de la cámara de evaporación.

Para calcular el coeficiente global aparente en el segundo efecto se procede así:

$$U_D = \frac{Q}{A (\Delta t)_a}$$

$Q$  = Flujo de calor entregado por el vapor producido en el primer efecto.

$$Q = m_{E1} (h_{E1} - h_{S3})$$

$A$  = área total de transferencia de calor.

$$A = \pi L ( N_t \times DE + DE' )$$

$N_t$  = número de tubos.

$L$  = longitud de los tubos.

$DE$  = diámetro exterior de cada tubo.

$DE'$  = diámetro exterior del tubo central.

$(\Delta t)_a$  = diferencia aparente de temperatura =  $(T_{E1} - T_{E2})$

$T_{E1}$  = temperatura de saturación del vapor a la presión absoluta del primer efecto.

$T_{E2}$  = temperatura de saturación a la presión absoluta del segundo efecto.

## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS II

### TABLA DE DATOS : PRACTICA 18

#### EVAPORACION CON DOBLE EFECTO

<b>EVAPORACION DOBLE EFECTO PARALELO</b>			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>DATOS</b>												
INTERVALO DE TIEMPO	$\theta$	mi										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 24	$Z_{24}$	cm										
MASA DE VAPOR PRODUCIDO	$m_{E1}$	kg										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 25	$Z_{25}$	cm										
TEMPERATURA AGUA EVAPORADOR	$T_5$	$^{\circ}\text{C}$										
PRESION DE LA CALDERA	$P_c$	psig										

PRESION DEL VAPOR DE AGUA	$P_2$	psig	TEMPERATURA VAPORES EFECTO 1	$T_6$	$^{\circ}\text{F}$
PRESION EFECTO 1	$P_3$	psig	TEMPERATURA VAPORES EFECTO 2	$T_7$	$^{\circ}\text{F}$
PRESION DE VACIO EFECTO 2	$P_4$	in Hg	TEMPERATURA SALIDA CONDENSADOR	$T_9$	$^{\circ}\text{C}$
PRESION DE VACIO TANQUE	$P_6$	in Hg	TEMPERATURA CONDENSADO VAPOR	$T_4$	$^{\circ}\text{C}$

<b>EVAPORACION DOBLE EFECTO CONTRACORRIENTE</b>			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>DATOS</b>												
INTERVALO DE TIEMPO	$\theta$	mi										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 24	$Z_{24}$	cm										
MASA DE VAPOR PRODUCIDO	$m_{E1}$	kg										
ALTURA TANQUE DE CONDENSADO 25	$Z_{25}$	cm										
TEMPERATURA AGUA EVAPORADOR	$T_5$	$^{\circ}\text{C}$										
PRESION DE LA CALDERA	$P_c$	psig										

PRESION DEL VAPOR DE AGUA	$P_2$	psig	TEMPERATURA VAPORES EFECTO 1	$T_6$	$^{\circ}\text{F}$
PRESION EFECTO 1	$P_3$	psig	TEMPERATURA VAPORES EFECTO 2	$T_7$	$^{\circ}\text{F}$
PRESION DE VACIO EFECTO 2	$P_4$	in Hg	TEMPERATURA SALIDA CONDENSADOR	$T_9$	$^{\circ}\text{C}$
PRESION DE VACIO TANQUE	$P_6$	in Hg	TEMPERATURA CONDENSADO VAPOR	$T_4$	$^{\circ}\text{C}$

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N<sup>o</sup> \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 19

# ANALISIS DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS



EQUIPO PARA DESTILACIÓN ASTM D 86

### OBJETIVO

Mediante la medición de las propiedades físicas del combustible utilizado en las calderas del Laboratorio de Ingeniería Química y de Ingeniería Mecánica (ACPM), conocer su composición química elemental.

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### COMBUSTIBLES LIQUIDOS

Los principales combustibles líquidos son derivados del petróleo. Desde el punto de vista químico cualquier derivado constituye una mezcla compleja de hidrocarburos pertenecientes a las series parafínica, nafténica, olefínica y aromática. Cada serie difiere en su contenido de hidrógeno y azufre. La serie predominante en estos derivados es la serie parafínica y nafténica. Según lo anterior se hace impracticable la determinación cuantitativa por medios químicos de la proporción exacta de los compuestos pertenecientes a cada serie; además desde el punto de vista práctico sólo importa conocer los elementos y la proporción en que intervienen en la combustión. Lo anterior es posible mediante la determinación de ciertas propiedades físicas comunes.

### PROPIEDADES FISICAS

**A) Densidad.** Puede expresarse en dos escalas. La "Gravedad Específica" denominada por la letra G, definida como la relación entre el peso de un volumen dado de combustible a 60°F, y el peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura. En la industria del petróleo la densidad API (American Petroleum Institute) es más utilizada. Es una escala arbitraria, calibrada en grados y que relaciona la gravedad específica por medio de la fórmula:

$$\text{Grados API} = (141,5/G) - 131,5 \quad (1)$$

TABLA 1

CARACTERISTICAS TIPICAS DE COMBUSTIBLES COLOMBIANOS PARA CALDERA						
CARACTERISTICAS	KEROSENE	ACPM	FUEL OIL N°3	FUEL OIL N°6	CRUDO DE CASTILLA	COMBUSTOLEO 190
Gravedad API	37.9	30			13.3	8.6
Azufre (% masa)	0.141	0.5	1.5	2.5	2.2	1.96
Cenizas (% masa)	0	0	0.1		0.09	0.1
BSW (% vol)		0.1			0.6	0.33

Punto de fluidez (°F)		29.3	32.0		60.0	33.8
cSt (104°F)		8	60		1360	1166
cSt (122°F)					668	535
Punto de inflamación (°F)	149	208	131	140	82	170.6
Carbón Conradson (% masa)					14.1	22.6
Agua y sedimento (% vol)			0.5	2.0		
Vanadio					320	330
Níquel					99	120
Hierro					32	33
Sodio					2	
PIE		453				
50%		572				
PFE		661				
HHV (BTU/gal)		139660			150204	152964

**B) Viscosidad.** Es la medida de la resistencia interna de un líquido a fluir. Para evaluar numéricamente la viscosidad de combustibles, se utilizan el viscosímetro cinemático tipo capilar cuya unidad de medición es el centistoke (cSt) y el viscosímetro Saybolt cuyas unidades de medición son el Segundo Saybolt Universal (SSU) y el Segundo Saybolt Furol (SSF). Existen otros métodos como el Redwood y el Engler utilizados principalmente en Europa.

**C) Punto de Inflamación.** Es la mínima temperatura a la cual existen suficientes vapores del líquido para crear una mezcla de aire y combustible que arda por algunos segundos en presencia de una llama. Se utiliza el método Cleveland de cápsula abierta para combustibles cuyo punto de inflamación esté por encima de 79°C y el método Pensky-Martens de cápsula cerrada para combustibles de bajo punto de inflamación. Los combustibles para calderas generalmente se prueban por el método de cápsula abierta

**D) Destilación.** Esta prueba se basa en la destilación de un volumen de 100 c.c. de combustible y determinación sucesiva del porcentaje recuperado y la temperatura correspondiente. En general, esta prueba determina el intervalo de temperatura dentro del cual ebulle dicho combustible. El 50% de esta destilación puede tomarse como el punto de ebullición medio.

