

300618

21

29-



# UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE QUIMICA  
Incorporada a la U. N. A. M

## RESOLUCION POR COMPUTADORA DE LAS PRACTICAS DE MOMENTUM DEL LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA DE LA UNIVERSIDAD LA SALLE

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A  
HORACIO VIDRIO AMOR



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

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

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

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

# I N D I C E

INTRODUCCION	1
PROGRAMA	2
DETERMINACION DEL NUMERO DE REYNOLDS	5
OBJETIVO	5
INTRODUCCION	5
DESCRIPCION DE LA PRACTICA	8
DATOS	9
CALCULOS	10
PROGRAMA	12
MEDIDORES DE FLUJO	16
OBJETIVO	16
INTRODUCCION	16
DESCRIPCION DE LA PRACTICA	22
DATOS	24
CALCULOS	26
PROGRAMA	29
ECUACION DE BERNOULLI	34
OBJETIVO	34
INTRODUCCION	34
DESCRIPCION DE LA PRACTICA	38
DATOS	39
CALCULOS	42
PROGRAMA	46
BOMBAS	52
OBJETIVO	52
INTRODUCCION	52
DESCRIPCION DE LA PRACTICA	57
DATOS	58
CALCULOS	60
PROGRAMA	63
PERFIL DE VELOCIDADES	66
OBJETIVO	66
INTRODUCCION	66
DESCRIPCION DE LA PRACTICA	69
DATOS	71
CALCULOS	72
PROGRAMA	75
CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFIA	79

## INTRODUCCION

-----

El objetivo principal de esta tesis es el de proporcionar al alumno de Ingeniería Química de la Universidad La Salle un medio para el mejor aprovechamiento de las prácticas del laboratorio así como la utilización de la computadora como herramienta para resolver problemas propios de la Ingeniería Química.

Para el desarrollo de esta tesis se utilizó una microcomputadora IBM-PC ya que este tipo de equipo se encuentra disponible en las instalaciones de la Universidad La Salle y además existen una gran diversidad de equipos "compatibles".

Se decidió utilizar el lenguaje de programación Pascal debido a que por ser estructurado, se facilita la programación así el desarrollo de sistemas además de los beneficios que aporta su velocidad de ejecución.

El sistema que se desarrolló es modular, y cada practica se considera como una rutina, de esta manera que resulta fácil agregar prácticas mediante la simple inclusión de nuevas rutinas al programa. Además se desarrolló un programa principal que es el encargado de llamar a las demás rutinas.

A continuación se muestra el listado del programa principal:

# PROGRAMA

Program MOMENTUM;

```
( Resolución de las practicas de momentum de la )  
( carrera de Ingeniería Química de la ULSA. )  
  
( TESIS de licenciatura HVA. 1987 )
```

Const

```
Pi = 3.1416;  
NPruebas = 30;
```

Var

```
Numero : Char;  
Final : Boolean;  
Ventana : Array [1..2,1..4] of integer;
```

Procedure ESCOGE (I : Integer);

Begin

```
Window (Ventana[I,1], Ventana [I,2], Ventana[I,3], Ventana[I,4]);  
End; (Procedure ESCOGE)
```

Procedure AYUDA (I : Integer);

Var

```
I : Packed file of char;  
C,Ch : Char;  
Fin,  
Principio,  
Megrilla : Boolean;  
Linea : String[80];  
X : Integer;
```

Begin

Case I of

```
1 : Assign (T,'REYNOLS.HLP');  
2 : Assign (T,'MEDIDOR.HLP');  
3 : Assign (T,'BERNOULLI.HLP');  
4 : Assign (T,'BOMBAS.HLP');  
5 : Assign (T,'PERFIL.HLP');
```

End; (Case I of)

Reset (T);

ESCOGE (2);

ClrScr;

LowVideo;

X := 0;

Fin := False;

While not Fin do

Begin

```
Linea := '';
```

```

Principio := True;
Negrilla := False;
repeat
  If not eof (T) then
    Begin
      Read (T,C);
      If (Principio) and (C = '.') then
        Begin
          Negrilla := True;
          Read (T,C);
          End; (If (Principio))
          Principio := False;
          If C = Chr (13) then
            Read (T,C)
          Else
            Linea := Concat (Linea,C);
          End (If not eof (T))
        End
      Else
        Fin := True;
      until (C = chr(10)) or (Fin);
      X := X + 1;
      If (X = 16) or (Fin) then
        Begin
          For X := X to 16 do WriteLn;
          NormVideo;
          WriteLn;
          Write ( ' < Oprima cualquier tecla para continuar >;' );
          Read (Kbd,Ch);
          DelLine;
          WriteLn;
          LowVideo;
          X := 1;
          End; (If X = 16)
          If Negrilla then NormVideo;
          WriteLn (Linea);
          LowVideo;
        End; (While not eof (T))
      Close (T);
    End; (Procedure AYUDA)

($I REYNOLS.PAS )
($I MEDIDOR.PAS )
($I BERNOLI.PAS )
($I BOMBAS.PAS )
($I PERFIL.PAS )

```

( PROGRAMA PRINCIPAL "MENU" )

```

Begin
Ventana [ 1, 1 ] := 1;
Ventana [ 1, 2 ] := 1;
Ventana [ 1, 3 ] := 77;
Ventana [ 1, 4 ] := 7;
Ventana [ 2, 1 ] := 1;
Ventana [ 2, 2 ] := 8;
Ventana [ 2, 3 ] := 77;

```

```

Ventana [ 2, 4 ] := 24;
Final := False;
ClrScr;
NormVideo;
ESCOGE (1);
GoToXY (27, 2);
Write ('PRACTICAS DE MOMENTUM');
GoToXY (27, 3);
Write ('***** ** *****');
Repeat
  ESCOGE (1);
  LowVideo;
  GoToXY ( 1, 5);
  Deline;
  GoToXY (31, 5);
  Write ('MENU PRINCIPAL');
  ESCOGE (2);
  NormVideo;
  ClrScr;
  GoToXY (25, 2);
  Write (' ESCOJA LA OPCION DESEADA:');
  LowVideo;
  GoToXY (20, 6);
  Write (' 0-> SALE AL SISTEMA OPERATIVO');
  GoToXY (20, 7);
  Write (' 1-> NUMERO DE REYNOLDS');
  GoToXY (20, 8);
  Write (' 2-> MEDIDORES DE FLUJO');
  GoToXY (20, 9);
  Write (' 3-> ECUACION DE BERNOULLI');
  GoToXY (20,10);
  Write (' 4-> BOMBAS');
  GoToXY (20,11);
  Write (' 5-> PERFIL DE VELOCIDADES');
  NormVideo;
  Read (Kbd,Numero);
  Case Numero of
    '0' : Final := True;
    '1' : REYNOLDS;
    '2' : MEDIDOR;
    '3' : BERNOULLI;
    '4' : BOMBAS;
    '5' : PERFIL;
  end; (Case Numero of)
Until Final;
End.

```

## DETERMINACION DEL NUMERO DE REYNOLDS

-----

### OBJETIVO

El alumno deberá efectuar el experimento de Reynolds, observará las diferencias entre el flujo laminar, el flujo de transición y el flujo turbulento, y determinará el número de Reynolds para cada flujo.

### INTRODUCCION

Osborne Reynolds, físico inglés de finales del siglo XIX, llevó a cabo una serie de experimentos sobre flujo de fluidos en tubos; los experimentos pretendían estudiar los flujos de un líquido en una tubería variando la velocidad de los mismos. Para esto se descargó agua por una tubería transparente, con un gasto constante para cada prueba; junto con la corriente de agua se hizo fluir otra de pequeñísimo caudal constituida por algún colorante. Conociendo la cantidad de líquido descargado en un determinado tiempo se puede calcular el gasto, y conociendo la sección de la tubería se determina la velocidad media del desplazamiento. Haciendo varias pruebas se observa que mientras se utiliza una velocidad pequeña, la vena líquida coloreada no se mezcla apreciablemente con la corriente principal, y se dice que se tiene un flujo laminar; en cambio al aumentar la velocidad, la vena coloreada empieza a ondularse fuertemente, provocando así un flujo de transición; finalmente a una gran velocidad ambos líquidos se mezclan rápidamente, indicando un flujo turbulento.

Estos experimentos confirmaron la existencia de diferentes flujos (laminar, de transición y turbulento). Además de ilustrar algunas características de cada uno de estos.

En el flujo de tipo laminar, el fluido se desplaza por capas paralelas entre sí y al eje de la tubería; el vector velocidad de cualquier punto que se considere en la corriente es paralelo al eje de la tubería y no posee componentes normales a esa dirección. En cambio en la turbulencia aparecen componentes perpendiculares a la dirección del flujo ocasionando pequeños remolinos que hacen que los dos fluidos se mezclen (agua y colorante).

En el flujo laminar, las moléculas de fluido que sucesivamente vengán a ocupar un punto determinado del espacio comprendido dentro del tubo, poseerán siempre una misma velocidad, dirección y sentido. Las distintas capas del fluido se desplazarán con diferente velocidad según su localización respecto al eje del tubo; entre más cerca se encuentre la capa del líquido del eje del tubo, mayor será la velocidad con la que se desplaza esa capa.

En cambio, con régimen turbulento el vector velocidad no será constante en el mismo punto del espacio, considerado en momentos distintos. Sin embargo, el perfil de velocidades en este tipo de flujo muestra que no varía con respecto a la distancia al eje del tubo (no hay formación de capas); por este motivo a este tipo de flujo se le denomina "flujo tipo tapón".

Reynolds, al estudiar el punto crítico para el tránsito de un régimen a otro, encontró que si se conoce el diámetro del tubo,  $D$ , la densidad del fluido,  $\delta$  y la viscosidad,  $\mu$ . Se puede obtener una expresión cuyas dimensiones son la de una velocidad;

$$\frac{\mu}{D \delta} \quad [=] \quad L T^{-1}$$

Esta expresión se denomina "velocidad característica del fluido y del tubo" y se representa por  $u$ . Reynolds encontró que la relación entre la velocidad con que se desplaza el fluido y la velocidad característica, se obtiene una expresión que define con precisión el régimen de desplazamiento. Esta relación se conoce como índice o número de Reynolds ( $Re$ ).

$$Re = \frac{u}{\frac{\mu}{D \delta}} = \frac{u}{\mu} D \delta$$

Experimentalmente se ha visto que siempre que el número de Reynolds es menor a 2000, el flujo es laminar. Para valores de Reynolds entre 2000 y 4000, el régimen es de transición; y para mayores de 4000 el flujo es turbulento.

## DESCRIPCION DE LA PRACTICA

El aparato utilizado es semejante al utilizado por Reynolds. Consiste en un tanque que contiene agua, en la parte inferior del mismo está la descarga donde se encuentra una válvula que sirve para controlar el flujo. Después hay una tubería de vidrio. Dentro del tanque hay un recipiente cerrado que contiene colorante. Dicho recipiente descarga en un tubo de diámetro mucho menor que el anterior y llega al centro del tubo de vidrio.

La práctica consiste de determinar primero el diámetro interior del tubo de vidrio y después calcular el número de Reynolds para un flujo dado.

Para determinar el diámetro interno del tubo de vidrio el alumno deberá medir la longitud del tubo y abrir la válvula de paso del colorante hasta obtener una gota; a continuación se abre la válvula de paso de agua y se toma el tiempo que tarda la gota en recorrer la longitud del tubo. Después, sin modificar el flujo, se llena una proveta y se toma el tiempo de llenado. Se anotan los datos y se repite varias veces esta operación variando la abertura de la válvula de paso del agua.

Con esta información el alumno será capaz de obtener el diámetro interno en cada prueba y haciendo un promedio obtendrá el diámetro interno del tubo de vidrio.

Una vez determinado el diámetro interno, se puede calcular el número de Reynolds de cada una de las pruebas anteriores.

DATOS

PROPIEDADES FISICAS

$$T = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\delta = 0.9998 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu = 0.0115 \text{ poises}$$

$$L = 60 \text{ cm}$$

VARIABLES

T temperatura

$\delta$  densidad

$\mu$  viscosidad

L longitud del tubo de vidrio

PRUEBA 1

$$t_1 = 7.76 \text{ seg}$$

$$q_1 = \frac{540 \text{ ml}}{20.42 \text{ seg}} = 26.4447 \text{ ml/seg}$$

$t_i$  tiempo de la prueba i

$q_i$  gasto de la prueba i

PRUEBA 2

$$t_2 = 3.04 \text{ seg}$$

$$q_2 = \frac{560 \text{ ml}}{5.28 \text{ seg}} = 106.0606 \text{ ml/seg}$$

PRUEBA 3

$$t_3 = 5.11 \text{ seg}$$

$$q_3 = \frac{300 \text{ ml}}{6.01 \text{ seg}} = 49.9168 \text{ ml/seg}$$

PRUEBA 4

$$t_4 = 3.40 \text{ seg}$$

$$q_4 = \frac{470 \text{ ml}}{4.42 \text{ seg}} = 106.3348 \text{ ml/seg}$$

PRUEBA 5

$$t_5 = 2.5 \text{ seg}$$

$$q_5 = \frac{530 \text{ ml}}{4.95 \text{ seg}} = 107.0707 \text{ ml/seg}$$

CALCULOS

ECUACIONES

$$u = \frac{L}{t} \dots\dots\dots (1) \quad u \text{ velocidad}$$

$$q = A u \dots\dots\dots (2) \quad q \text{ gasto}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \dots\dots\dots (3) \quad A \text{ área}$$

$$Re = \frac{D u \delta}{\mu} \dots\dots\dots (4) \quad Re \text{ número de Reynolds}$$

Despejando A de (2) e igualando con (3)

$$A = \frac{q}{u}$$

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{q}{u} \dots\dots\dots (5)$$

Sustituyendo (1) en (5) y despejando D

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{q t}{L}$$

$$D^2 = \frac{4 q t}{L \pi} \dots\dots\dots (6)$$

Para cada prueba se determina la velocidad con la ecuación (1) y el diámetro con la ecuación (6), se obtiene un diámetro promedio y utilizando éste se calcula de número de Reynolds con la ecuación (4).

