

## **INTRODUCCION**

Los medidores de flujo son equipos diseñados para originar una caída de presión que puede medirse y relacionarse con la velocidad de flujo, estos medidores producen un cambio de la energía cinética del fluido que se está estudiando. Entre los diferentes medidores de flujo se encuentran el tubo de Venturi y el tubo de Pitot. El primero mide la diferencia de presión existente entre la sección cilíndrica a la entrada y la garganta característica del mismo, y puede conocerse a través de él la velocidad media del fluido. El segundo consta de un tubo delgado que mide la diferencia de presión que hay entre la presión estática local y la presión de impacto y con él se puede conocer la velocidad del flujo punto a punto en una sección transversal de tubería.

El objetivo principal de esta experiencia consiste en realizar la curva de calibración del tubo de Venturi para un flujo de aire, a partir de datos obtenidos experimentalmente con un tubo de Pitot. Para ello se determinará el factor de compresibilidad del aire, las velocidades puntuales para cada coordenada radial y los caudales de operación, se construirán los perfiles de velocidad para cada caudal y se establecerá el régimen de flujo del aire operando a las condiciones ambientales de 25°C y 692 mmHg.

Para alcanzar el objetivo se dispone del equipo conformado por un tramo de tubería de 4" de diámetro (nominal) en el cual se encuentran instalados dos sistemas de medición de flujo, un ventilador que succiona el aire del medio ambiente, y una válvula de compuerta que permite al operador regular la cantidad de aire al sistema.

El primero de los medidores de flujo es un tubo de Venturi al cual se encuentra conectado a un manómetro diferencial (M1, líquido

manométrico agua destilada) en cuyo tramo de manguera que conecta al manómetro con el punto aguas abajo del tubo de Venturi se encuentra una ramificación que abre al ambiente (por medio de una pinza de Mohr), permitiendo determinar la diferencia de altura del líquido manométrico correspondiente a la caída de presión entre aguas arriba y la atmósfera. El segundo medidor de flujo instalado es un tubo de Pitot que también posee un manómetro en U (M2, líquido manométrico alcohol isopropílico) para determinar la diferencia de altura del líquido manométrico correspondiente a la caída de presión entre la presión estática y la dinámica. Las tomas manométricas del tubo de Pitot se conectan al manómetro diferencial por medio de dos válvulas de tipo mariposa.

El procedimiento a seguir consiste en fijar los caudales de operación teniendo como base la diferencia de altura del líquido manométrico de M1, la lectura realizada con la pinza de Mohr que corresponde a la caída de presión en el tubo de Venturi mientras que la lectura hecha sin esta pertenece a la presión absoluta aguas arriba del tubo de Venturi. Para caudal fijado se realizan las lecturas del líquido manométrico de M2 variando la posición vertical del tubo hasta recorrer completamente el diámetro de la tubería. Los datos obtenidos se manejan algebraicamente de tal forma de obtener la información necesaria para alcanzar los objetivos propuestos.

Es importante poder medir y controlar la cantidad de materia que entra y sale de una planta de procesamiento, tanto para optimizar un proceso como para determinar la producción de dicha planta, puesto que los materiales se transportan, siempre que sea posible, en forma fluida, es importante medir la velocidad con la que un fluido

circula por una tubería u otra conducción. Además, si se conoce el perfil de velocidades, se logra obtener el caudal que circula por dicha tubería y la velocidad del fluido. La velocidad también es útil para poder realizar un balance de energía y predecir pérdidas por fricción en un sistema dado, de allí radica la importancia de la experiencia realizada.

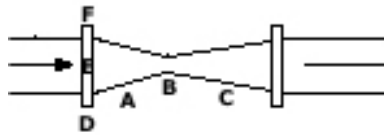
## **DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

A continuación, en esta sección, se presentarán en forma lógica, secuencial, concisa la interpretación, discusión, sustentación y comparación de los valores finales obtenidos a nivel experimental y teórica, para las condiciones de trabajo de 25° C y 692 mmHg.

Para una mejor comprensión de la experiencia es necesario conocer el principio de funcionamiento y la forma de operación del tubo de Venturi y de Pitot.

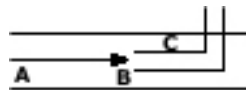
La figura N° 1 muestra un tubo de Venturi el cual consta de una sección de entrada A formada por un pequeño cilindro y tronco de cono, una garganta B, y una sección de salida C que consiste en un largo tronco de cono. En la sección situada aguas arriba, en la unión de las partes cilíndrica y cónica, existe una cámara anular D que comunica con la parte interior del tubo, mediante unos pequeños orificios E. La cámara anular y los pequeños orificios, forman un anillo piezométrico cuya misión es promediar las presiones individuales transmitidas a través de cada orificio. La presión media se transmite a través de la toma de presión F situada aguas arriba. Entre los puntos F y B se conecta un manómetro para medir diferencias de presión. En el tubo de Venturi la velocidad aumenta en el cono anterior y la presión disminuye, utilizándose la caída de presión para medir la velocidad de flujo a través del aparato. Pasado el estrechamiento la velocidad disminuye y se recupera en gran parte la presión original en el cono posterior. Con el fin de que la recuperación de presión sea grande, el ángulo del cono posterior C es pequeño, de forma que se evite la separación de capa límite y la fricción es mínima. Puesto que la separación no tiene lugar en la disminución de la sección transversal,

el cono anterior puede hacerse más corto que el posterior, con el que se ahorra espacio y material.