**E) Punto de Anilina.** Esta prueba mide la temperatura a la cual un volumen de anilina recién destilada es completamente soluble en un volumen igual de un combustible ligero. Se utiliza para calcular el poder calorífico de combustibles tales como la gasolina, el kerosene y el ACPM.

## ANALISIS DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS

Mediante la correlación de propiedades físicas la Universal Oil Products Company estableció una caracterización del petróleo y sus derivados basándose en que los hidrocarburos parafínicos de más alto contenido de hidrógeno son un punto de referencia y los hidrocarburos aromáticos de mínimo contenido de hidrógeno son el otro punto de referencia. El FACTOR DE CARACTERIZACION (U.O.P.) fue definido en función de la gravedad específica G y el Punto de Ebullición Medio ( $T_b$ ).

$$K = \frac{(T_b)^{0,333}}{G} \quad (2)$$

K = Factor de Caracterización U.O.P

La propiedad anterior permite calcular el contenido de hidrógeno de un combustible (libre de azufre), mediante la utilización de un diagrama.

Cuando se trata de combustibles residuales, no es corriente determinar el punto de ebullición medio, en este caso debe utilizarse la propiedad física viscosidad mediante un diagrama, para el conocimiento del punto de ebullición medio y el factor de caracterización.

La relación atómica (H/C) podría determinarse por la fórmula:

$$\text{Relación atómica(H/C)} = \frac{12 H}{100 - H} \quad (3)$$

donde H es el porcentaje en peso de hidrógeno en el combustible.

Los resultados obtenidos mediante las relaciones anteriores son suficientemente valaderos para las pruebas de rutina, sin embargo para combustibles muy viscosos el error del punto de ebullición medio puede alcanzar hasta 50°F, debido a la gran variación que experimenta la viscosidad para pequeños cambios en la gravedad específica.

En la determinación del Poder Calorífico Superior (HHV) en BTU/lb de un combustible líquido se utiliza la densidad API:

$$\text{HHV} = 17.687 + 57,9 (\text{°API}) \quad (4)$$

Para obtener una mejor relación, la constante Densidad-Anilina (D-A) es usualmente utilizada. Esta constante es el producto del punto de anilina en °F multiplicado por la densidad API. Es muy útil en la determinación del calor de combustión para las gasolinas y otros productos destilados. Por ejemplo, valores de la gasolina de aviación pueden ser determinados por ésta fórmula.

$$\text{HHV}_{\text{neto}} = 17.992 + 0,09839 (D-A) \quad (5)$$

Algunos diagramas permiten calcular el HHV, el cual no siempre está de acuerdo con determinaciones experimentales, ya que estas gráficas no consideran las variaciones en el contenido de azufre. Teniendo en cuenta que el agua reduce el poder calorífico en forma directa con su cantidad, debe realizarse una corrección restando del valor determinado en la gráfica una cantidad igual al producto de la fracción de agua y el poder calorífico de la gráfica. Si un combustible de 60°API (2% de azufre) contiene 1% de agua, el poder calorífico será:

$$154.000 - 154.000 \times 0,01 = 152.460 \quad \text{BTU/galón}$$

Cuando se desea una determinación exacta del poder calorífico de un combustible líquido debe realizarse mediante la prueba de la bomba y a su vez puede determinarse el contenido de azufre.

Otra propiedad importante para cálculos con combustibles líquidos es el calor específico, el cual puede determinarse por la siguiente relación:

$$C_p = \frac{0.388 + 0.00045 t}{G}$$

donde: t = temperatura en °F  
 G = gravedad específica (60/60°F)  
 C<sub>p</sub> = calor específico en BTU/lb °F

### TIPOS DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS

La tabla 1 muestra los principales tipos de combustibles utilizados en el país y las especificaciones más importantes.

Teniendo en cuenta que el Combustóleo 190 y el Crudo de Castilla son productos de elevada viscosidad, es necesario hacer un precalentamiento o

mezclarlos con combustibles más livianos para bombearlos con facilidad. La temperatura ideal de precalentamiento es aquella en que la suma del costo de bombeo y del costo de precalentamiento es el mínimo.

El combustible debe ser atomizado y vaporizado para que pueda quemarse; en su forma líquida no quemará. La buena atomización requiere gran cantidad de aire mezclado con las partículas de combustible. El aire debe ser turbulento con el fin de asegurar la mezcla apropiada.

Las boquillas del quemador vienen diseñadas para un combustible en un intervalo específico de viscosidad, ya que variaciones de esas viscosidades darán por resultado una pobre atomización. Para combustibles pesados la viscosidad correcta puede ser obtenida mediante el precalentamiento del combustible, por lo tanto es esencial conocer el intervalo y viscosidad para el cual el quemador ha sido diseñado y determinar el nivel correcto de precalentamiento para mantener la viscosidad dentro de ese intervalo. La viscosidad de atomización para la cual ha sido diseñado el quemador debe ser obtenida del fabricante

Teniendo en cuenta que la viscosidad puede variar, incluso según el origen del crudo, es necesario efectuar pruebas de viscosidad al combustible a diferentes temperaturas y llevar estos datos a un diagrama para mezclas. En este diagrama la relación es lineal y sirve para determinar la temperatura de precalentamiento.

Si el precalentamiento es demasiado alto, la viscosidad puede disminuir demasiado y se pueden presentar fluctuaciones en la atomización, produciendo llama ruidosa e inestable. Si el precalentamiento es demasiado bajo, la viscosidad será muy alta, dificultando la vaporización y produciendo combustión incompleta con formación de hollín

Cuando el precalentamiento se dificulta pueden utilizarse mezclas de combustibles livianos y combustibles pesados, para lo cual hay que determinar la proporción exacta de cada uno de ellos en la mezcla

## **PROCEDIMIENTO**

### **1) GRAVEDAD ESPECIFICA.**

Mediante un aerómetro o densímetro y con la ayuda de una probeta llena de combustible, se sumerge el densímetro adecuado y se mide la densidad observando la libre flotación de éste. Debe tomarse la temperatura para efectuar las correcciones respectivas.

**2) VISCOSIDAD SAYBOLT.**

Se calienta el combustible dentro del tubo del viscosímetro a una temperatura de 50°C y una vez alcanzada ésta se mide el tiempo en segundos para que un volumen de 60 mililitros fluyan a través del orificio calibrado Saybolt Universal.

**3) PUNTO DE INFLAMACION.**

Se llena la cápsula de prueba hasta el nivel indicado por ésta. Mediante un mechero de gas se incrementa la temperatura y cuando se acerca el valor esperado se pasa por su superficie una pequeña llama de prueba. La temperatura más baja a la cual la aplicación de la llama hace que los vapores próximos a su superficie entren en ignición se toma como punto de inflamación. Para determinar el punto de combustión el ensayo se continúa hasta que la aplicación de la llama cause la combustión del aceite por cinco segundos. Los resultados anteriores deben ser corregidos cuando la presión barométrica difiere de 760 mm Hg mediante la siguiente relación:

$$\text{Punto de llama corregido} = C + 0.033(760 - P)$$

C = Punto de llama observado en °C

P = Presión barométrica en mm Hg

**4) DESTILACION ASTM.**

Se toman 100 mililitros de combustible y se colocan dentro del balón de destilación, el cual se cierra colocando un termómetro en la parte superior. Se conecta luego el condensador al balón y la probeta graduada se coloca en posición para recibir el líquido que sale del condensador.

Una vez terminado el montaje se aplica calor al balón de destilación a una velocidad tal que permita que la primera gota de destilación salga del condensador. La lectura del termómetro en este punto se anota como punto inicial de ebullición. La fuente de calor se regula de tal manera que la destilación se lleva a cabo a una velocidad específica.