PRUEBA	TIEMPO (seg)	GASTO (ml/seg)	VELOCIDAD (cm/seg)	DIAMETRO (cm)
1	7.76	26.4447	7.7319	2.0067
2	3.04	106.0606	19.7308	2.6157
3	5.11	49.9168	11.7416	2.3265
4	3.40	106.3348	17.6470	2.7690
5	2.50	107.0707	24.0000	2.3833

Eliminando la prueba 1 se calcula el promedio de las otras cuatro restantes.

$$D \text{ (promedio)} = 2.5238 \text{ cm}$$

Aplicando este diámetro se calcula el número de Reynolds para las pruebas anteriores.

PRUEBA	No. DE REYNOLDS	
1	eliminada	
2	4330	( turbulento )
3	2576	( transición )
4	3872	( transición )
5	5260	( turbulento )

## PROGRAMA

Overlay Procedure REYNOLDS;

( Determinación del Número de Reynolds. )

Var

Numero : Char;  
Final : Boolean;

Procedure PRACTICA;

Var

Longitud,  
Densidad,  
Viscosidad,  
Promedio,  
Reynolds : Real;  
Pruebas,  
Cuantas,  
Total,  
I : Integer;  
Tiempo,  
Gasto,  
Velocidad,  
Diametro : Array [1..NPruebas] of Real;  
Respuesta : Char;

Begin

( TOMA DATOS )

```

ESCOGE (2);
ClrScr;
NormVideo;
Writeln ('          PROPIEDADES FISICAS');
Writeln;
LowVideo;
Write (' Densidad del fluido          (g/cm3) ');
ReadLn (Densidad);
Write (' Viscosidad del fluido        (Poises) ');
ReadLn (Viscosidad);
Writeln;
Write (' Longitud del tubo              (cm) ');
ReadLn (Longitud);
Writeln;
Write (' Número de pruebas                <1 ... 30> ');
ReadLn (Pruebas);
Writeln;
Writeln ('          Tiempo (seg)          Gasto (ml/seg)');
For I := 1 to Pruebas do
  Begin
    Write (I:16, ' ');
    Write (' :S);
    Read (Tiempo[I]);
  
```

```

Write (' ':20);
ReadLn (Gasto[I]);
End; (For I := 1)
Repeat
ClrScr;
WriteLn ('                Tiempo (seg)                Gasto (ml/seg)');
For I := 1 to Pruebas do
WriteLn (I:16, ', ', Tiempo[I]:10:4, Gasto[I]:25:4);
WriteLn;
Write ('                Datos Correctos <S/N> ');
ReadLn (Respuesta);
Respuesta := UpCase (Respuesta);
If Respuesta = 'N' then
Begin
WriteLn;
Write (' Número de dato Equivocado ');
ReadLn (I);
WriteLn;
Write ('                ', I:3, ', ');
Write (' ':5);
Read (Tiempo[I]);
Write (' ':20);
ReadLn (Gasto[I]);
End; (If Respuesta = 'N')
Until Respuesta = 'S';
                ( PROCESA DATOS )

ClrScr;
NormVideo;
WriteLn ('RESULTADOS':40);
WriteLn;
WriteLn;
WriteLn ('                Velocidad                Diametro');
WriteLn;
LowVideo;
Promedio := 0;
For I := 1 to Pruebas do
Begin
Velocidad[I] := Longitud / Tiempo[I];
Diametro[I] := Sqrt ((4 * Gasto[I]) / (PI * Velocidad [I]));
Promedio := Promedio + Diametro[I];
WriteLn (I:11, ', ', Velocidad[I]:10:3, ' cm/seg', Diametro[I]:20:3, ' cm');
End; (For I := 1)
WriteLn;
Write ('                Cuantas pruebas Elimina '); ReadLn (Cuantas);
Total := Pruebas - Cuantas;
For I := 1 to Cuantas do
Begin
Write ('                Número de Prueba eliminada ');
ReadLn (I);
Tiempo[I] := -1;
Promedio := Promedio - Diametro[I];
End; (For I := 1)
Promedio := Promedio / Total;
ClrScr;
NormVideo;

```

```

WriteLn ('RESULTADOS':40);
WriteLn;
WriteLn;
WriteLn ('          Diametro Promedio ', Promedio:7:3);
WriteLn;
WriteLn ('          Reynolds      Flujo');
LowVideo;
WriteLn;
For I := 1 to Pruebas do
  Begin
    Write (I:20,');
    If Tiempo[I] = -1 then
      WriteLn ('Eliminada':10)
    else
      Begin
        Reynolds := Promedio * Densidad * Velocidad[I] / Viscosidad;
        Write (Reynolds:10:4);
        If Reynolds <= 2000 then
          WriteLn (' ( laminar  )')
        else
          If Reynolds <= 4000 then
            WriteLn (' ( transicion )')
          else
            WriteLn (' ( turbulento )');
        End; (If Tiempo[I] = -1)
      End; (For I := 1)
    WriteLn;
    WriteLn;
    NormVideo;
    WriteLn ('<< fin de la practica >>':45);
    ReadLn (Respuesta);
  End; (Procedure PRACTICA)

```

```

(          INICIA PROCEDURE REYNOLDS          )
Begin
  Final := False;
  ESCOGE (1);
  LowVideo;
  GoToXY ( 1, 5); Deline;
  GoToXY (29, 5); Write ('NUMERO DE REYNOLDS');
  ESCOGE (2);
  repeat
    ClrScr;
    NormVideo;
    GoToXY (25, 2);
    Write (' ESCOJA LA OPCION DESEADA:');
    LowVideo;
    GoToXY (20, 6);
    Write (' 0-> REGRESA AL MENU PRINCIPAL');
    GoToXY (20, 7);
    Write (' 1-> INTRODUCCION');
    GoToXY (20, 8);
    Write (' 2-> PRACTICA');
    NormVideo;
    Read (Kbd,Numero);
  until Final;

```

```
Case Numero of
'0' : Final := True;
'1' : AYUDA (1);
'2' : PRACTICA;
end; (Case Numero of)
Until Final;
End;
```

## MEDIDORES DE FLUJO

### OBJETIVO

El objetivo de esta práctica es que el alumno conozca algunos de los medidores de flujo, entienda el principio de su funcionamiento y pueda determinar gastos utilizando los medidores de flujo.

### INTRODUCCION

#### Placa de Orificio.

El método más práctico para medir gastos en tuberías, consiste en poner una "restricción", llamada dispositivo primario, dentro del tubo. El dispositivo primario tiene una abertura fija de área conocida. Esta restricción en el flujo ocasiona un aumento temporal de la velocidad del fluido y por lo consiguiente un decremento en la presión. La relación entre el cambio de presión y la velocidad del fluido es la base para determinar flujos con este tipo de medidores.

El flujo es la velocidad por el área

$$q = A u \quad [=] \frac{L^3}{T}$$

donde A es la sección en el dispositivo primario y u es la velocidad del fluido.

Como un medidor de flujo mide la diferencia de presión en un

area conocida, y como la diferencia de presión varía con la velocidad, entonces es posible conocer la velocidad a través de la diferencia de presión.

Existen varias condiciones para poder utilizar este tipo de medidores:

1. El fluido debe ser homogéneo y sus propiedades deben ser conocidas.
2. La presión, temperatura y diámetro de la tubería deben ser determinadas con precisión.
3. El flujo debe ser estable y operar en régimen turbulento.

Existen varios medidores de flujo que se basan en este principio, entre los más importantes se encuentran: el tubo de pitot, el tubo de venturi, y la placa de orificio.

Entre los medidores de flujo por diferencia de presión, la placa de orificio es el más común, y el de menor costo. Su exactitud es igual al de cualquier otro medidor. Consiste en una placa con un orificio de dimensiones conocidas; la pérdida de presión debida a este dispositivo primario es un poco mayor que en otros casos. Las ventajas que ofrece este medidor (bajo costo, fácil reemplazamiento, mantenimiento sencillo y fácil de duplicar) generalmente son mayores que sus desventajas (diferencia y caída de presión altas).

En el diseño de un medidor de orificio se deben de tomar en cuenta el tipo de tomas que tendrá el manómetro, las cuales, según su posición con respecto a la placa se clasifican en:

1. Tomas en la brida -- se localizan una pulgada antes de la placa y una pulgada después de la placa: son el tipo de tomas más comunes, se utilizan bridas especiales que contienen perforaciones que constituyen las tomas del manómetro.
2. Tomas de vena contracta -- se localizan a una distancia igual a un diámetro de la tubería antes de la placa y aproximadamente medio diámetro después de ésta. La posición exacta de esta toma se determina con la relación de diámetros orificio/tubería ya que esta toma se debe localizar en el punto donde la contracción del fluido es máxima. Este tipo de tomas permiten el uso de tomas ordinarias en la tubería, debido a que una de las tomas se localiza a medio diámetro de la placa, la brida estorba, por lo que se recomienda este tipo de tomas cuando la tubería es de cuatro o más pulgadas de diámetro.
3. Tomas de placa -- se encuentran adyacentes a la placa de orificio. Al igual que las tomas de brida, las tomas de placa utilizan bridas especiales que contienen perforaciones de manera que la placa de orificio está situada entre las tomas del manómetro. Este tipo de tomas solo se utilizan con tuberías menores a dos pulgadas.
4. Tomas de tubería -- se localizan dos y medio diámetros antes de la placa y ocho diámetros después de la misma. Este tipo de tomas permiten medir la pérdida de presión permanente

debida a la placa de orificio. La diferencia de presión medida es menor que la obtenida con otros tipos de tomas.

### Vertedero.

Para determinar gastos en canales abiertos se puede utilizar el vertedero, el cual consiste en una cortina o pared que obstruye el canal, dicha pared contiene una abertura por donde pasará el flujo. Dependiendo de la forma de la abertura el vertedero puede ser rectangular, triangular, trapezoidal, etc.

Se llama cabeza del vertedero a la altura que alcanza el líquido sobre la base de la abertura de éste.

Para cada tipo de vertedero existe una fórmula. La mayoría de las fórmulas desarrolladas se aplican para agua, pero se han hecho estudios para líquidos con diferentes propiedades físicas.

Basada en experimentos se desarrolló la fórmula de Francis, la cual se aplica para vertederos rectangulares con una base entre 3.5 y 17 pies y una cabeza entre 0.6 y 1.6 pies. La fórmula es:

$$q = 3.33 \left( b - \frac{nh}{10} \right) \left( \left( h + \frac{u^2}{2g} \right)^{3/2} - \left( \frac{u^2}{2g} \right)^{3/2} \right)$$

Donde q es el gasto; b es la longitud de la base del vertedero; n varía según la forma de las orillas del vertedero; h es la cabeza del vertedero; y u es la velocidad promedio del flujo.

Existe una fórmula de Francis modificada que se puede aplicar de forma más general a vertederos rectangulares cuya base es mayor que la cabeza.

$$q = 0.415 (b - 0.2 h) h^{3/2} (2 g)^{1/2}$$

Y para vertederos rectangulares cuya cabeza es mayor que la base, existe otra modificación a la fórmula anterior.

$$q = 0.386 b h^{3/2} (2 g)^{1/2}$$

Para vertederos con bases entre 1.64 a 6.56 pies y cabezas entre 0.164 y 1.969 pies, se puede aplicar la fórmula de Bazin.

$$q = \left( 3.25 + \frac{0.0789}{h} \right) \left( 1 + 0.55 \left( \frac{h}{h+z} \right)^2 \right)^{3/2} b h$$

Donde z es la altura del líquido medida desde la base del canal.

La fórmula de Ftenley y Sterns se aplica para bases entre 5 y 19 pies y cabezas menores a 0.07 pies.

$$q = 3.31 b \left( h + \alpha \frac{u^2}{2 g} \right)^{3/2} + 0.007 b$$

Donde  $\alpha$  es una constante que depende de la altura del líquido (z).

Para vertederos triangulares se puede aplicar la siguiente fórmula.

$$q = \frac{B}{15} C \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) (2 g)^{1/2} h^{5/2}$$

Donde  $\theta$  es el angulo de abertura del triangulo; y C es una constante cuyo valor es aproximadamente 0.60 para cabezas mayores a 1 pie.