La temperatura obtenida cada vez que se recuperen 10 mililitros de destilado debe anotarse hasta terminar la destilación.

Cada uno de los resultados anteriores debe corregirse reportar los resultados a presión de 1 atm, mediante la siguiente fórmula:

$$C_c = 0.00012(760 - P)(273 + t)$$

$C_c$  = corrección que debe ser añadida a cada lectura del termómetro.

$P$  = presión barométrica en mm Hg durante el ensayo.

$t$  = temperatura de destilación observada en °C.

## EQUIPO.

- 1) Juego de densímetros y termómetro.
- 2) Viscosímetro Saybolt completo según norma ASTM D-88. Copas receptoras y orificios.
- 3) Equipo para punto de inflamación tipo cápsula abierta (Cleveland) con mechero y termómetro.
- 4) Equipo para destilación ASTM D 86 completo.

## CALCULOS

La mayoría de los cálculos con combustibles líquidos refinados conducen en primer término a caracterizar el combustible mediante las propiedades físicas:

Gravedad API

Temperatura Media de Ebullición

Viscosidad

Con los datos de destilación se construye una gráfica de temperatura vs porcentaje de combustible recuperado. La temperatura para la cual se recupera el 50% es el punto de ebullición medio.

Se utilizan los gráficos dados al final.

Tomamos como ejemplo el ACPM cuyas características típicas según la tabla 1 (Fuente: ECOPETROL ) son las siguientes:

Gravedad API = 30

Temperatura Media de ebullición (°F) = 572

Azufre (% peso) = 0,5

Mediante el gráfico se determina lo siguiente:

a) Factor de Caracterización (K) = 11,5

b) Masa Molecular= 235

El factor de caracterización también puede obtenerse a partir de la ecuación 2 así:

$$T_b (^{\circ}R) = 572 ^{\circ}F + 460 = 1.032 ^{\circ}R$$

$$G = [141,5/(^{\circ}API + 131,5)]$$

$$G = [141,5/(30 + 131,5)] = 0,876$$

$$K = \frac{(1.031)^{0,333}}{0.876} = 11,51$$

A partir del gráfico se tiene:

$$\begin{aligned} H (\% \text{ peso}) &= 12,5 \% \\ C (\% \text{ peso}) &= 100 - 12,5 = 87,5 \% \end{aligned}$$

La composición anterior se considera sobre una base libre de azufre. La fórmula condensada del combustible se calcula en la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Átomos de C} &= (87,5/12) = 7,29 \\ \text{Átomos de H} &= (12,5/1) = 12,5 \\ \text{Relación atómica (H/C)} &= (12,5/7,29) = 1,714 \\ \text{Fórmula: } &(\text{C H}_{1,714})_n \end{aligned}$$

Para determinar el valor de n se utiliza la masa molecular obtenida anteriormente, así:

$$n = (235/13,714) = 17.13 \quad \text{Fórmula : } (\text{C H}_{1,714})_{17.13}$$

Lo anterior indica que la molécula de ACPM es una mezcla de hidrocarburos con un promedio de carbonos de 17.13.

Conocer más acerca de la composición de un combustible líquido como el ACPM es costoso e implica otros tipos de análisis cuyos resultados finales no son importantes para la aplicación como combustible de calderas. Cuando éste combustible debe ser quemado en motores de combustión interna el conocimiento del punto de anilina, el índice Diesel y el número de Cetano se hace necesario.

Para obtener el número de átomos de azufre por cada átomo de carbono se puede utilizar el siguiente cálculo:

Por cada 100 gramos de combustible hay 0.5 gramos de azufre, por tanto:  
átomos de azufre =  $(0.5/32) = 0.0156$

$$\frac{0.0156 \text{ átomos S}}{7.29 \text{ átomos C}} = 0.0214 \frac{\text{átomos S}}{\text{átomo de C}}$$

Como se puede ver, la cantidad de azufre es muy baja y el SO<sub>2</sub> formado a partir de él no es una cantidad significativa en el volumen de los gases producidos en la combustión. Sólo debe tenerse en cuenta por su efecto corrosivo en las partes internas de calderas y chimeneas metálicas.

Los cálculos anteriores son válidos para fracciones combustibles del petróleo, incluidos los aceites residuales como el Fuel Oil # 6, pero no ofrecen garantía cuando se trata de crudos de petróleo.

## LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS II

### TABLA DE DATOS : PRACTICA 19

#### ANALISIS DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS

GRAVEDAD ESPECIFICA A (°C)	
PUNTO DE INFLAMACION (°C)	
PUNTO DE COMBUSTION (°C)	
PODER CALORIFICO SUPERIOR (HHV) kJ/kg	
CONTENIDO DE AZUFRE (% masa )	
PRECIO ( \$ / galón )	

<b>DESTILACION ASTM</b>	
<b>Fracciones Recuperadas</b>	<b>°C</b>
Temperatura inicial de ebullición	
10% recuperado a	
20% recuperado a	
30% recuperado a	
40% recuperado a	
50% recuperado a	
60% recuperado a	
70% recuperado a	
80% recuperado a	
90% recuperado a	
Temperatura final de ebullición	

PROFESOR : \_\_\_\_\_ GRUPO N° \_\_\_\_\_ FECHA : D \_\_\_\_ M \_\_\_\_ A \_\_\_\_

FOTOCOPIA DILIGENCIADA DE ESTA TABLA DEBE SER ENTREGADA AL PROFESOR AL FINALIZAR LA PRACTICA

## PRACTICA 20

# EFICIENCIA TERMICA DE CALDERA



CALDERA DISTRAL DE 50 BHP

## OBJETIVOS DE LA PRACTICA

- A) Determinar mediante el análisis de los humos el porcentaje en peso de hidrógeno y carbono en el combustible y compararlo con el obtenido por el análisis de laboratorio
- B) Realizar el balance de masa en la caldera tomando como base de cálculo 100 kilogramos de combustible quemado en la caldera.

- C) Sobre la base de cálculo anterior realizar el balance de energía alrededor de la sección de combustión (hogar) y determinar el rendimiento térmico por el método indirecto despreciando las pérdidas por radiación.
- D) Utilizando la cantidad de agua alimentada a la caldera y la cantidad de vapor producido en la caldera durante la práctica, determinar el rendimiento térmico por el método directo y las pérdidas de energía.
- E) Determinar la calidad del vapor a la entrada de la turbina.
- F) Efectuar el balance de energía en el condensador de la planta térmica y determinar las pérdidas de calor y el coeficiente de transferencia de calor  $U_D$ .
- G) Determinar la potencia entregada por la turbina a partir del cambio de entalpía para el vapor de agua y el consumo de vapor.
- H) Determinar el rendimiento térmico del ciclo termodinámico.
- I) Determinar el costo de 1 kw-hr de energía eléctrica generada.

## **FUNDAMENTO TEORICO**

En el mundo de hoy, a medida que el costo de combustible aumenta progresivamente mientras que el abastecimiento disminuye, la conservación de energía es una necesidad. Para que la industria conserve energía sin disminuir la producción, debe encontrar formas de usar la energía con mayor eficiencia.

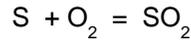
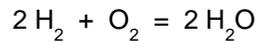
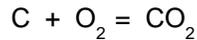
Se estima que más de 50% de la energía consumida por la industria se emplea para generar vapor en calderas de inyección directa. Aumentar la eficiencia de estas calderas tendría un impacto significativo en la conservación de la energía.

## **COMBUSTION**

Básicamente la combustión es el proceso de quemar. En términos químicos, esto se refiere a la oxidación rápida de una sustancia (combustible) acompañada por calor y usualmente luz. En términos prácticos es una combinación rápida de oxígeno con un combustible generando o liberando calor.

Los combustibles más comunes, tales como aceites combustibles, gas y carbón, consisten en carbono e hidrógeno con algunas pequeñas cantidades de azufre que existen en algunos combustibles. Trazas de otros elementos se encuentran también presentes.

Para fines prácticos, la combustión involucra la oxidación de tres elementos: carbono, hidrógeno y azufre. Primordialmente tres reacciones químicas tienen lugar:



Todas las reacciones anteriores se suceden con desprendimiento de calor.

### **TIPOS DE COMBUSTION**

La combustión obtenida por la reacción de proporciones exactas de combustible y oxígeno para obtener una completa conversión a bióxido de carbono, vapor de agua y bióxido de azufre (si se encuentra presente el azufre) es denominada una combustión perfecta o combustión estequiométrica. Si hay presente una mayor cantidad de oxígeno que la requerida para una combustión perfecta, el oxígeno en exceso de la cantidad necesaria no se usará. Si hay menor cantidad de oxígeno que la requerida para una combustión perfecta, la reacción es denominada sub-estequiométrica, o combustión incompleta. Durante la combustión incompleta, pueden formarse otros productos además de bióxido de carbono, agua y bióxido de azufre. Estos otros productos pueden ser monóxido de carbono (CO), gas hidrógeno (H<sub>2</sub>), compuestos de hidrocarburos (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y carbono. Estos componentes son contaminantes comunes y escapan a la atmósfera en los gases de combustión.

### **COMBUSTIBLES**

Las calderas pueden quemar una variedad de combustibles que van desde gas natural hasta materiales de desperdicio. Sin embargo, los tres combustibles principales son: gas, aceite y carbón.

Los combustibles gaseosos incluyen gas natural, butano y propano. El gas es un combustible de quemado fácil debido a que ya se encuentra vaporizado y solamente requiere mezclarlo con aire para formar una mezcla combustible. Además es también un combustible muy limpio. El carbón puede ser pulverizado y quemado en una suspensión de aire o quemado en trozos en una parrilla alimentadora. El fuel oil se encuentra disponible en varios grados que se caracterizan por su viscosidad y contenido de azufre. La viscosidad es la medida de la resistencia interna de un líquido a fluir. Los grados disponibles en el rango de combustibles para calderas varían desde el fuel oil N<sup>o</sup> 2 (ACPM) que es fluido y puede ser bombeado fácilmente a temperatura ambiente, hasta el N<sup>o</sup> 6 que es viscoso y debe ser calentado para poder ser bombeado.

Como se mencionó previamente el combustible debe ser atomizado y vaporizado para que pueda quemarse. El combustible líquido no quemará en su forma líquida. Debe ser primero convertido a gas. La buena atomización requiere que una gran cantidad de aire se mezcle inicialmente con las partículas de combustible. El aire debe ser turbulento con el objeto de asegurar una mezcla apropiada. Entonces el calor debe ser radiado dentro del rocío para vaporizarlo.

Las boquillas del quemador están diseñadas para un combustible de un intervalo específico de viscosidad, ya que variaciones de estas viscosidades resultarán en una pobre atomización. En combustibles pesados la viscosidad correcta puede ser obtenida mediante el precalentamiento de combustible, por lo tanto es esencial conocer el intervalo de viscosidad para el cual el quemador ha sido diseñado y determinar el nivel correcto de precalentamiento para mantener la viscosidad dentro de ese intervalo. La viscosidad de atomización para la cual ha sido diseñado un quemador debe ser obtenida del fabricante.

La viscosidad de combustibles pesados no es uniforme: puede variar de embarque a embarque dependiendo del origen del crudo. Debido a esta variación puede ser necesario efectuar pruebas regulares de viscosidad en el combustible almacenado para determinar el precalentamiento necesario para obtener la viscosidad requerida por el quemador.

Si el precalentamiento es demasiado alto la viscosidad será pobre y más baja, que la recomendada y ocurrirán fluctuaciones en la atomización. Esto causará que la llama sea ruidosa e inestable. Si el precalentamiento es demasiado bajo, la viscosidad será demasiado alta. Esto causará una atomización inadecuada como resultado de que las partículas son demasiado grandes. Estas partículas grandes son más difíciles de vaporizar y se producirá una combustión incompleta elevando la tendencia a la formación de hollín.

Es importante el contenido de ceniza, trazas de metal y azufre en un combustible debido a los problemas potenciales que estos materiales pueden causar en una caldera. Las trazas más comunes de metales incluyen níquel, sodio y vanadio.

Los problemas causados por estos materiales pueden ser catalogados en dos grupos: problemas de escoria y depósitos y problemas de corrosión. Los problemas de escoria y depósitos predominan en el extremo caliente de la caldera: las paredes del horno y las secciones de sobrecalentamiento. La corrosión en el extremo caliente no constituye problema hasta que las temperaturas excedan de 600°C.

En el cuadro se indican algunos análisis aproximados de los combustibles más utilizados.

### **PODER CALORIFICO**

La cantidad de calor obtenido al quemar un combustible depende de la composición del mismo

Para cualquier tipo de combustible es importante conocer su Poder Calorífico o calor desprendido por la combustión de una cantidad unitaria (masa o volumen) de combustible.

Puede ser de dos tipos:

#### **Poder Calorífico Superior (HHV).**

También se denomina poder calorífico Bruto. Generalmente se determina en el laboratorio utilizando una bomba de oxígeno. Considera el agua inicial del combustible y la formada en la combustión, en el estado líquido, y a la temperatura del experimento.

#### **Poder Calorífico Inferior (IHV).**

Puede obtenerse restando al poder calorífico superior, el calor de vaporización del agua presente al final de la combustión.

COMBUSTIBLE	ANALISIS, % peso				PODER CALORIFICO	
	C	H	S	Ceniza	HHV	IHV
Gas Natural	75	25			23850	21492
Propano	82	18			21564	19854
Butano	83	17			21240	19620
Gasolina	85	15	0.03		20700	19152
Kerosene	86	13.7	0.07		19800	18558
ACPM	86	13.2	0.5		19584	18378
Fuel Oil N°6	87	12	2.5		18640	17784
Carbón Bituminoso	80	5.5	1.5		14094	13590

### **CALDERAS**

La caldera es simplemente un aparato que captura el calor producido por el proceso de combustión convirtiéndolo en vapor de agua.

Existen dos tipos de calderas: las acuotubulares y las pirotubulares. En las calderas pirotubulares se produce el vapor circulando el gas caliente de la combustión a través de tubos sumergidos en agua. Las calderas acuotubulares circulan agua y vapor a través de los tubos bañados por gases calientes de la combustión. Todas las calderas tienen seis partes básicas:

- 1 - Quemador.
- 2 - Cámara de combustión.
- 3 - Sección de convección.
- 4 - Chimenea.
- 5 - Equipo para el manejo de aire.
- 6 - Instrumentos.

## **PROCEDIMIENTO**

No intente encender ningún aparato por sí mismo. La caldera es encendida y estabilizada hasta su presión de suministro de vapor en un intervalo de operación de la misma de 95 psig y 105 psig.