Para vertedros trapezoidales se puede aplicar la fórmula de Cipolletti.

$$q = 3.36 b h^{3/2}$$

## DESCRIPCION DE LA PRACTICA

### Placa de Orificio.

El medidor de placa de orificio se encuentra en una red de tubería. Está montado en una tubería de acero comercial de 1.5 pulgadas cedula 40. Para determinar la caída de presión se utiliza un manómetro diferencial de mercurio cuyas tomas se encuentran a 5 centímetros antes de la placa y 30 centímetros delante de la misma. La práctica consiste en determinar el diámetro del orificio y después con ese diámetro calcular gastos. Existen en el sistema de tubería varias válvulas que se pueden utilizar para variar el flujo que pasa por el orificio, también existe en la red un medidor de turbina mediante el cual se puede determinar el flujo que circula en el orificio.

El método utilizado es el siguiente: se abren las válvulas de paso para que el flujo circule por el orificio, se recomienda que los diferentes flujos se regulen variando la abertura de una válvula solamente. Después se lee en el medidor el volumen inicial, se arranca la bomba que hace fluir el líquido, se toma la medida del manómetro diferencial y se para la bomba, se lee en el medidor el volumen final y conociendo el tiempo transcurrido entre las lecturas inicial y final del medidor, se conocerá el gasto.

Con estos datos, y haciendo varias pruebas con diferentes flujos, el alumno será capaz de determinar el diámetro del orificio, y después utilizando ese diámetro, se podrá calcular el gasto que fluye en la tubería.

## Vertedero.

El vertedero tipo rectangular se encuentra en un tanque, con una base más angosta que la altura y con ambos lados terminados en punta. Para utilizarlo se debe medir la base del vertedero. Una vez determinada, se hace llegar hasta el tanque el flujo de agua, se espera a que ésta alcance una altura constante en el vertedero y se determina su altura sobre la base del vertedero. Este procedimiento se repite variando el flujo mediante una válvula.

Con esta información se calcula el gasto en cada una de las pruebas realizadas.

DATOS

Orificio.

PROPIEDADES FISICAS

$$T = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\delta_m = 13.5 \text{ g/cm}^3$$

$$\delta_l = 0.9998 \text{ g/cm}^3$$

$\delta_m$  densidad del mercurio.

$\delta_l$  densidad del agua.

$$g = 9.78 \text{ m/seg}$$

g aceleración de la gravedad.

$$d_i = 4.089 \text{ cm}$$

$d_i$  diámetro int. del tubo.

PRUEBA 1

$$h_1 = 10.2 \text{ cm}$$

$h_i$  altura en el manómetro.

$$q_1 = \frac{22000 \text{ cm}^3}{11.96 \text{ seg}} = 1839.4649 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$q_i$  gasto.

PRUEBA 2

$$h_2 = 19.3 \text{ cm}$$

$$q_2 = \frac{64000 \text{ cm}^3}{28.81 \text{ seg}} = 2221.4509 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

PRUEBA 3

$$h_3 = 23.7 \text{ cm}$$

$$q_3 = \frac{48000 \text{ cm}^3}{20.06 \text{ seg}} = 2392.8215 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

PRUEBA 4

$$h_4 = 28.5 \text{ cm}$$

$$q_4 = \frac{71000 \text{ cm}^3}{25.94 \text{ seg}} = 2737.0856 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

Vertedro.

$L = 5 \text{ cm}$

$L$  abertura del  
vertedero.

$h_1 = 6.3 \text{ cm}$

$h_i$  altura del  
agua en el  
vertedero.

$h_2 = 10.3 \text{ cm}$

PRUEBA 1

PRUEBA 2

$h_3 = 11.0 \text{ cm}$

PRUEBA 3

$h_4 = 11.3 \text{ cm}$

PRUEBA 4

$h_5 = 11.4 \text{ cm}$

PRUEBA 5

CALCULOS

Placa de Orificio.

Como las tomas del manómetro se encuentran a 5 y a 30 centímetros, se trata de tomas de tubería, así que lo que se determina con el manómetro es la caída de presión permanente.

$$P_1 - P_4 = h [ \delta_m - \delta_1 ] \dots\dots\dots (1)$$

P1 - P4 caída de presión permanente.

$$\beta = \frac{D_o}{D} \dots\dots\dots (2)$$

$\beta$  relación de diámetros.

$D_o$  diámetro del orificio.

D diámetro del tubo.

$$\frac{P_1 - P_4}{P_3 - P_2} = ( 1 - \beta^2 ) \dots\dots\dots (3)$$

P3 - P2 caída de presión en la placa de orificio.

$$A = \frac{D_o^2 \pi}{4} \dots\dots\dots (4)$$

A area del orificio.

$$q = A C_o \left( 2 g \frac{P_3 - P_2}{\delta_1} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (5)$$

q gasto.

Despejando P3 - P2 de (2)

$$P_3 - P_2 = \frac{P_1 - P_4}{1 - \beta^2} \dots\dots\dots (6)$$

Despejando A de (5)

$$A = \frac{q}{C_o \left( 2 g \frac{P_2 - P_3}{\delta_1} \right)^{0.5}} \dots\dots\dots (7)$$

Despejando D1 de (4)

$$D1 = \left( \frac{A \cdot 4 \cdot 0.5}{\pi} \right) \dots\dots\dots (9)$$

Con la ecuación (1) se obtiene P1 - P4. Después se supone D2 (diámetro del orificio), se calcula  $\beta$  con la ecuación (2) y el área con la ecuación (4). Con  $\beta$  y P1 - P4 se obtiene P3 - P2 con la ecuación (6). Con estos datos se obtiene q con la ecuación (5) y se compara con el gasto que tenemos como dato, si son suficientemente semejantes, el diámetro supuesto será el correcto, pero si no lo son, entonces el diámetro supuesto no es el correcto y se debe suponer otro. Para esto se utiliza la ecuación (7) donde se obtiene una nueva área, y el nuevo diámetro supuesto se obtiene con la ecuación (8). Con el nuevo diámetro se repite toda la secuencia de cálculos, hasta obtener el diámetro correcto. Este procedimiento se repite con cada prueba.

Prueba	Presión (cm Hg)	Gasto (cm <sup>3</sup> /seg)
1	10.2	1839.4649
2	19.3	2221.4509
3	23.7	2392.8215
4	28.3	2737.0856

Utilizando el método antes descrito.

Prueba	Diámetro (cm)
1	2.5782
2	2.4157
3	2.3817
4	2.4325

Si se calcula el promedio de los 4 diámetros se obtiene.

$$D1 = 2.452025 \text{ cm}$$

Obteniendo el diámetro se pueden calcular gastos aplicando las fórmulas (1), (6) y (5).

### Vertedero

Como se trata de un vertedero cuya base es menor que la altura, se utilizará la fórmula de Francis modificada.

$$q = 0.386 b h^{1.5} (2g)^{0.5}$$

Donde

q = gasto	[=] cm <sup>3</sup> /seg
b = base del vertedero	[=] cm
h = altura del líquido	[=] cm
g = aceleración de la gravedad	[=] cm/seg <sup>2</sup>

Aplicando esta fórmula para cada prueba, obtenemos el gasto.

Prueba	Altura (cm)	Gasto (cm <sup>3</sup> /seg)
1	6.3	1351.81616
2	10.3	2825.93812
3	11.0	3118.85970
4	11.3	3247.31543
5	11.4	3290.51661

# PROGRAMA

Overlay Procedure MEDIDOR;

( Medidores de flujo. )

Const

G = 981;  
Co = 0.61;  
Error = 0.001;  
K = 0.386;

Var

Numero : Char;  
Final : Boolean;

Procedure ORIFICIO;

Var

Densidad,  
HgDensidad,  
Diametro,  
Promedio,  
Aux1,  
Aux2,  
Aux3 : Real;  
Pruebas,  
Cuantas,  
Total,  
I : Integer;  
Respuesta : Char;  
Altura,  
Gasto,  
Orificio : Array [1..NPruebas] of Real;

Begin

( TOMA DATOS )

ESCDEG (2);  
ClrScr;  
NormVideo;  
WriteLn (' PROPIEDADES FISICAS');  
WriteLn;  
LowVideo;  
Write (' Densidad del fluido (g/cm<sup>3</sup>) ');  
ReadLn (Densidad);  
Write (' Densidad del Mercurio (g/cm<sup>3</sup>) ');  
ReadLn (HgDensidad);  
WriteLn;  
Write (' Diametro de la tuberfa (cm) ');  
ReadLn (Diametro);  
WriteLn;  
Write (' Número de pruebas <1 ... 30> ');  
ReadLn (Pruebas);  
WriteLn;

```

WriteLn ('                Altura (cm)                Gasto (cm3/seg)');
For I := 1 to Pruebas do
  Begin
    Write (I:16,');
    Write (' :5);
    Read (Altura[I]);
    Write (' :20);
    ReadLn (Gasto[I]);
  End; (for I := 1)
Repeat
  ClrScr;
  WriteLn ('                Altura (cm)                Gasto (ml/seg)');
  WriteLn;
  For I := 1 to Pruebas do
    WriteLn (I:16,)', Altura[I]:10:4, Gasto[I]:25:4);
  WriteLn;
  Write ('                Datos Correctos <S/W> ');
  ReadLn (Respuesta);
  Respuesta := UpCase (Respuesta);
  If Respuesta = 'N' then
    Begin
      WriteLn;
      Write (' Número de dato Equivocado ');
      ReadLn (I);
      WriteLn;
      Write ('                ',I:3,');
      Write (' :5);
      Read (Altura[I]);
      Write (' :20);
      ReadLn (Gasto[I]);
      End; (If Respuesta = 'N')
Until Respuesta = 'S';
      ( PROCESA DATOS )

ClrScr;
NormVideo;
WriteLn ('RESULTADOS':40);
WriteLn;
WriteLn;
WriteLn ('                Altura del                Gasto                Diametro');
WriteLn ('                Manómetro                del Orificio');
LowVideo;
WriteLn;
Promedio := 0;
For I := 1 to Pruebas do
  Begin
    Orificio[I] := 0.5 * Diametro;
    Aux1 := Altura[I] * (Hgdensidad - Densidad);
    Repeat
      Aux2 := Aux1 / (1 - Sqr(Orificio[I] / Diametro));
      Aux3 := Sqr(Orificio[I]) * Pi * Co * Sqrt(2 * G * Aux2 / Densidad);
      Aux3 := (Gasto[I] - (Aux3 / 4)) / Gasto[I];
      Aux2 := Gasto[I] / (Co * Sqrt(2 * G * Aux2 / Densidad));
      Orificio[I] := Sqrt((Aux2 * 4 / Pi);
    Until Abs (Aux3) < Error;
    Promedio := Promedio + Orificio[I];
  
```

```

Write (1:9,''), Altura[1]:11:2,' cm', Gasto[1]:15:4;
WriteLn (' cm3/seg',Orificio[1]:12:2,' cm');
End; (For I := 1)
WriteLn;
Write ('                Cuentas pruebas Elimina ');
ReadLn (Cuantas);
Total := Pruebas - Cuentas;
For I := 1 to Cuentas do
  Begin
    Write ('                Número de Prueba eliminada ');
    ReadLn (I);
    Altura[I] := -1;
    Promedio := Promedio - Orificio[I];
  End; (For I := 1)
Promedio := Promedio / Total;
ClrScr;
NormVideo;
WriteLn;
WriteLn;
WriteLn ('                Diametro Promedio del Orificio ', Promedio:7:3,' cm');
LowVideo;
WriteLn;
Write ('                Calcula Gastos      <S/N> ');
ReadLn (Respuesta);
Respuesta := UpCase (Respuesta);
If Respuesta = 'S' then
  Begin
    ClrScr;
    WriteLn;
    NormVideo;
    WriteLn ('                Teclee <0> para terminar');
    WriteLn;
    WriteLn ('                Altura (cm)                Gasto (cm3/seg)');
    LowVideo;
    WriteLn;
    Aux1 := (HgDensidad - Densidad) / ( 1 - Sqr(Promedio / Diametro));
    Repeat
      Write (' ':20); Read (Aux2);
      If Aux2 > 0 then
        Begin
          Aux3 := Sqr(Promedio) * Sqr(2 * G * Aux2 * Aux1 / Densidad);
          NormVideo;
          WriteLn (' ':10,(Aux3 * Pi * Co / 4):14:4);
          LowVideo;
          End; (If Aux2 > 0)
        Until Aux2 <= 0;
      End; (If Respuesta := 'S')
    WriteLn;
    WriteLn;
    NormVideo;
    WriteLn ('<< fin de la practica >>':45);
    ReadLn (Respuesta);
  End; (Procedure ORIFICIO)

```

Procedure VERTEDERO;

Var

Base,  
Altura,  
Gasto : Real;  
Respuesta : Char;

Begin

( TOMA DATOS )

ESCQGE (2);  
ClrScr;  
Write (' Base del Vertedero (cm) ');  
Readln (Base);

( PROCESA DATOS )

Writeln;  
NormVideo;  
Writeln (' Tecllee <D> para terminar!');  
Writeln;  
Writeln (' Altura (cm) Gasto (cm3/seg)');  
LowVideo;  
Writeln;  
Repeat

Write (' ':20); Read (Altura);  
If Altura > 0 then

Begin

Gasto := Ln(K \* Base) + 0.5 \* Ln(2 \* G) + 1.5 \* Ln(Altura);  
Gasto := Exp(Gasto);  
NormVideo;  
Writeln (' ':10, Gasto:14:4);  
LowVideo;

End; (If Altura > 0)

Until Altura <= 0;

Writeln;  
Writeln;  
NormVideo;  
Writeln ('<< fin de la practica >>:45);  
Readln (Respuesta);

End; (Procedure VERIEDERO)

( INICIA PROCEDURE MEDIDOR )

Begin

Final := False;  
ESCQGE (1);  
LowVideo;  
GoToXY ( 1, 5);  
DelLine;  
GoToXY (29, 5);  
Write ('MEDIDORES DE FLUJO');  
ESCQGE (2);  
repeat  
ClrScr;  
NormVideo;  
GoToXY (25, 2);  
Write (' ESCOJA LA OPCION DESEADA:');

```
LowVideo;
GoToXY (20, 6);
Write (' 0-> REGRESA AL MENU PRINCIPAL');
GoToXY (20, 7);
Write (' 1-> INTRODUCCION');
GoToXY (20, 8);
Write (' 2-> MEDIDOR DE ORIFICIO');
GoToXY (20, 9);
Write (' 3-> MEDIDOR DE VERTEDERO');
NormVideo;
Read (Kbd,Numero);
  Case Numero of
    '0' : Final := True;
    '1' : AYUDA (2);
    '2' : ORIFICIO;
    '3' : VERTEDERO;
  End; (Case Numero of)
Until Final;
End;
```

## ECUACION DE BERNOULLI

-----

### OBJETIVO

El alumno deberá efectuar balances de energía utilizando ecuación de Bernoulli, así como entender algunas de sus aplicaciones.