La práctica puede ser iniciada tan pronto como la unidad esté en condiciones estables de suministro de vapor.

El tiempo requerido para alcanzar la estabilización o equilibrio con respecto a la presión y temperaturas, es de media hora como mínimo en esta planta, ya que es de un tamaño pequeño.

Las variables de proceso (presiones y temperaturas) en la planta térmica deben mantenerse estables durante toda la práctica.

La temperatura de los gases de chimenea se mide a partir del momento en que enciende el quemador y durante cada 5 segundos hasta que el quemador se apague.

Las cantidades acumulativas medidas (combustible y agua de alimentación), deben ser tomadas durante el tiempo que dure la práctica (aproximadamente cuatro ciclos), para tratar de minimizar los posibles errores de medición ya que la caldera es del tipo on/off y por lo tanto no alimenta combustible ni agua en todo momento.

Para obtener el flujo de combustible en lb/h durante el tiempo que dure la práctica, debe medirse el volumen de combustible consumido en el tanque volumétrico y dividirlo por el tiempo en horas (tiempo de duración de la práctica). El diámetro del tanque es 19.3 cm.

La medida del flujo de agua en lb/h, se hace tomando la lectura en el contador que se encuentra en la línea de suministro de agua, en el momento de iniciar la práctica y al finalizar ésta. Este valor se corrige con el cambio de nivel tanto en el tanque de agua de alimentación a la caldera como en la caldera misma, que se observe, durante el período de tiempo que dure la práctica. Para obtener el flujo de agua, se divide el valor corregido de la masa de agua por el tiempo en horas que dure la práctica.

Las condiciones de prueba de esta práctica están determinadas por la demanda de vapor. La unidad generadora de electricidad debe estar trabajando a carga máxima, con presión del vapor vivo en la línea de 75 psig y trabajando con vapor saturado.

El tiempo total de la práctica se mide desde el momento en que enciende el quemador hasta el momento en que enciende nuevamente el quemador en el quinto ciclo.

Los demás datos de la práctica se encuentran consignados en las tablas de datos suministradas con esta guía.

## **EQUIPO**

Caldera pirotubular de dos pasos y 5 pies<sup>2</sup>/BHP modelo: D - 240; potencia 40 BHP; presión de diseño: 150 psig; producción de vapor saturado a 212°F, 1 atm y agua de alimentación a 212°F: 1380 lb/h.

Máxima presión de trabajo recomendada de acuerdo a la graduación de las válvulas de seguridad y a la presión de diseño: 142 psig.

Combustible: ACPM

Medidor de humedad

Contador para la medición del volumen de agua en galones, con una exactitud de  $\pm 0.5$  galones.

Planta Westinghouse para generación de electricidad cuyo conjunto turbina-generador, consta de un generador de 3750 rpm, 110 voltios, DC, manejado por una turbina de vapor de una etapa simple del tipo impulso de dos hileras.

Condensador: Posee tubos de 5/8 de pulgada 18 BWG con un área efectiva de transferencia de calor 1.45 pie<sup>2</sup>.

No abandone el laboratorio hasta no estar seguro que posee todos los datos para realizar el informe.

## **CALCULOS.**

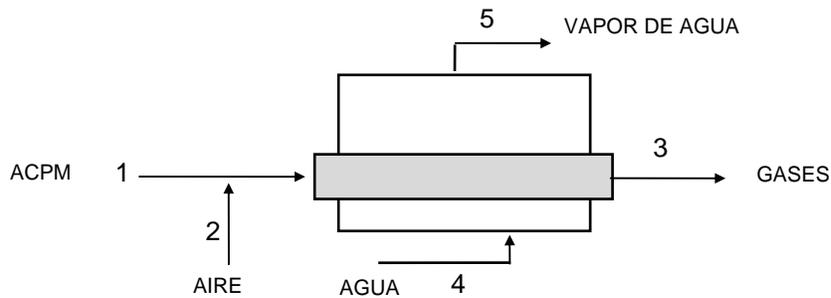
A) Se toma una base de cálculo sobre los humos y mediante el análisis Orsat y un balance de agua se determina el hidrógeno. El resultado del cálculo anterior se compara con el análisis de laboratorio.

B) Tomando como base de cálculo 100 kilogramos de combustible, realizar el balance de masa completo sobre el hogar de la caldera. No tenga en cuenta en el balance el azufre del combustible.

**C) BALANCE DE ENERGIA**

Haciendo referencia al diagrama, el balance general de energía sobre la caldera puede calcularse a partir de la ecuación:

$$\boxed{\text{ENERGIAS A LA ENTRADA} = \text{ENERGIAS A LA SALIDA}}$$



Realizar el balance de energía en sistema SI para 100 kg de ACPM.

En el cálculo de estas energías debe asumirse una temperatura de referencia de 25°C.

Las energías a la entrada están constituidas por el poder calorífico superior del combustible (HHV) multiplicado por la masa de combustible, la entalpía total del combustible alimentado ( $H_1$ ), la entalpía total del aire húmedo suministrado ( $H_2$ ).

Las energías a la salida están constituidas por:

El calor de combustión del monóxido de carbono (CO) en los gases de salida ( $\Delta H_c$ ) multiplicada por las moles de CO  $\Delta H_c \times n_{CO} = (PC)_{gases}$ .

La entalpía total de los gases a la salida ( $H_3$ ). Esta entalpía incluye el calor de vaporización del agua en los gases de salida ( $\Delta H_v$ ) a la temperatura de referencia multiplicado por la masa de agua.

Debe recordarse que la entalpía total H se calcula conociendo de antemano el balance de masa, así:

ENTALPIA TOTAL = MASA X ENTALPIA ESPECIFICA

ENTALPIA TOTAL = MOLES X ENTALPIA MOLAR

La ecuación del balance de energía para la unidad de masa de combustible será:

$$(\text{HHV}) + \sum H_i = \sum H_o + (\text{PC})_{\text{gases}}$$

donde:

(HHV) = poder calorífico superior del combustible.

$\sum H_i$  = Entalpías totales de entrada con respecto a la temperatura de referencia y agua en estado líquido.

$\sum H_o$  = Entalpías totales de salida con respecto a la temperatura de referencia y agua en estado líquido.

$(\text{PC})_{\text{gases}}$  = Calor de combustión del CO en gases.

#### **Determinación del HHV.**

Para determinar el HHV del combustible puede hacerse a partir del análisis efectuado en el laboratorio conociendo su gravedad específica (gráfico), o mediante la bomba calorimétrica de oxígeno.

#### **Determinación de la entalpía del aire húmedo.**

Mediante un medidor de humedad para el aire se determina la humedad relativa y la temperatura del aire en el laboratorio y a partir de estos datos se determina la humedad absoluta en masa Y (kg de vapor de agua/kg de aire seco) utilizando el diagrama de humedad.

Para determinar la entalpía ( $h_2$ ) BTU/lb aire seco se utiliza la siguiente fórmula:

$$h_2 = C_s (t - 32) + 1.075 Y \quad \text{BTU/lb aire seco}$$

$$C_s = 0.24 + 0.446 Y$$

donde:  $C_s$  = calor específico húmedo  
 $t$  = temperatura en °F

La fórmula utilizada en cálculo anterior supone un temperatura de referencia de 0°C para el aire húmedo y el estado de referencia del agua es líquido a ésta temperatura.

#### **Determinación de la entalpía del ACPM.**

Para la determinación de la entalpía del ACPM puede utilizarse el valor del  $C_p$  dado por la relación empírica de la práctica 9.

#### **Determinación de la entalpía de los gases.**

Pueden utilizarse tablas de entalpía para gases o fórmulas empíricas.  
Para el calor de vaporización del agua pueden utilizarse las tablas de vapor.

#### **Determinación del (PC)<sub>gases</sub>**

Puede tomarse para el CO un valor de 67.62 kcal/gmol.

Para calcular el rendimiento térmico por el método indirecto se utiliza la siguiente fórmula basada en el balance de energía:

$$\text{Rend. térmico} = \left\{ 1 - \frac{H_3 + (\text{PC})_{\text{gases}}}{\text{HHV}} \right\} \times 100$$

Para presentar un resumen del balance de masa y energía diligenciar la siguiente tabla de datos y resultados:

BASE DE CALCULO : 100 kg de ACPM Temperatura de Referencia: 25°C		ANALISIS ORSAT	
<b>COMBUSTIBLE</b>		CO <sub>2</sub>	
		CO	
		O <sub>2</sub>	
		N <sub>2</sub>	
Densidad API			
Temperatura °C			
Carbono % peso		Temperatura de gases (°C)	
Hidrógeno % peso		Relación en peso (aire/comb)	
		Volumen de los gases (m <sup>3</sup> )	
Carbono que forma CO (%)		Temperatura rocío gases (°C)	
<b>AIRE</b>		Pérdidas calor sensible (kJ)	
		Pérdidas calor latente (kJ)	
		Calor teórico utilizado (kJ)	
Porcentaje en exceso			
Temperatura (°C)			
Humedad Relativa (%)		Rendimiento térmico (%)	

**D) Rendimiento térmico por el método directo o método de entrada y salida.**

Requiere la medición exacta de la cantidad de combustible quemado, el poder calorífico del combustible, la cantidad de vapor producido por la caldera y la energía absorbida por la unidad de masa de agua. Puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento Térmico} = \frac{(H_5 - H_4) \times m_4}{\text{HHV} \times m_1} \times 100$$

La diferencia entre en rendimiento térmico por el método indirecto y el rendimiento térmico por el método directo proporciona el porcentaje real de pérdidas en la caldera durante la práctica.

E) Para la determinación de la calidad del vapor se utilizan los datos tomados en el calorímetro de estrangulación y considerando expansión isoentálpica con ayuda del diagrama de Mollier o las tablas de vapor.

F) El balance de energía en el condensador se determina así:

$$Q_V = Q_a + Q_P$$

donde:

$Q_v =$  Flujo de calor cedido por el vapor  $= m_v \cdot (h_e - h_s)$   
 $h_e =$  entalpía del vapor húmedo que sale de la turbina. Puede considerarse expansión isoentrópica del vapor en la turbina.  
 $h_s =$  puede considerarse líquido saturado a la presión del condensador.

$Q_a =$  Flujo de calor tomado por el agua de refrigeración del condensador.  
 $= m_a \cdot C_p (T_e - T_s)$

$T_e =$  temperatura de entrada del agua.  
 $T_s =$  temperatura de salida del agua.

$Q_p =$  Flujo de calor perdido en el condensador.

El coeficiente  $U_D$  para el condensador se determina:

$$U_D = \frac{Q}{A \cdot \Delta T}$$

donde:

$Q =$  Flujo de calor retirado en la condensación del vapor.  
 $= m_v \cdot \Delta h$   
 $m_v =$  flujo de vapor.  
 $\Delta h =$  cambio de entalpía del vapor en el condensador.  
 $A =$  área efectiva de transferencia de calor.  
 $\Delta T =$  LMTD

G) La potencia entregada por la turbina puede calcularse:

$$\text{Potencia} = m_v \cdot \Delta h$$

$m_v =$  flujo de vapor a través de la turbina.

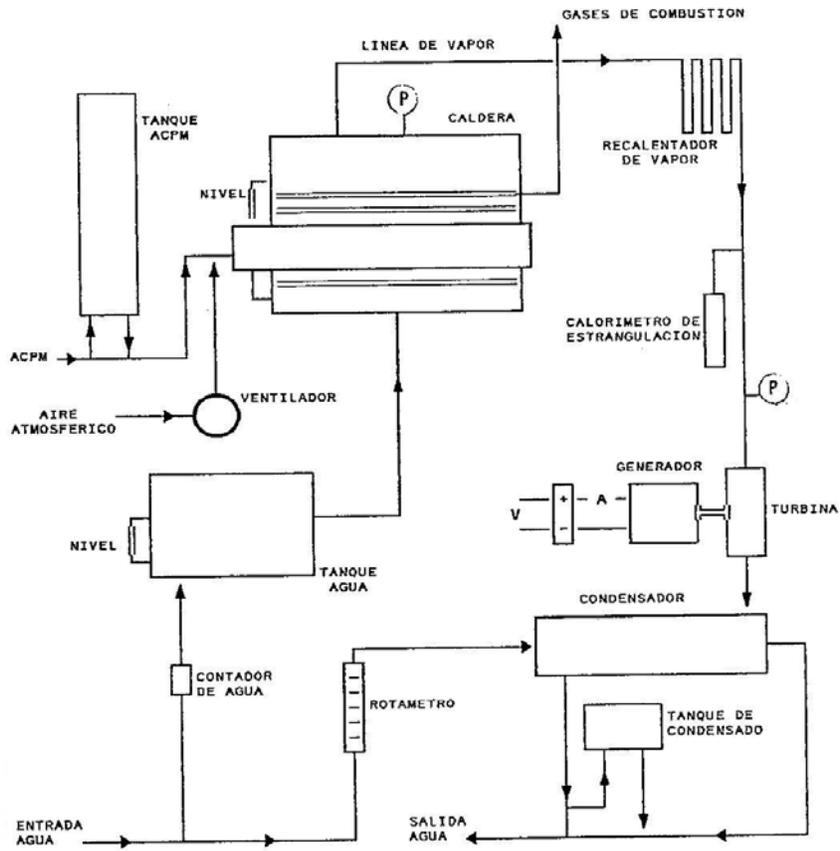
$\Delta h =$  cambio de entalpía del vapor en la turbina.

H) El rendimiento térmico del ciclo termodinámico puede calcularse por la fórmula:

$$\eta_T = \frac{\text{Potencia entregada por la turbina}}{\text{Calor entregado en la caldera}}$$

I) Para calcular el costo de 1 kw-hr se puede dividir el costo de combustible consumido durante el tiempo efectivo de la práctica por la energía generada por la planta en 1 hora.