### INTRODUCCION

El teorema de Bernoulli es un balance de energía que se basa en la ley de conservación de la energía y se utiliza para la resolución de sistemas de fluidos en movimiento, aunque se puede simplificar para sistemas estáticos. Para establecer un balance de energía, es preciso analizar uno a uno los distintos tipos de energía que se pueden presentar en un sistema. Y estos son:

1. Incremento de Energía Potencial: La ecuación para evaluar la energía potencial por unidad de masa es la siguiente:

$$dE = g dz$$

Para obtener las unidades de energía por unidad de masa [Fl/M], dividimos entre  $gc$  y obtenemos para el incremento de energía potencial:

$$dE = E_2 - E_1 = \frac{g}{gc} (z_2 - z_1) = \frac{g}{gc} dz$$

2. Incremento de energía cinética: La energía cinética por unidad de masa para un fluido está dada por:

$$E = \frac{u^2}{2gc}$$

3. Incremento de energía debido a una diferencia de presiones: La expresión general es:

$$dE = V dP = \frac{P_2 - P_1}{\delta}$$

Tomando en cuenta estos tipos de energía, la ecuación de Bernoulli queda:

$$\frac{g}{gc} dz + \frac{du^2}{2gc} + \frac{dP}{\delta} = 0$$

Cuando el fluido del sistema en estudio está influenciado por superficies estáticas, como en el caso de flujos a través de tuberías, se tienen capas límites por lo que existe una pérdida de energía debida a la fricción entre la capa límite y la superficie con que está en contacto. Esta pérdida de energía se debe considerar en el balance de Bernoulli. Por otra parte si el sistema se ve afectado por el suministro de energía desde una fuente externa, como en el caso de una bomba en una tubería, esta energía deberá ser considerada en el balance. Tomando en cuenta estas modificaciones, la ecuación de Bernoulli, se utiliza en el diseño de tuberías en general.

Para el cálculo de pérdida de energía debidas a fricción en los accesorios de las tuberías, como son válvulas, codos, reducciones, etc.; se puede utilizar el método de las longitudes equivalentes. La longitud equivalente es la longitud de tubería recta en la cual se verifica una pérdida por fricción equivalente a la que se tiene en el accesorio, Existen tablas en donde se encuentran tabuladas las longitudes equivalentes de diversos accesorios.

Para el cálculo de redes de distribución, se hace una analogía con las redes eléctricas donde el gasto hidráulico corresponde a la intensidad de la corriente eléctrica, la caída de presión con la diferencia de potencial y la resistencia hidráulica con la impedancia. Al igual que en los circuitos eléctricos se tienen redes hidráulicas en serie y en paralelo y la forma de resolver dichos sistemas se basa en una analogía con la ley de Ohm.

Si se tienen tres tuberías de diferentes diámetros  $D_1$ ,  $D_2$  y  $D_3$  conectadas en serie, el gasto en cada una de las tuberías será el mismo y la pérdidas por fricción en el sistema serán la suma de las pérdidas en cada tubería.

$$Q_{\text{total}} = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$H_{\text{total}} = H_1 + H_2 + H_3$$

Si ahora tenemos tres tuberías en paralelo, el gasto total corresponde a la suma de los gastos en las tres tuberías y las pérdidas por fricción serán las mismas en las tres tuberías.

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$H_{\text{total}} = H_1 = H_2 = H_3$$

## DESCRIPCION DE LA PRACTICA

La práctica se divide en dos partes, la primera tiene por objeto el determinar la eficiencia de la bomba centrífuga y la segunda es la de calcular el gasto en ramales de tubería.

Para la primera parte se acciona la bomba y se determina, por medio de un wattmetro la energía eléctrica consumida por la bomba y por medio de un balance de Bernoulli se calcula la energía consumida por el fluido. La relación de ambas determinará la eficiencia de la bomba.

En la segunda parte se determinan los gastos en los ramales de una tubería, los datos conocidos son el gasto total y el gasto en una de las tuberías.

En ambos casos se deben determinar: la longitud de las tuberías por donde circula el fluido, así como hacer una lista de los accesorios de cada tubería.

DATOS

PROPIEDADES FISICAS

$$T = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\delta = 0.998 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu = .011 \text{ poises}$$

$$\delta_{\text{Hg}} = 13.6 \text{ g/cm}^3$$

VARIABLES

T = temperatura

$\delta$  = densidad

$\mu$  = viscosidad

EFICIENCIA DE LA BOMBA

$$W = 1400 \text{ watts}$$

$$N = 3$$

$$d_1 = 5.072 \text{ cm}$$

$$l_1 = 2233 \text{ cm}$$

$$\epsilon_1 = 0.00457 \text{ cm}$$

accesorios:

- 1 entrada de borda
- 1 codo de 45°
- 6 codos de 90°
- 2 T con flujo derivado
- 1 válvula de globo abierta
- 1 válvula check
- 1 válvula de compuerta abierta
- 1 válvula de globo 1/4 abierta

$$le_1 = 11595.912 \text{ cm}$$

$$d_2 = 4.089 \text{ cm}$$

$$l_2 = 1178.5 \text{ cm}$$

$$\epsilon_2 = .00457 \text{ cm}$$

accesorios:

- 8 codos de 90°
- 5 válvulas de compuerta abiertas
- 1 medidor de orificio

W = trabajo consumido por la bomba

N = número de tuberías usadas

$d_i$  = diámetro de la tubería i

$l_i$  = longitud de tubo recto i

$\epsilon_i$  = rugosidad de la tubería i

$le_i$  = longitud equivalente de i

2 ampliaciones a 2"  
1 reducción de 2"  
8 T con flujo derivado

$$le_2 = 5504.662 \text{ cm}$$

$$d_3 = 2.66446 \text{ cm}$$

$$l_3 = 60 \text{ cm}$$

$$\epsilon_3 = .00457 \text{ cm}$$

accesorios:

1 ampliación a 2"  
1 reducción de 2"  
1 medidor de paletas

$$le_3 = 1061.814 \text{ cm}$$

$$dH = 250 \text{ mm}$$

dH = altura del  
manómetro

$$d_o = 2.45 \text{ cm}$$

d<sub>o</sub> = diámetro del  
medidor de  
orificio

$$N = 3$$

#### GASTOS EN RAMALES

$$d_1 = 4.089 \text{ cm}$$

$$l_1 = 1220 \text{ cm}$$

$$\epsilon_1 = 0.00457 \text{ cm}$$

accesorios:

3 válvulas de compuerta abiertas  
2 codos de 90°  
2 T con flujo derivado

$$le_1 = 2115.491 \text{ cm}$$

$$d_2 = 4.089 \text{ cm}$$

$$l_2 = 1100 \text{ cm}$$

$$\epsilon_2 = 0.00457 \text{ cm}$$

accesorios:

1 válvula de compuerta abierta

$$le_2 = 1153.157 \text{ cm}$$

$$d_3 = 1.4789 \text{ cm}$$

$$l_3 = 1100 \text{ cm}$$

$$\epsilon_3 = 0.00015 \text{ cm}$$

accesorios:

1 válvula de compuerta abierta

$$le_3 = 1145.2257 \text{ cm}$$

#### PRUEBA 1

$$gt = \frac{292000 \text{ cm}^3}{75 \text{ seg}} = 3893.3333$$

gt = gasto total

$$dH = 25 \text{ mm}$$

#### PRUEBA 2

$$gt = \frac{273000 \text{ cm}^3}{67 \text{ seg}} = 4074.62687$$

$$dH = 28 \text{ mm}$$

#### PRUEBA 3

$$gt = \frac{636000 \text{ cm}^3}{145 \text{ seg}} = 4386.2069$$

$$dH = 29 \text{ mm}$$

## CALCULOS

En ambas partes de la práctica el balance de Bernoulli se simplifica quedando:

$$W = H_{\text{total}}$$

y

$$H_{\text{total}} = H_1 + H_2 + \dots + H_n \quad (\text{en serie})$$

$$H_{\text{total}} = H_1 = H_2 = \dots = H_n \quad (\text{en paralelo})$$

Donde:  $W$  es la energía consumida por el fluido,  $H_i$  son las pérdidas por fricción en la tubería  $i$ .

Donde:

$$H_i = f \frac{L_i}{D_i} \frac{U_i^2}{2 \text{ gc}}$$

Donde:  $f$  es el factor de fricción de Darcy,  $L_i$  es la longitud equivalente de la tubería  $i$ ,  $D_i$  es el diámetro interno de la tubería  $i$ ,  $U_i$  es la velocidad del fluido en la tubería  $i$ .

Para determinar el factor de fricción de Darcy, se utilizará el método de Colebrook:

$$Re = \frac{D u \delta}{\mu}$$

Donde:  $Re$  es el número de Reynolds,  $D$  es el diámetro interno de la tubería,  $\delta$  es la densidad del fluido y,  $\mu$  es la viscosidad del fluido.

Para régimen laminar. (  $Re < 2100$  )

$$f = \frac{64}{Re}$$

Para régimen de transición.

$$f = \frac{4}{F^2}$$

$$F = 1.737 \ln \left( \frac{\epsilon}{D} \right) + 2.28 - 1.737 \ln \left( 4.67 \frac{F \epsilon}{D Re} + 1 \right)$$

Para régimen turbulento.

$$f = \frac{4}{F^2}$$

$$F = 4.06 \ln \left( \frac{\epsilon}{D} \right) + 2.16$$

Donde  $\epsilon$  es la rugosidad de la tubería.

Para la determinación de la eficiencia de la bomba, se obtienen las pérdidas por fricción en cada tubería, se suman y se calcula la potencia entregada al fluido por la bomba con:

$$WHP = H Q$$

y la eficiencia de la bomba será:

$$\eta = \frac{WHP}{BHP}$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia, BHP es la potencia consumida por la bomba y WHP es la potencia entregada al fluido.

Para determinar gastos en ramales, primero se calcula el gasto en la tubería en donde está colocado el orificio, utilizando el método descrito en la práctica de medidores de orificio, después se calculan las pérdidas por fricción en esa tubería utilizando el método arriba descrito. Conociendo las pérdidas en uno de los ramales tenemos que:

$$H_{\text{total}} = H_1 = H_2 = \dots = H_n$$

Así que para las otras tuberías de la red las pérdidas por fricción deben ser las mismas. El método para encontrar los gastos en las demás tuberías será:

- 1.- Suponer un gasto en la tubería.
- 2.- Calcular velocidad en la tubería.
- 3.- Calcular pérdidas por fricción en la tubería, con el método arriba descrito.
- 4.- Comparar las pérdidas obtenidas en la tubería con las calculadas en la tubería del orificio. Si son iguales, el gasto supuesto es el correcto y si no, hay que suponer otro gasto y repetir este procedimiento.