## DIAGRAMA DE FLUJO PLANTA TERMICA



**LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS II**  
**TABLA DE DATOS : PRACTICA 20**  
**EFICIENCIA TERMICA DE CALDERA**

DATOS PARA LA CALDERA						
Analisis Orsat :	CO <sub>2</sub> :		CO :		O <sub>2</sub> :	N <sub>2</sub> :
T aire : (°C)		Presión barométrica (mm Hg)			Humed. Relativa %:	
Presión (psig) :		Tiempo que dura encendido el quemador ( segundos ) :				
Nivel del agua en la caldera (cm) :			inicial :		final :	
Nivel en el tanque de alimentación de agua a la caldera :			inicial :		final :	
Temperatura del agua de alimentación a la caldera °C :						
Cambios de Nivel en el tanque de combustible ( cm )			inicial :			
			final :			
			diferencia:			

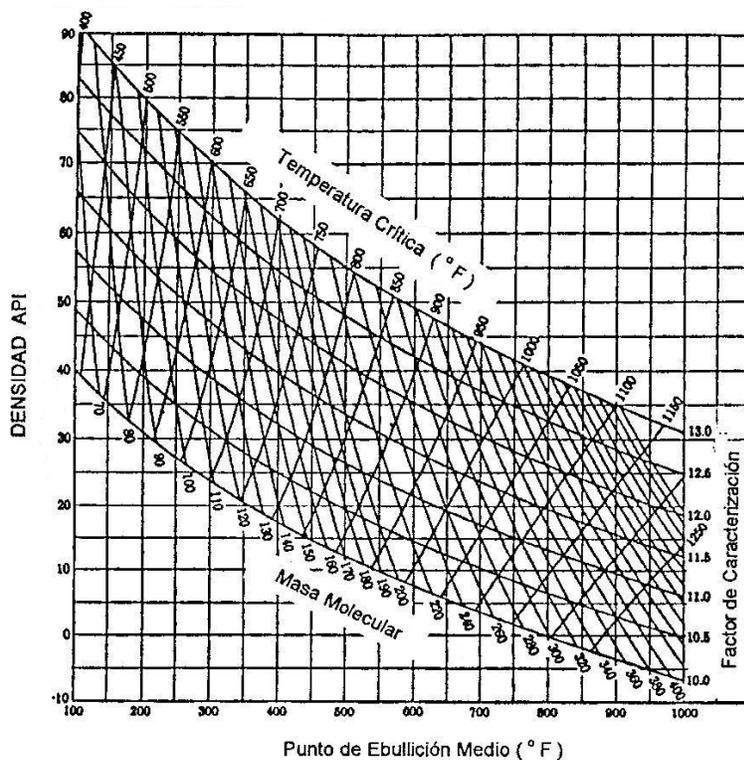
DATOS PARA LA PLANTA TERMICA						
Presión a la entrada de la turbina (psig) :		Presión en el condensador (psig) :				
Temperatura del vapor a la salida de la turbina (entrada al condensador)°C:						
Temperatura agua a la salida del condensador de la planta °C :						
Nivel tanque de condensado (cm) inicial :		final :		tiempo (mi) :		
Lectura del rotámetro de agua de refrigeración del condensador:						
Temperatura del agua de refrigeración del condensador °C :				salida :		
Temperatura vapor en el calorímetro (°C):		Voltios :		Amperios :		

Tiempo total de la práctica (minutos) :		Galones de agua medidos en el contador:	
---	--	---	--



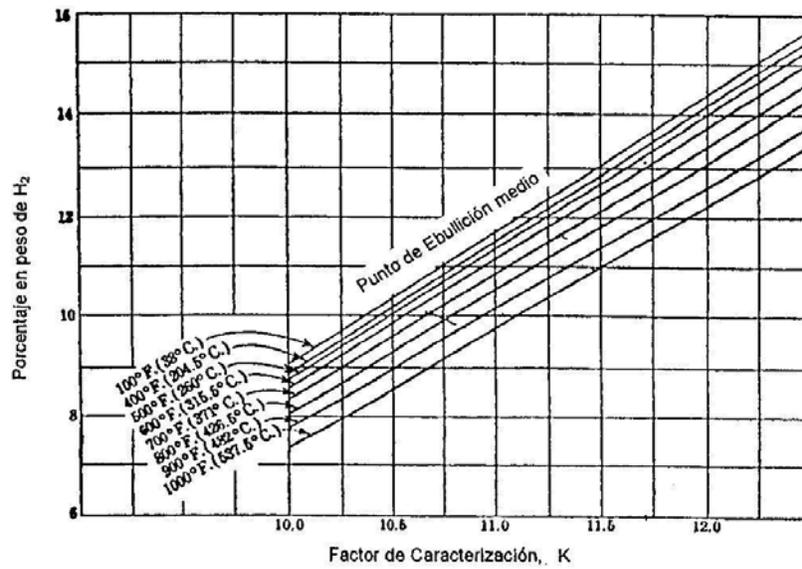
### APENDICE 1

## FACTORES DE CARACTERIZACION DE FRACCIONES DEL PETROLEO



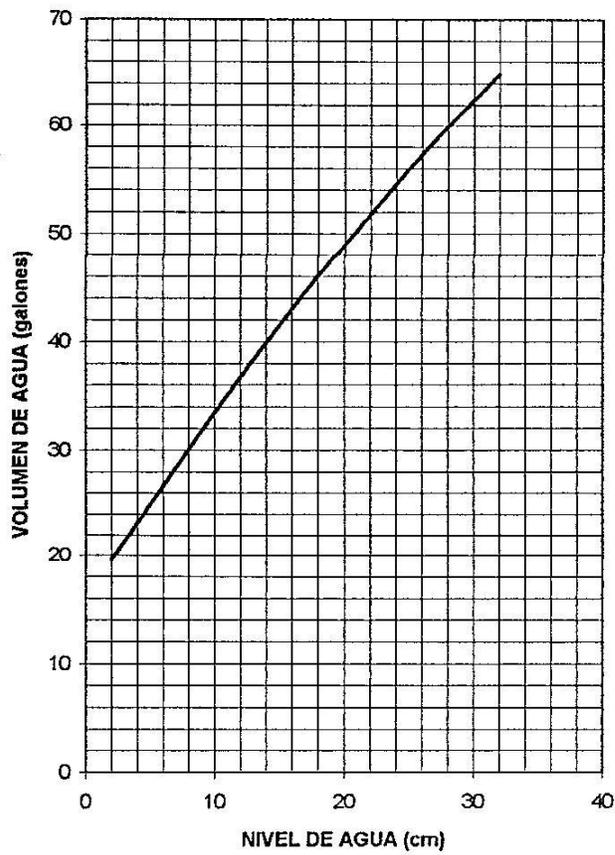
APENDICE 2

PORCENTAJE EN PESO DE HIDROGENO EN FRACCIONES DEL PETROLEO



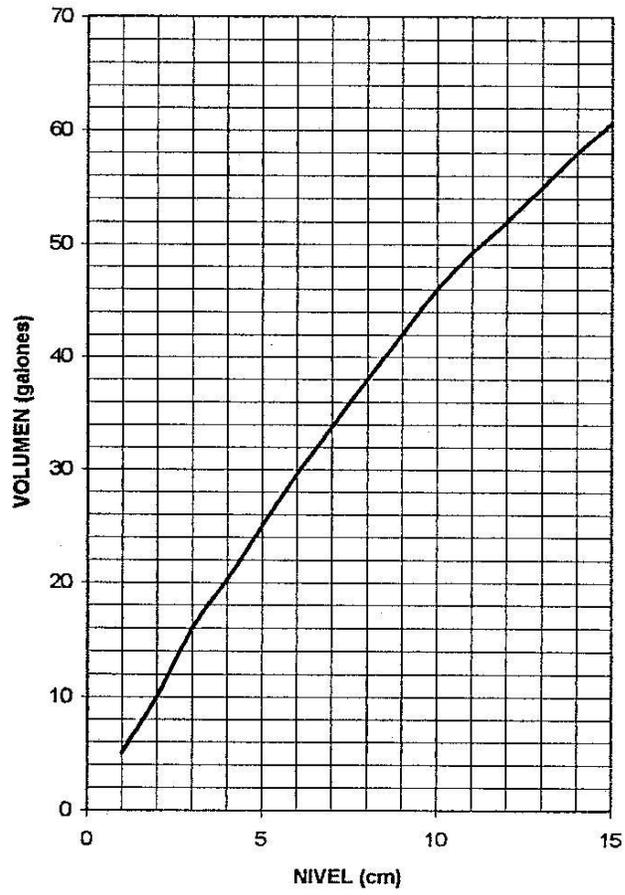
### APENDICE 3

#### AFORO DEL TANQUE DE AGUA DE ALIMENTACION A LA CALDERA



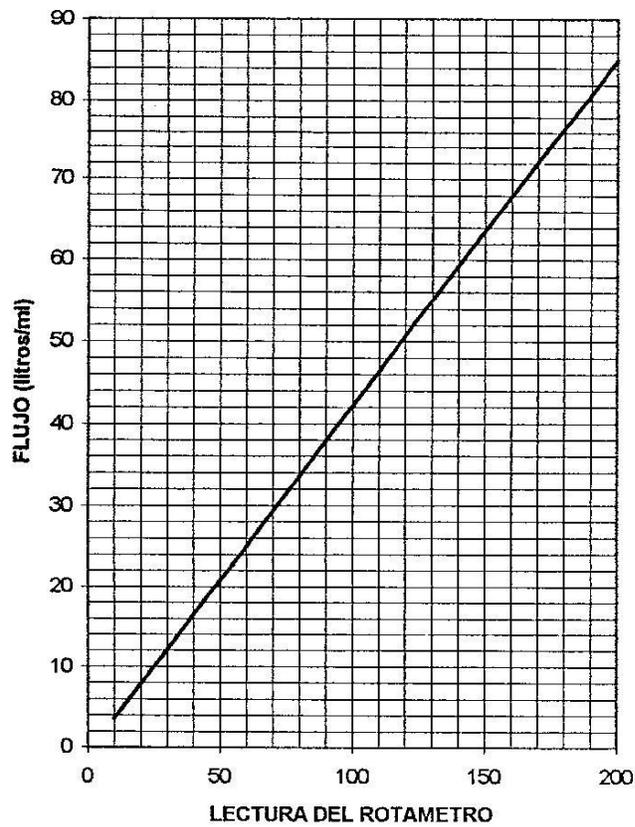
### APENDICE 4

**CURVA DE AFORO DE LA CALDERA**



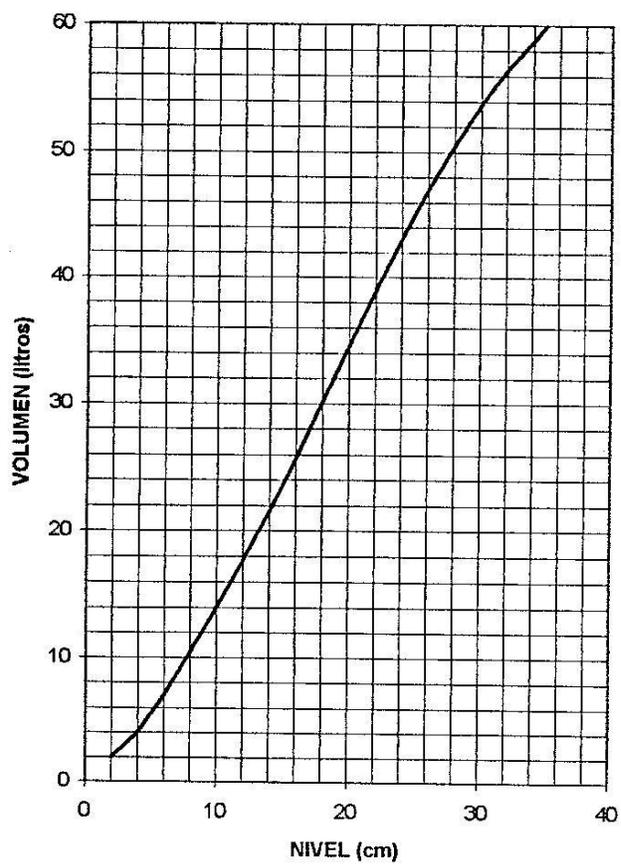
### APENDICE 5

**CURVA DE CALIBRACION PARA EL ROTAMETRO  
DE AGUA DE REFRIGERACION DEL  
CONDENSADOR DE LA PLANTA TERMICA**



### APENDICE 6

**CURVA DE AFORO DEL TANQUE DE  
CONDENSADO DE LA PLANTA TERMICA**



## BIBLIOGRAFIA

- ADAMS, J. and ROGERS, D., Computer Aided Heat Transfer Analysis, McGraw-Hill-Kogakusha, 1973.
- BIRD, R.B., STEWART, W.E., and LIGHTFOOT, E. N., Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., N. Y. 1960.
- CHAPMAN, Heat Transfer, 2a. De. Macmillan, N. Y. 1967.
- CENGEL YUNUS A., Transferencia de Calor y Masa, Tercera Edición, McGrawHill, 2007.
- FOUST, WENZEL, CLUMP, MAUS & ANDERSEN, Principios de Operaciones Unitarias, Jonh Fox & McDONALD, Introducción a la Mecánica de Fluidos, Jonh Wiley & Sons Inc. Wiley & Sons Inc
- FRAAS, A. and OZISIK, M., Heat Exchanger Design, Wiley, 1965.
- GILES, R.V., Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Schaum McGraw-Hill Book Co.
- GOODING, N., Balance de Materia y Energía, U. Nal., 1993.
- GUEVARA , L.A., Guías para el Laboratorio de Transferencia de Calor, U. Nal, 1989.
- HOLMAN, J.P. Transferencia de Calor. Continental S.A. México, 1978.
- HOLLAND, Ch. D., Fundamentos y Modelos de Procesos de Separación, Prentice Hall, 1981.
- INCROPERA – DEWITT , Fundamentos de Transferencia de Calor, 4<sup>o</sup> Edición, Pearson Educación, 1999.
- KARLEKAR, B.V. and DESMOND, R.M., Transferencia de Calor, Interamericana S.A., 1985.
- KERN, Donald. Procesos de Transferencia de Calor. Editorial Continental, decimocuarta edición, 1980.
- KREIGHT, Frank. Principios de Transferencia de Calor. Herrera Hermanos, Sucesores S.A. Primera edición, 1970.
- MATAIX, C., Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Editorial Harla
- McADAMS, William. Heat Transmission. McGraw Hill, third edition, 1954
- McCABE, Warren - SMITH, Julian. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, Editorial McGraw Hill, México 1989.
- MYERS, G.L., Analytical in Conduction Heat Transfer, McGraw-Hill Book Co. 1971.
- OZISIK, M. Necati. Transferencia de Calor. Editorial Mc Graw Hill, primera edición, 1975.
- PERRY, Robert - GREEN, Don. Manual del Ingeniero Químico, sexta edición, 1994
- PITTS, D.R. and SISSON, L.E., Heat Transfer, McGraw-Hill S.A. 1977.
- STREETER, V., Mecánica de Fluidos, McGraw-Hill Book Co.
- WALKER, L. - McADAMS & GILLILAND, Principles of Chemical Engineering, McGraw-Hill Book Co.
- WARREN, M.R., HARTNETT, J.P. and GANIC, E.N. Handbook of Heat Transfer Applications, McGraw-Hill Co. 1985.
- WELTY, J.R., Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería, John Wiley & Sons. Ed. Limusa 1981.
- WELTY, J.R., WICKS, Ch and WILSON, R. , Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, Inc. N.Y. 1969.