Cuando se tienen los gastos en todas las tuberías, se debe cumplir la ecuación:

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

Utilizando este procedimiento se obtienen los siguientes resultados:

Para el cálculo de la eficiencia de la bomba:

Gasto = 2826.82 cm<sup>3</sup>/seg  
Pérdidas por fricción = 2589.46 cm<sup>3</sup>/seg  
Eficiencia de la bomba = 15.93 %

Para el cálculo de gastos en ramales:

Prueba 1

Gasto total = 3893.33 cm<sup>3</sup>/seg  
Gasto en la tubería 1 = 893.92 cm<sup>3</sup>/seg  
Gasto en la tubería 2 = 1825.56 cm<sup>3</sup>/seg  
Gasto en la tubería 3 = 1554.61 cm<sup>3</sup>/seg

Prueba 2

Gasto total = 4074.63 cm<sup>3</sup>/seg  
Gasto en la tubería 1 = 946.04 cm<sup>3</sup>/seg  
Gasto en la tubería 2 = 1932.14 cm<sup>3</sup>/seg  
Gasto en la tubería 3 = 1650.96 cm<sup>3</sup>/seg

Prueba 3

Gasto total = 4386.21 cm<sup>3</sup>/seg  
Gasto en la tubería 1 = 962.78 cm<sup>3</sup>/seg  
Gasto en la tubería 2 = 1966.39 cm<sup>3</sup>/seg  
Gasto en la tubería 3 = 1682.01 cm<sup>3</sup>/seg

## PROGRAMA

Overlay Procedure BERNOULLI;

( Ecuación de Bernoulli. )

Const

```

NTuberias = 10;
Maximo    = 0.000001;
gc        = 981;

```

Type

Arreglo = Array [1..NTuberias] of Real;

Var

```

Numero : Char;
Final   : Boolean;

```

```

Function ORIFICIO (Nt : Integer;
                  D   : Arreglo;
                  Ro  : Real;
                  Var I : Integer;
                  Var F : Real) : Real;

```

Const

Co = 0.61;

Var

```

ODiametro,
HgDensidad,
Altura,
Aux       : Real;

```

Begin

```

Write (' Diametro del orificio           (cm) ');
ReadLn (ODiametro);
Write (' No. de tuberias en que se encuentra <1..',Nt;2,'> ');
ReadLn (I);
Write (' Densidad del Mercurio           (g/cm3) ');
ReadLn (HgDensidad);
Write (' Altura del manometro           (cm) ');
ReadLn (Altura);
F := Altura * (HgDensidad - Ro);
Aux := 1 - Sqr(ODiametro / D[I]);
Aux := Sqrt (2 * gc * (F / Aux) / Ro);
ORIFICIO := Sqr(ODiametro) * Pi * Co * Aux / 4;
End; (Function ORIFICIO)

```

Function DARCY(D,V,Ro,Mu,E : Real) : Real;

Var

```

Re,
ED,
A,
B   : Real;

```

Begin

Re := D \* V \* Ro / Mu;

ED := E / D;

B := Exp(- 0.87952 \* ln (Re) + 5.48653);

If Re < 4000 then

A := 64 / Re else

If ED < B then

Begin

ED := 1 / ED;

A := 1;

Repeat

B := A - 1.7372 \* ln(ED) - 2.28 + 1.7372 \* ln(4.67 \* A \* ED / Re + 1);

A := Abs(A - B);

Until B < Maximo;

A := 4 / Sqr(A);

ED := 1 / ED;

End

Else

Begin

A := 1.763\*ln(1/ED) + 2.16;

A := 4 / Sqr(A);

End;

DARCY := A;

End; (Function DARCY)

Procedure EFICIENCIA;

Var

Densidad,

Viscosidad,

Trabajo,

Gasto,

Friccion,

Aux1,

Velocidad,

Bomba,

Porcentaje : Real;

Tuberias,

I : Integer;

Diametro,

Longitud,

Rugosidad : Arreglo;

Medidor : Char;

Begin

( TOMA DATOS )

ESCOGE (2);

ClrScr;

NormVideo;

WriteLn (' PROPIEDADES FISICAS');

WriteLn;

LowVideo;

Write (' Densidad del fluido (g/cm3) ');

ReadLn (Densidad);

```

Write ('  Viscosidad del fluido      (poises) ');
ReadLn (Viscosidad);
Writeln;
Write ('  Trabajo consumido          (watts) ');
ReadLn (Trabajo);
Writeln;
ClrScr;
NormVideo;
Writeln ('          DATOS DE LA TUBERIA');
Writeln;
LowVideo;
Write ('  Número de tuberías          <1 ... 10> ');
ReadLn (Tuberías);
Writeln;
Writeln ('          Diametro      Longitud      Rugosidad');
Writeln ('          interno      equivalente      (cm)');
Writeln ('          (cm)          (cm)');
Writeln;
For I := 1 to Tuberías do
  Begin
    Write ('1:3,');
    Write (' :5);
    Read (Diametro[I]);
    Write (' :15);
    Read (Longitud[I]);
    Write (' :15);
    ReadLn (Rugosidad[I]);
  End;
ClrScr;
NormVideo;
Writeln ('          DETERMINACION DE GASTOS');
Writeln;
LowVideo;
Write ('  P)aletas u O)rificio      ');
ReadLn (Medidor);
Writeln;
Medidor := UpCase(Medidor);
Case Medidor of
  'P' : Begin
    Write (' Gasto      (cm3/seg) ');
    ReadLn (Gasto);
    Friccion := 0;
    End; ('P')
  'O' : Gasto := DRIFICIO (Tuberías,Diametro,Densidad,I,Friccion);
End; (Case Medidor)

          ( PROCESA DATOS )

ClrScr;
NormVideo;
Writeln ('RESULTADOS':40); Writeln;
Writeln;
For I := 1 to Tuberías do
  Begin
    Velocidad := 4 * Gasto / (Pi * Sqr(Diametro[I]));
    Aux1 := Longitud[I] * Sqr(Velocidad) / (Diametro[I] * 2 * gc);
    Aux1 := Aux1 * DARCY (Diametro[I],Velocidad,Densidad,Viscosidad,Rugosidad[I]);
  End;

```

```

    Friccion := Friccion + Aux1;
End; (For I:=1)
Bomba := Friccion * Gasto * Densidad * 9.81e-5;
Porcentaje := Bomba * 100 / Trabajo;
Writeln (' Gasto', Gasto:12:2, ' cm3/seg');
Writeln (' Pérdidas por fricción', Friccion:12:2, ' cm');
Writeln (' Eficiencia de la bomba', Porcentaje:12:2, ' %');
Writeln;
Writeln;
NormVideo;
Writeln ('<< fin de la Practica >>':45);
ReadLn (Medidor);
End; (Procedure EFICIENCIA)

```

#### Procedure GASTOS;

Var

```

    Densidad,
    Viscosidad,
    Gastotal,
    Friccion,
    Aux1,
    Velocidad,
    F,
    X      : Real;
    Tuberias,
    I,
    J      : Integer;
    Diametro,
    Longitud,
    Rugosidad,
    Gasto  : Arreglo;
    Ch     : Char;

```

Begin

( TOMA DATOS )

```

ESCOGE (2);
ClrScr;
NormVideo;
Writeln (' PROPIEDADES FISICAS');
Writeln;
LowVideo;
Write (' Densidad del fluido (g/cm3) ');
ReadLn (Densidad);
Write (' Viscosidad del fluido (poises) ');
ReadLn (Viscosidad);
ClrScr;
NormVideo;
Writeln (' DATOS DE LAS TUBERIAS PARALELAS');
Writeln;
LowVideo;
Write (' Número de tuberías <1 ... 10> ');
ReadLn (Tuberias);
Writeln;
Writeln (' Diametro Longitud Rugosidad');
Writeln (' interno equivalente (cm)');

```

```

WriteLn ('          (cm)          (cm)');
WriteLn;
For I := 1 to Tuberias do
  Begin
    Write (I:3,' ');
    Write (' ':5);
    Read (Diametro[I]);
    Write (' ':15);
    Read (Longitud[I]);
    Write (' ':15);
    ReadLn (Rugosidad[I]);
  End;
ClrScr;
NormVideo;
WriteLn ('          DETERMINACION DE GASTOS');
WriteLn;
LowVideo;
Write (' Gasto Total (cm3/seg) ');
ReadLn (Gastotal);
Aux1 := DRIFICIO (Tuberias,Diametro,Densidad,J,Friccion);
      ( PROCESA DATOS )

ClrScr;
NormVideo;
WriteLn ('RESULTADOS':40); WriteLn;
WriteLn;
WriteLn(' Gasto total          = ',Gastotal:12:2,' cm3/seg');
WriteLn;
Gasto[J] := Aux1;
Velocidad := 4 * Gasto[J] / (Pi * Sqr(Diametro[J]));
Aux1 := Longitud[J] * Sqr(Velocidad) / (Diametro[J] * 2 * gc);
F := DARCY (Diametro[J],Velocidad,Densidad,Viscosidad,Rugosidad[J]);
Friccion := Friccion + F * Aux1;
For I := 1 to Tuberias do
  Begin
    If I <> J then
      Begin
        Repeat
          Velocidad := Sqrt (Friccion * 2 * gc * Diametro[I] / (F * Longitud[I]));
          Aux1 := Longitud[I] * Sqr(Velocidad) / (Diametro[I] * 2 * gc);
          F := DARCY (Diametro[I],Velocidad,Densidad,Viscosidad,Rugosidad[I]);
          X := Abs (Friccion - F * Aux1);
        Until X < Maximo;
        Gasto[I] := Velocidad * Sqr (Diametro[I]) * Pi / 4;
      End; (If I)
    WriteLn(' Gasto en la tubería ',I:2,' = ',Gasto[I]:12:2,' cm3/seg');
  End; (For I);
WriteLn;
WriteLn;
NormVideo;
WriteLn ('<< Fin de la Práctica >>':45);
ReadLn (Ch);
End; (Procedure GASTOS)

      (          INICIA PROCEDURE BERNOULLI          )
Begin

```

```

Final := False;
ESCOGE (1);
LowVideo;
GoToXY ( 1, 5);
Delline;
GoToXY (27, 5);
Write ('ECUACION DE BERNQULLI');
ESCOGE (2);
Repeat
  ClrScr;
  NormVideo;
  GoToXY (25, 2);
  Write (' ESCOJA LA OPCION DESEADA:');
  LowVideo;
  GoToXY (20, 6);
  Write (' 0-> REGRESA AL MENU PRINCIPAL');
  GoToXY (20, 7);
  Write (' 1-> INTRODUCCION');
  GoToXY (20, 8);
  Write (' 2-> EFICIENCIA DE LA BOMBA');
  GoToXY (20, 9);
  Write (' 3-> GASTOS EN REDES');
  NormVideo;
  Read (Kbd,Numero);
  Case Numero of
    '0' : Final := True;
    '1' : AYUDA (3);
    '2' : EFICIENCIA;
    '3' : GASTOS;
  End; (Case Numero of)
Until Final;
End;

```

## BOMBAS

-----

### OBJETIVO

El alumno operará una bomba centrífuga, comprenderá su funcionamiento y determinará las curvas características de la misma.

### INTRODUCCION

Las bombas son equipos que se utilizan para mover líquidos a través de tuberías, canales y otros equipos. Lo que hacen las bombas es incrementar la energía mecánica del líquido, la cuál se puede traducir en velocidad, presión o altura.

La energía proporcionada por las bombas al líquido se denomina cabeza, carga o columna y se expresa en metros de líquido.

Dependiendo de la manera en que las bombas proporcionen la energía al líquido se clasifican en bombas de desplazamiento positivo y bombas rotodinámicas.

Las bombas de desplazamiento positivo puede clasificarse como:

- bombas rotatorias y
- bombas reciprocantes.

Las bombas rotatorias funcionan forzando el líquido a través de la acción de engranes o lóbulos que se encuentran dentro de una carcasa. La ventaja de este tipo de bombas es que

proporcionan un flujo constante el cual se puede variar al modificar la velocidad de rotación de los engranajes.

En la práctica se utilizan para transportar fluidos de alta viscosidad. Su principal desventaja es que no pueden operar con una descarga cerrada porque estallarían la carcasa, por esta razón están provistas de válvulas de alivio para su operación.

Las bombas reciprocantes funcionan reduciendo el volumen en donde contiene el líquido; generalmente constan de una cámara en donde se admite el líquido, un pistón o émbolo que empuja el líquido proporcionándole energía; su operación es en dos tiempos, lo que da por resultado un caudal pulsante y requiere de válvulas tanto de admisión como de descarga.

Este tipo de bombas son útiles cuando se requieren de altas presiones, teniendo la limitante de manejar caudales pequeños.

Las bombas rotodinámicas también llamadas bombas centrífugas las cuales, imparten la energía al líquido, como su nombre lo indica por medio de fuerza centrífuga.

El tipo más común de bomba centrífuga es la de caracol, la cual contiene una carcasa en forma de caracol dentro del cual se encuentra el impulsor. La succión (entrada del líquido a la bomba) se encuentra localizada en el eje del impulsor que, al girar a alta velocidad, desplaza el líquido radialmente a través de una espiral que va aumentando de volumen. Impulsado por las

aspas del impulsor la carga de velocidad que se imparte al líquido se traduce en carga de presión al reducir su velocidad en la descarga (salida del líquido de la bomba).

La energía proporcionada al líquido, la energía consumida por la bomba (generalmente energía eléctrica), la velocidad del impulsor, la eficiencia de la bomba, etc. dependen del diseño del impulsor la velocidad a la que trabajan y las características del líquido.

En el proceso de selección de una bomba se deben de considerar todos estos factores. Afortunadamente los proveedores de bombas proporcionan gráficas o curvas que describen el comportamiento de las bombas. Las curvas incluidas en la gráfica de una bomba o una familia de bombas son cabeza, eficiencia, potencia al freno y CPNS.

La cabeza es la energía entregada al líquido por la bomba; la eficiencia de una bomba es la relación entre la energía entregada al líquido y la energía consumida por la bomba; la potencia al freno es la potencia consumida por la bomba (equivale a la que se requeriría para detener la bomba); el CPNS es la Columna Positiva Neta de Succión y es la cantidad de presión absoluta en la succión que excede a la presión de vapor del líquido.

Es muy importante tomar en cuenta el CPNS ya que si la presión de succión se reduce y llega a ser menor que la presión de vapor, puede presentarse ebullición en el impulsor. Este

fenomeno se conoce como cavitación y, misma que reduce la eficiencia de la bomba y provoca corrosión.

Cuando se tienen bombas con relaciones de dimensiones iguales se dice que se tienen bombas homólogas. Las relaciones de dimensiones son concidas como Ley de Afinidad. Estas relaciones son:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^3 = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^3$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^5 = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^5$$

$$\frac{CPNS_1}{CPNS_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

en donde

$Q_i$  es el gasto o caudal manejado por la bomba  $i$ ,  
 $N_i$  es la velocidad de rotación del impulsor  $i$ ,  
 $D_i$  es el diámetro del impulsor  $i$ ,  
 $H_i$  es la cabeza o columna de la bomba  $i$   
 y  $P_i$  es la potencia hidráulica de la bomba  $i$ .

Utilizando estas ecuaciones es posible variar el diseño de las bombas para que operen en condiciones distintas a las que fueron diseñadas inicialmente.

Otro concepto interesante es el de arreglos de bombas, estos arreglos pueden ser en serie o en paralelo y dependiendo de el resultado desado es el tipo de arreglo que se deberá utilizar:

Cuando se utilizan bombas en serie la presión de descarga es igual a la suma de las presiones de descarga de cada bomba y el caudal total manejado es igual en cada bomba.

En cambio en un arreglo en paralelo el caudal total manejado es la suma del caudal manejado por cada bomba y la presión de descarga será el mismo en cada bomba.

## DESCRIPCION DE LA PRACTICA

El equipo que se utilizará es una bomba centrífuga marca Gilkes con las siguientes especificaciones:

2900 revoluciones por minuto;

Potencia 1.48 HP;

Capacidad  $0.136 \text{ m}^3/\text{min}$  y;

Cabeza de 20.4 m.

En el tubo de descarga se cuenta con un manómetro y una válvula para regular el gasto. La descarga dá a un tanque que contiene un vertedero triangular el cuál permite medir el gasto. La potencia de la bomba es regulada por un reostato que además contiene un amperímetro y un voltmetro.

Además de este equipo se necesita un estroboscopio para determinar la velocidad de la bomba.

El procedimiento de la práctica es el siguiente: primero se hace una tabla con los datos obtenidos, después se hacen los cálculos necesarios para obtener las gráficas características de la bomba.

## DATOS

Se ajusta la bomba con los controles de voltaje y amperaje, se determina su velocidad con el estroboscopio (rpm) y se ajusta la presión de descarga mediante la válvula. Se repite este procedimiento variando la apertura de la válvula. Se hace otro juego de mediciones variando el voltaje y el amperaje inicial. Los datos obtenidos son los siguientes:

PRUEBA	I (amp)	VOLTAJE (volts)	N (rpm)	Q (m <sup>3</sup> /min)	PRESION (kN/m <sup>2</sup> )
=====					
Experimento A					
1	1.5	280	667	0.00	150
2	3.0	260	667	0.08	125
3	3.2	260	667	0.11	100
4	3.8	250	667	0.15	75
5	3.9	250	667	0.19	50
6	3.9	250	667	0.20	25
7	4.0	250	667	0.22	0
-----					
Experimento B					
1	1.1	220	400	0.00	100
2	2.0	205	400	0.07	75
3	2.2	200	400	0.13	50
4	2.7	200	400	0.16	25
5	2.8	200	400	0.18	0
-----					
Experimento C					
1	2.0	300	2020	0.00	200
2	3.9	300	2200	0.10	150
3	4.2	300	2300	0.16	100
4	5.0	280	2460	0.20	50
5	5.0	270	2460	0.22	0
-----					

PRUEBA	I (amp)	VOLTAJE (volts)	N (rpm)	Q (m <sup>3</sup> /min)	PRESION (kN/m <sup>2</sup> )
--------	------------	--------------------	------------	----------------------------	---------------------------------

Experimento D

1	3.0	320	2360	0.00	260
2	5.0	320	2360	0.09	240
3	5.3	320	1920	0.11	200
4	5.9	320	1720	0.14	175
5	6.1	320	1700	0.17	150
6	6.3	320	1700	0.20	125
7	6.3	320	1690	0.22	100
8	6.4	317	1780	0.24	75
9	6.5	317	1770	0.25	50
10	6.5	315	1590	0.26	25
11	6.8	315	1600	0.26	0

Experimento E

1	1.9	280	1680	0.00	175
2	2.9	270	2440	0.06	150
3	3.2	270	2882	0.11	125
4	3.7	260	3170	0.15	100
5	4.0	255	3640	0.17	75
6	4.2	250	4000	0.19	50
7	4.3	248	4500	0.21	25
8	4.4	245	5400	0.22	0

## CALCULOS

Para el cálculo de la cabeza (H) se utiliza la siguiente fórmula:

$$H = \frac{P}{\delta} \quad [=] \quad m$$

donde P es la presión de descarga en  $\text{kg/m}^2$  ( $9.81 \times 10^{-3} \text{ kN/m}^2$ ) y  $\delta$  es la densidad del líquido en  $\text{kg/m}^3$ .

Para el cálculo de la potencia al freno (BHP) se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{BHP} = V I f_p \sqrt{3} \quad [=] \quad \text{watts}$$

donde V es la diferencia de potencial en volts, I es la intensidad de la corriente eléctrica en amperes y  $f_p$  es el factor de potencia de la bomba (supondremos en los cálculos  $f_p = 0.95$ ).

Para el cálculo de la potencia hidráulica (WHP) utilizaremos la siguiente fórmula:

$$\text{WHP} = Q \delta H gc \quad [=] \quad \text{watts}$$

donde Q es el gasto en  $\text{m}^3/\text{seg}$  ( $0.01667 \text{ m}^3/\text{min}$ ),  $\delta$  es la densidad del líquido en  $\text{kg/m}^3$ , H es la cabeza en m y gc es una constante ( $9.81 \text{ kg m /seg kg}$ ).

La eficiencia de la bomba ( $\eta$ ) se calcula como la relación entre la potencia hidráulica y la potencia al freno:

$$\eta = \frac{\text{WHP}}{\text{BHP}} \times 100$$

donde WHP y BHP están en watts.

Aplicando las fórmulas anteriores se obtiene la siguiente tabla de resultados:

PRUEBA	H	BHP	WHP	$\eta$	$H/N^2$ $\times 10^6$	$Q/N$ $\times 10^6$
	(m)	(watts)	(watts)	(%)	(m/rpm <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> /rev)

Experimento A

1	15.30	691	0.0	0.0	34.39	0.0
2	12.75	1283	166.7	13.0	28.66	119.9
3	10.20	1369	183.3	13.4	22.92	164.9
4	7.65	1563	187.5	12.0	17.19	224.9
5	5.10	1604	158.3	9.9	11.46	284.9
6	2.55	1604	83.3	5.2	5.73	299.9
7	0.00	1645	0.0	0.0	0.00	329.8

Experimento B

1	10.20	398	0.0	0.0	63.74	0.0
2	7.65	675	87.5	13.0	47.81	175.0
3	5.10	724	108.3	15.0	31.87	325.0
4	2.55	889	66.7	7.5	15.94	400.0
5	0.00	922	0.0	0.0	0.00	450.0

Experimento C

1	20.40	987	0.0	0.0	5.00	0.0
2	15.30	1925	250.0	13.0	3.16	45.5
3	10.20	2073	266.7	12.9	1.93	69.6
4	5.10	2304	166.7	7.2	0.84	81.3
5	0.00	2221	0.0	0.0	0.00	89.4

PRUEBA	H	BHP	WHP	$\eta$	$H/N^2$ $\times 10^6$	$Q/N$ $\times 10^6$
	(m)	(watts)	(watts)	(%)	(m/rpm <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> /rev)

=====

Experimento D

1	26.52	1580	0.0	0.0	4.76	0.0
2	24.48	2633	360.0	13.7	4.40	38.1
3	20.40	2791	366.7	13.1	5.53	57.3
4	17.85	3107	408.3	13.1	6.03	81.4
5	15.30	3212	425.0	13.2	5.29	100.0
6	12.75	3317	416.7	12.6	4.41	117.6
7	10.20	3317	366.7	11.1	3.57	130.2
8	7.65	3338	300.0	9.0	2.41	134.8
9	5.10	3390	208.3	6.1	1.63	141.2
10	2.55	3369	108.3	3.2	1.01	163.5
11	0.00	3525	0.0	0.0	0.00	162.0

-----

Experimento E

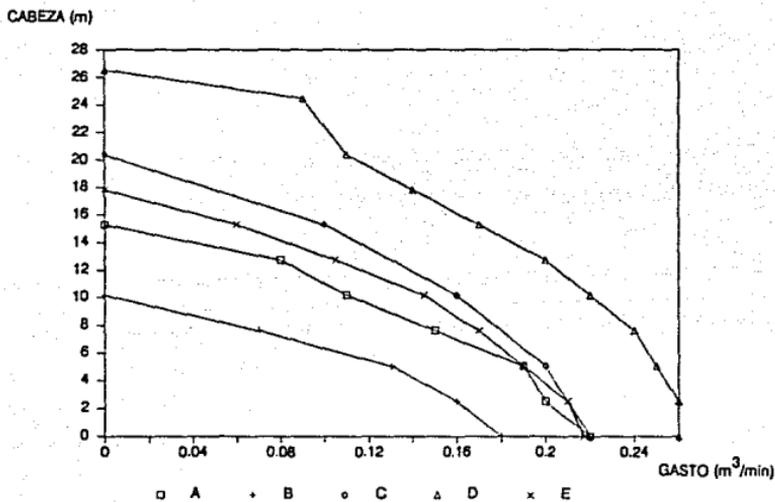
1	17.85	875	0.0	0.0	6.32	0.0
2	15.30	1288	150.0	11.6	2.57	24.6
3	12.75	1422	218.8	15.4	1.54	36.4
4	10.20	1583	241.7	15.3	1.02	45.7
5	7.65	1678	212.5	12.7	0.58	46.7
6	5.10	1728	158.3	9.2	0.32	47.5
7	2.55	1755	87.5	5.0	0.13	46.7
8	0.00	1774	0.0	0.0	0.00	40.2

-----

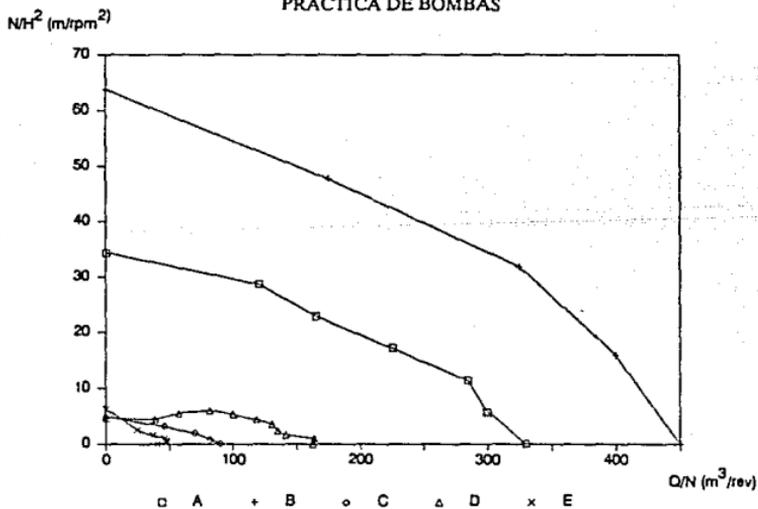
Con estas tablas se pueden hacer las siguientes gráficas:

- Gasto contra Cabeza (Q vs H y  $Q/N$  vs  $H/N^2$ )
- Gasto contra Potencia al Freno (Q vs BHP)
- Gasto contra Eficiencia (Q vs  $\mu$ )
- Potencia al freno contra Eficiencia (BHP vs  $\mu$ )
- Potencia hidráulica contra Eficiencia (WHP vs  $\mu$ )

LABORATORIO DE MOMENTUM  
PRACTICA DE BOMBAS



LABORATORIO DE MOMENTUM  
PRACTICA DE BOMBAS

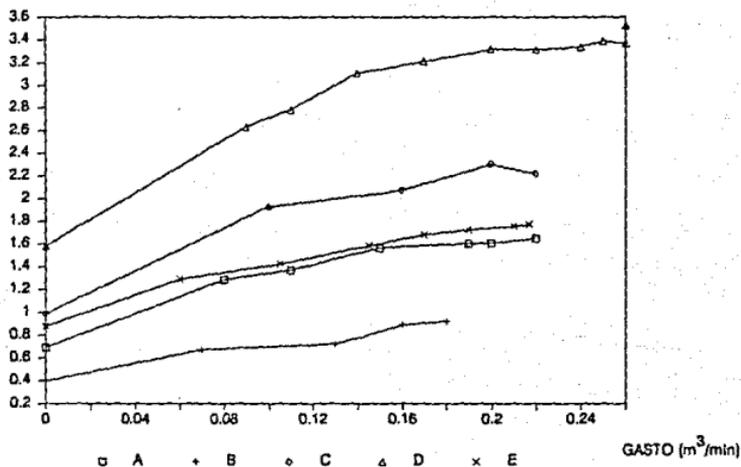


ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

### LABORATORIO DE MOMENTUM

#### PRACTICA DE BOMBAS

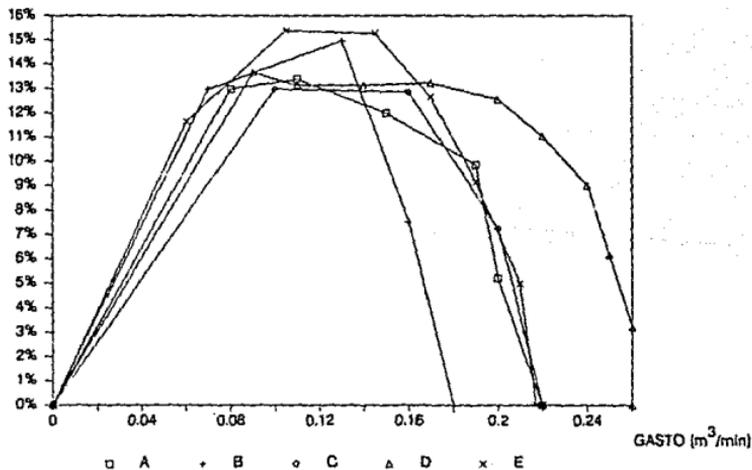
POTENCIA AL FRENO (watts)



### LABORATORIO DE MOMENTUM

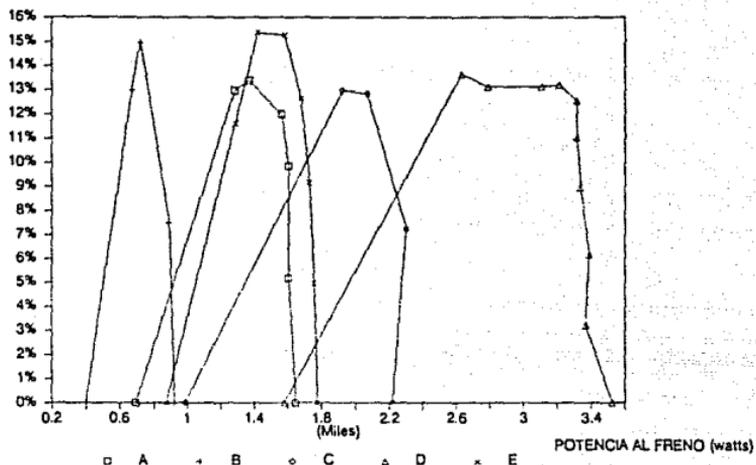
#### PRACTICA DE BOMBAS

EFICIENCIA



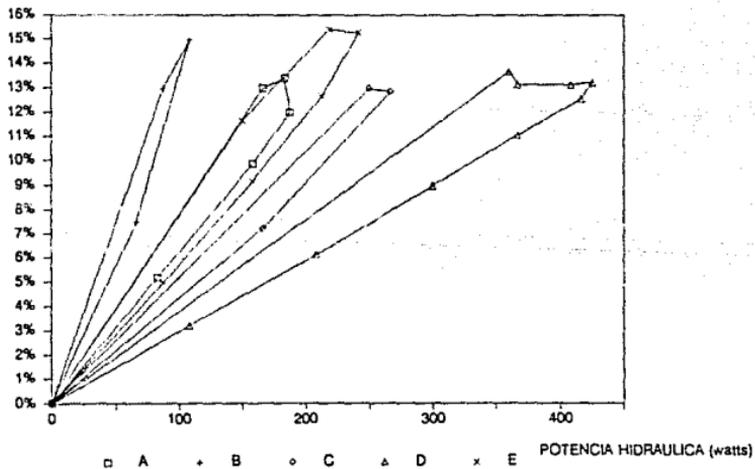
LABORATORIO DE MOMENTUM  
PRACTICA DE BOMBAS

EFICIENCIA



LABORATORIO DE MOMENTUM  
PRACTICA DE BOMBAS

EFICIENCIA





```

ReadLn (Pruebas);
NormVideo;
WriteLn;
WriteLn (' INTENSIDAD VOLTAJE VELOCIDAD GASTO PRESION');
WriteLn (' amperes volts rpm m3/min kN/m2');
WriteLn (' -----');
WriteLn;
LowVideo;
For J := 1 to Pruebas do
  Begin
    Write (J:6, ' ');
    Write (' ':4);
    Read (Int[1, J]);
    Write (' ':9);
    Read (Volt[1, J]);
    Write (' ':8);
    Read (N[1, J]);
    Write (' ':9);
    Read (Gasto[1, J]);
    Write (' ':6);
    ReadLn (Presion[1, J]);
  End; {For J := 1}
End; {for I := 1};
      ( PROCESA DATOS )
For I := 1 to Experimentos do
  Begin
    ClrScr;
    NormVideo;
    WriteLn ('RESULTADOS':40);
    WriteLn;
    WriteLn (' CABEZA POTENCIA POTENCIA EFICIENCIA H/N² Q/N²');
    WriteLn (' AL FRENO HIDRAULICA');
    LowVideo;
    WriteLn (' m watts watts % m/rpm² m³/rev³');
    WriteLn (' -----');
    NormVideo;
    WriteLn ('Experimento':40, I:2);
    LowVideo;
    WriteLn;
    For J := 1 to Pruebas do
      Begin
        Write (J:2, ' ');
        Cabeza[1, J] := Presion[1, J] / (Densidad * 9.81E-3);
        Write (Cabeza[1, J]:6:2);
        BHP[1, J] := Volt[1, J] * Int[1, J] * 0.95 * Sqrt(3);
        Write (BHP[1, J]:12:0);
        WHP[1, J] := Gasto[1, J] * Densidad * Cabeza[1, J] * 9.81 * 0.01667;
        Write (WHP[1, J]:12:1);
        Eficiencia[1, J] := 100 * WHP[1, J] / BHP[1, J];
        Write (Eficiencia[1, J]:11:1, '%');
        Write ((Cabeza[1, J]/Sqr(N[1, J])):13:7);
        WriteLn ((Gasto[1, J]/N[1, J]):11:7);
      End; {for J := 1}
    WriteLn;
    WriteLn;
  End;

```

```

NormVideo;
WriteLn ('<< fin del experimento >>':45);
Read(Kbd,Respuesta);
End; (For l := 1)
End; (Procedure PRACTICA)

```

```

( INICIA PROCEDURE BOMBAS )

```

```

Begin
Final := False;
ESCOGE (1);
LowVideo;
GoToXY ( 1, 5); DelLine;
GoToXY (35, 5); Write ('BOMBAS');
ESCOGE (2);
repeat
ClrScr;
NormVideo;
GoToXY (25, 2);
Write (' ESCOJA LA OPCION DESEADA:');
LowVideo;
GoToXY (20, 6);
Write (' 0-> REGRESA AL MENU PRINCIPAL');
GoToXY (20, 7);
Write (' 1-> INTRODUCCION');
GoToXY (20, 8);
Write (' 2-> PRACTICA');
NormVideo;
Read (Kbd,Numero);
Case Numero of
'0' : Final := True;
'1' : AYUDA (4);
'2' : PRACTICA;
end; (Case Numero of)
Until Final;
End;

```

## PERFIL DE VELOCIDADES (TUBO DE PITOT)

### OBJETIVO

El alumno determinará el perfil de velocidades en una tubería cilíndrica, mediante la medición de velocidades puntuales en dirección radial utilizando un tubo de pitot.

Comparar las velocidades obtenidas experimentalmente con las determinadas con las ecuaciones de Von Karman.

### INTRODUCCION

Cuando una corriente de fluido se mueve a través de una tubería, el fluido se adhiere a las paredes de la tubería formando una interface sólido-fluido. Esta adherencia es el resultado de los campos de fuerza en la frontera sólido-fluido y son la causa de la tensión interfacial.

Debido a que las paredes de la tubería se encuentran en reposo (velocidad = 0) con respecto al fluido; la velocidad del fluido en la interface es 0. Fuera de esta interface, el fluido se encuentra en movimiento, existiendo variaciones de velocidad en diferentes puntos del fluido. La velocidad en un punto cualquiera es función de las coordenadas espaciales de ese punto y existe, por lo tanto, un perfil de velocidades del fluido en la tubería.

Este perfil depende del régimen de flujo del fluido (es función del número de Reynolds).

Cuando el fluido se está moviendo en régimen laminar, el perfil es parabólico y se rige por la siguiente fórmula:

$$v = 2 \bar{v} \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right)$$

en donde  $v$  es la velocidad en un punto dado,

$\bar{v}$  es la velocidad promedio,

$r$  es la posición radial, y

$R$  es el radio de la tubería.

Para la distribución de velocidades en el flujo turbulento, Nikuradse midió la velocidad en un punto del flujo y encontró que el perfil de velocidades pierde su carácter parabólico y tiende a aproximarse a flujo tipo tapón, en donde la velocidad es independiente de la posición radial.

Von Karman propuso que la distribución de velocidad de los datos de Nikuradse fueran representados por tres ecuaciones para todos los fluidos newtonianos que fluyen a través de tuberías lisas (de poca rugosidad).

Von Karman introduce el parámetro  $Y^+$  que es una posición generalizada en un sistema de fluido en movimiento en una posición particular  $r$ . Y el parámetro  $U^+$  que es una velocidad generalizada en un sistema de fluido en movimiento incluyendo la velocidad puntual en la posición  $Y^+$ .

La primera región de un sistema de flujo turbulento está limitada por  $Y^+ = 0$  que está en la pared del tubo y  $Y^+ = 5$  a poca distancia de la pared. A esta región se le llama capa laminar y

la velocidad puntual está determinada por:

$$U^+ = Y^+$$

$$Y^+ = (R - r) \delta \frac{U}{\mu}$$

$$U^+ = \frac{V}{U}$$

$$U = \left( r \frac{g_c}{\delta} \right)^{0.5}$$

$$r = \frac{dP D}{4 L}$$

en donde  $U^+$  es el parámetro de velocidad puntual,

$U$  es la velocidad friccionante,

$V$  es la velocidad puntual,

$r$  es el esfuerzo cortante en la pared,

$Y^+$  es el parámetro de posición,

$R$  es el radio de la tubería, y

$r$  es la posición radial.

La región ubicada entre  $Y^+ = 5$  y  $Y^+ = 30$  recibe el nombre de capa de transición y está representada por la ecuación:

$$U^+ = -3.05 + 5 \ln Y^+$$

La región comprendida entre  $Y^+ = 30$  y el centro de la tubería recibe el nombre de capa turbulenta y está representada por la siguiente ecuación:

$$U^+ = 5.5 + 2.5 \ln Y^+$$

## DESCRIPCION DE LA PRACTICA

El equipo utilizado consta de las siguientes partes: Un generador de viento consistente en un ventilador centrífugo del tipo jaula de ardilla accionado por un motor; una válvula de paso; tubería de lámina de 200 mm de diámetro, que cuenta con tomas de presión en diferentes puntos, una abertura final para la instalación del tubo de pitot y terminación bridada para la instalación de una placa de orificio.

Además se requiere de un tubo de pitot de tubos concéntricos, un manómetro diferencial inclinado y una placa de orificio.

- 1.- Se instala el tubo de pitot en el equipo y se conecta el manómetro diferencial al tubo de pitot. Encender el equipo teniendo en cuenta que la válvula de paso este completamente abierta. Hacer varias mediciones con el tubo de pitot variando la posición del mismo, anotar posición y lectura del manómetro.
- 2.- Se instala la placa de orificio al final de la tubería, se conecta el manómetro diferencial (una toma justo antes de la placa y la otra se deja abierta). Encender el equipo utilizando las mismas condiciones (válvula completamente abierta) que en el procedimiento anterior. Tomar el dato de diferencia de presión leída en el manómetro.

3.- Desmontar la placa de orificio y conectar el manómetro diferencial en dos puntos de la tubería, encender el equipo y anotar la medición del manómetro diferencial.

Es importante hacer notar que para poder hacer las mediciones del manómetro diferencial es necesario esperar un tiempo hasta que se estabilice el liquido en el manómetro (aproximadamente 20 segundos).

Con los datos anteriores se determinan las velocidades en los diferentes puntos mediante el tubo de pitot y mediante las ecuaciones de Von Karman, y se comparan estos dos resultados.

DATOS

$T = 20^{\circ}\text{C}$

$T =$  temperatura ambiente

$\delta = 0.929 \text{ kg/m}^3$

$\delta =$  densidad del fluido

$\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ kg/m seg}$

$\mu =$  viscosidad del fluido

Se consideraran constantes las propiedades físicas del fluido ya que, aunque es un fluido compresible, no hay cambios importantes de presión en el sistema.

$D = 0.20 \text{ m}$

$D =$  diámetro de la tubería

$dP = 2.6 \text{ mmH}_2\text{O}$

$dP =$  diferencia de presión en la tubería

$L = 3.30 \text{ m}$

$L =$  longitud de la tubería

$D_o = 0.08 \text{ m}$

$D_o =$  diámetro del orificio

$dP = 11.5 \text{ mmH}_2\text{O}$

$dP =$  diferencia de presión en el orificio

H (m)	dP (mmH <sub>2</sub> O)
0.00	2.7
0.01	4.5
0.02	5.2
0.03	5.5
0.04	5.9
0.05	6.1
0.06	6.2
0.06	6.4
0.08	6.5
0.09	6.6
0.10	6.8
0.11	7.0
0.12	7.1
0.13	7.1
0.14	7.2
0.15	7.0
0.16	6.7
0.17	6.0

$H =$  altura del pitot

$dP_p =$  diferencia de presión en el pitot

## CALCULOS

Utilizando los datos del orificio se puede calcular el gasto utilizando las fórmulas del orificio:

$$\beta = \frac{D_o}{D}$$

$$dP_o = \frac{dP}{1 - \beta^2}$$

$$U_o = C_o \left( 2 g_c \frac{dP_o}{\delta} \right)^{0.5}$$

Utilizando estas ecuaciones con  $C_o = 0.61$  se calcula  $U_o$ , para calcular el gasto con la siguiente fórmula:

$$A_o = \pi \frac{D_o^2}{4}$$

$$G = U_o A_o$$

Para el calculo del perfil de velocidades con el tubo de pitot se utilizará la siguiente fórmula:

$$U_p = C_p \left( 2 g_c \frac{dP}{\delta} \right)^{0.5}$$

se supone  $C_p = 1$  para el pitot.

Esta velocidad se compara con la obtenida con las fórmulas de Von Karman con el siguiente método:

Se calcula el esfuerzo cortante en la tubería con:

$$\tau = \frac{dP D}{4 L}$$

Se calcula la velocidad friccionante con:

$$U^* = \left( r \frac{gc}{\delta} \right)^{0.5}$$

Se calcula el parámetro posicional con:

$$R = 0.5 D$$

$$r = H - R$$

$$Y^+ = \frac{(R - r) U \delta}{\mu}$$

Dependiendo de la capa en que se encuentre se aplica:

para  $Y^+ < 5.0$

$$U^+ = Y^+$$

para  $5.0 > Y^+ > 30.0$

$$U^+ = -3.05 + \ln Y^+$$

para  $Y^+ > 30.0$

$$U^+ = 5.5 + \ln Y^+$$

La velocidad puntual segun Von Karman es:

$$U = U^* U^+$$

Se compara  $U_p$  contra  $U$  y se estima el error relativo entre las dos velocidades.

Aplicando el método antes descrito, se obtienen los siguientes resultados:

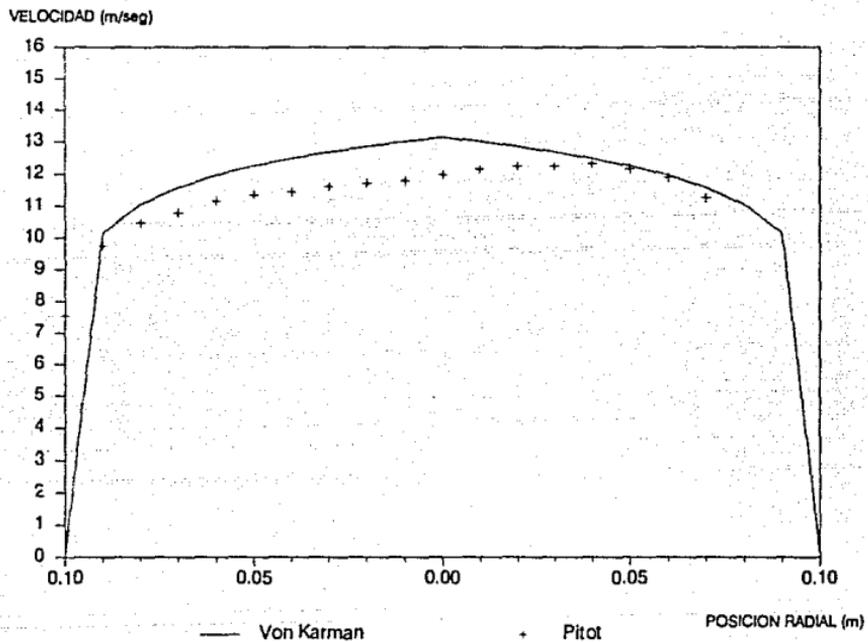
Gasto  $G = 0.0521 \text{ m}^3/\text{seg}$

Esfuerzo en la pared  $r = 0.0258 \text{ Kg}/\text{m}^2$

Velocidad Friccionante  $U^* = 0.5219 \text{ m}/\text{seg}$

H (m)	r (m)	$U$ (m/Seg)	$U$ (m/seg)	Error
0.00	0.100	7.549	--	--
0.01	0.090	9.746	10.157	4.2 %
0.02	0.080	10.477	11.061	5.5 %
0.03	0.070	10.775	11.590	7.5 %
0.04	0.060	11.160	11.966	7.2 %
0.05	0.050	11.347	12.257	8.0 %
0.06	0.040	11.440	12.495	9.2 %
0.07	0.030	11.623	12.696	9.2 %
0.08	0.020	11.714	12.870	9.9 %
0.09	0.010	11.803	13.024	10.0 %
0.10	0.000	11.981	13.161	9.8 %
0.11	0.010	12.156	13.024	7.1 %
0.12	0.020	12.242	12.870	5.1 %
0.13	0.030	12.242	12.696	3.7 %
0.14	0.040	12.328	12.495	1.3 %
0.15	0.050	12.156	12.257	0.8 %
0.16	0.060	11.892	11.966	0.6 %
0.17	0.070	11.254	11.590	3.0 %

LABORATORIO DE MOMENTUM  
PRACTICA DE PERFIL DE VELOCIDADES



# PROGRAMA

Overlay Procedure PERFIL;

( Perfil de Velocidades. )

Var

Numero : Char;  
Final : Boolean;

Procedure PRACTICA;

Const

Co = 0.61;  
gc = 9.81;

Var

Densidad,  
Viscosidad,  
Diametro,  
Orificio,  
Presion,  
Longitud,  
Cortante,  
Aux1,  
Aux2,  
Gasto,  
Radial,  
Error : Real;  
Pruebas,  
I : Integer;  
Altura,  
Pitot,  
Calculada,  
Karman : Array [1..NPruebas] of Real;  
Respuesta : Char;

Begin

( TOMA DATOS )

ESCOGE (2);  
ClrScr;  
NormVideo;  
Writeln (' PROPIEDADES FISICAS');  
Writeln;  
LowVideo;  
Write (' Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>) ');  
Readln (Densidad);  
Write (' Viscosidad del fluido (kg/m seg) ');  
Readln (Viscosidad);  
Writeln;  
Write (' Diametro de la tuberfa (m) ');  
Readln (Diametro);  
Write (' Diametro del orificio (m) ');  
Readln (Orificio);

```

Write (' Caída de presión en el orificio (mmH2O) ');
ReadLn (Presion);
Write (' Longitud de la tuberfa (m) ');
ReadLn (Longitud);
Write (' Caída de presión en la tuberfa (mmH2O) ');
ReadLn (Cortante);
Write (' Número de mediciones pitot <1 ... 30> ');
ReadLn (Pruebas);
ClrScr;
NormVideo;
WriteLn;
WriteLn (' Altura del Pitot Presion del Pitot');
WriteLn (' (m) (mm H2O)');
WriteLn (' -----');
WriteLn;
LowVideo;
For I := 1 to Pruebas do
Begin
Write (I:7,' ');
Write (' ':7);
Read (Altura[I]);
Write (' ':22);
ReadLn (Pitot[I]);
End; (For I :=1);

( PROCESA DATOS )

ClrScr;
NormVideo;
WriteLn ('RESULTADOS:40);
LowVideo;
WriteLn;
Presion := Presion / ( 1 - Sqr(Orificio / Diametro));
Aux1 := Co * Sqrt(2 * gc * Presion * 0.9995 / Densidad);
Gasto := Aux1 * Pi * Sqr(Orificio) / 4;
WriteLn (' Gasto ..... =',Gasto:7:4,' m3/seg');
Aux1 := Cortante * 0.9995 * Diametro / (4 * Longitud);
WriteLn (' Esfuerzo en la pared ..... =',Aux1:7:4,' Kg/m2');
Aux1 := Sqrt(Aux1 * gc / Densidad);
WriteLn (' Velocidad Friccionante ... =',Aux1:7:4,' m/seg');
WriteLn;
NormVideo;
WriteLn (' Prueba Posicion Velocidad Velocidad Error');
WriteLn (' radial pitot Von Karman');
WriteLn (' -----');
LowVideo;
WriteLn;
For I := 1 to Pruebas do
Begin
Radial := Abs((Diametro / 2) - Altura[I]);
Calculada[I] := Sqrt(2 * gc * Pitot[I] * 0.9995 / Densidad);
Write (I:7, Radial:13:3, Calculada[I]:15:3);
Aux2 := ((Diametro / 2) - Radial) * Densidad * Aux1 / Viscosidad;
If Aux2 > 30.0 Then Aux2 := 5.5 + 2.5 * Ln(Aux2) else
If Aux2 > 5.0 Then Aux2 := -3.05 + 5.0 * Ln(Aux2);
Karman[I] := Aux1 * Aux2;
Error := Abs(Calculada[I] - Karman[I]) * 100 / Calculada[I];

```

```

    WriteLn (Karman[1]:16:3,Error:13:2,' X');
End; (For I := 1)
WriteLn;
WriteLn;
NormVideo;
WriteLn ('<< fin de la practica >>':45);
Read(kbd,Respuesta);
End; (Procedure PRACTICA)

```

```

(          INICIA PROCEDURE PERFIL          )
Begin
    Final := False;
    ESCOGE (1);
    LowVideo;
    GoToXY ( 1, 5); DelLine;
    GoToXY (27, 5); Write ('PERFIL DE VELOCIDADES');
    ESCOGE (2);
    repeat
        ClrScr;
        NormVideo;
        GoToXY (25, 2);
        Write (' ESCOJA LA OPCION DESEADA:');
        LowVideo;
        GoToXY (20, 6);
        Write (' 0-> REGRESA AL MENU PRINCIPAL');
        GoToXY (20, 7);
        Write (' 1-> INTRODUCCION');
        GoToXY (20, 8);
        Write (' 2-> PRACTICA');
        NormVideo;
        Read (Kbd,Numero);
        Case Numero of
            '0' : Final := True;
            '1' : AYUDA (5);
            '2' : PRACTICA;
        end; (Case Numero of)
    until Final;
End;

```

## CONCLUSIONES

Mediante el uso de programas "de cálculo" es posible el mejor aprovechamiento de las prácticas de laboratorio, ya que muchas veces el equipo con que se cuenta es insuficiente para dar oportunidad a todos los alumnos.

Utilizando estos programas de computadora es posible que el estudiante "juegue" con el equipo que el programa simula variando los valores de las corridas, entendiendo así las relaciones entre las diferentes variables.

Es posible cotejar los resultados que el alumno debe obtener en el reporte de su práctica con los obtenidos con el programa.

Ya que estos programas fueron realizados en un lenguaje de programación estructurada, es muy sencilla su interpretación. Además el sistema es modular lo cual quiere decir que es posible agregar otros programas de cálculo para otras prácticas.

Espero que se utilice esta herramienta entre los estudiantes de Ingeniería Química y que este trabajo sea complementado con la implantación de otros programas de cálculo de otras prácticas.

## **BIBLIOGRAFIA**

-----

J.M. de Azevedo Nietto  
MANUAL DE HIDRAULICA  
Harla S.A. de C.V.  
México, 1976.

Vian Ocon  
ELEMENTOS DE INGENIERIA QUIMICA  
Aguilar

Claudio Mataix  
MECANICA DE FLUIDOS Y MAQUINAS HIDRAULICAS  
Harper & Row Publishers Inc.  
México, 1972.

Ronald V. Giles  
FLUIDS MECHANICS AND HYDRAULICS  
McGraw Hill  
Nueva York, 1962.

Robert H. Perry  
CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK  
McGraw Hill  
Nueva York, 1973.

FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES FITTINGS AND PIPES  
Crane Co.  
Nueva York, 1979.

ENGINEERING DATA ON DIFFERENTIAL PRESSURE FLOW METERS  
Acco Bristol Division  
1972.

Tyler G. Hicks  
BOMBAS, SU SELECCION Y OPERACION  
CECSA  
México, 1970.

Foust, Wenzel  
PRINCIPLES OF UNIT OPERATIONS  
John Wiley & Sons  
1962.

M. Viejo Z.  
BOMBAS  
Limusa  
1977.

Jesús Francisco García Rivera  
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN EQUIPO PARA EL ESTUDIO DE FLUJO DE  
FLUIDOS COMPRESIBLES PARA EL LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA DE  
LA UNIVERSIDAD "LA SALLE"  
México, 1987.

Warren McCabe, Julian C. Smith  
UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING  
McGraw Hill  
U.S.A. 1976.

Peter Grogono  
PROGRAMACION EN PASCAL  
Addison-Wesley Iberoamericana  
U.S.A. 1986

Herbert Shildt  
ADVANCED TURBO PASCAL PROGRAMING TECHNIQUES  
Osborne McGraw-Hill  
U.S.A. 1986

TURBO PASCAL LANGUAGE MANUAL  
Borland International  
U.S.A. 1985

E. Ludwig  
APPLIED PROCESS DESIGN FOR CHEMICAL AND PETROCHEMICAL PLANTS  
Gulf Publishing, 1965.

D. J. Stepanoff  
CENTRIFUGAL AN AXIAL FLOW PUMPS  
John Wiley & Sons, 1957.