**Figura N°1:** Tubo de Venturi

El tubo de Pitot sirve para medir la velocidad local o puntual a lo largo de una línea de corriente mediante la diferencia entre la presión de impacto y la presión estática, el principio del mismo se indica en la figura N°2.



**Figura N°2:** Tubo de Pitot

La abertura del tubo estático en el punto B es paralela a la dirección de flujo el cual mide la presión estática puesto que no existe componente de la velocidad en dicho punto. La presión medida en el punto C es la presión dinámica que se asocia al movimiento del fluido dentro de la tubería.

A continuación se muestran los resultados obtenidos durante la experiencia:

La siguiente tabla presenta los valores de los distintos caudales obtenidos en el laboratorio y su comparación con los teóricos:

**Tabla N°1:** Caudales experimentales y teóricos

Diferencia de altura del líquido manométrico con pinza cerrada, ( $\Delta h_c \pm 0,1$ )cm	Diferencia de altura del líquido manométrico con pinza abierta, ( $\Delta h_a \pm 0,1$ )cm	Caudal experimental ( $Q_e$ ) m <sup>3</sup> /s	Caudal teórico ( $Q_{teorico}$ ) m <sup>3</sup> /s	Desviación (%)
40	14.4	0,136	0,152	11
34	12.3	0,130	0,138	6
28	10	0,112	0,126	11
22	8	0,108	0,116	7
13.9	5	0,085	0,092	9

En la Tabla N° 1 se pueden observar los caudales experimentales, obtenidos mediante la integración numérica del perfil de velocidades dado por el tubo Pitot, y los caudales teóricos, obtenidos a partir de la suposición de que la velocidad media del aire es 0,817 veces la velocidad máxima, en función de las caídas de presión registradas en el medidor de Venturi. En ambos casos, se sigue la tendencia esperada, en lo que respecta a que los caudales deben disminuir al disminuir la caída de presión (pues la caída de presión es proporcional al cuadrado del caudal). Las desviaciones varían entre 11 y 6%, valores que se consideran aceptables, especialmente si se considera que la integración numérica se efectuó por el método de los trapecios, que introduce un error de cierta consideración a menos que el intervalo de integración tenga muchas divisiones (no se aplicó el método de Simpson, que es más exacto, por que se tiene un número par de datos discretos), y que el tubo de Pitot en realidad no barre todo el diámetro de la tubería. Además, el suponer que la velocidad media es 0,817 veces la velocidad máxima no es del todo adecuado, pues este factor en realidad varía con el número de Reynolds, y por ende, con el caudal.

Más aún, esta consideración arroja velocidades medias un poco más altas de la verdadera, al no tomar en cuenta las bajas velocidades de las capas cercanas a la pared de la tubería [McCABE, 1991].

A continuación se presenta la variación del factor de expansión para el tubo de Venturi a diferentes caudales:

**Tabla N° 2:** Factor de compresibilidad a diferentes caudales.

Caudal experimental, $Q_e$ [m <sup>3</sup> /s]	Factor de compresibilidad, K [adim.]	Incompresibilidad del gas, I [adim.]	Desviación respecto a la incompresibilidad, $D_i$ [%]
0,136	0.975	1	2
0,130	0.979	1	2
0,112	0.983	1	2
0,108	0.986	1	1
0,085	0.991	1	1

En la Tabla N° 2 se reporta la variación del factor de expansión del aire en función del caudal que circula por el sistema, así como la desviación de dichos factores con respecto a la incompresibilidad del gas. Para fluidos incompresibles el factor de compresibilidad (K) es igual a la unidad, mientras que para fluidos compresibles abarca valores menores a uno. Los resultados obtenidos del factor de expansión son cercanos a la unidad, siendo la desviación máxima de un 2%.

Debido a las pequeñas desviaciones obtenidas, se puede afirmar que la suposición de fluido incompresible establecida en el balance de energía, representado por la ecuación de Bernoulli es aplicable en este caso sin incurrir en errores notables [MOTT, 1996], adicionalmente los gases sometidos a pequeñas variaciones relativas de presión

(proporcional a la diferencia de altura del líquido manométrico, ver tabla N°1) y temperatura se comportan como fluidos no compresibles. Se observa que el aire se desvía en mayor grado de la incompresibilidad a medida que el caudal es mayor, lo cual es de esperarse tomando en cuenta que las caídas de presión se hacen mayores a medida que el caudal aumenta provocando que los cambios en el volumen específico del aire también sean mayores a medida que los caudales se incrementan.

A esto se adiciona que las pérdidas por fricción aumentan al incrementarse el caudal, lo cual se traduce en una mayor generación de calor por fricción y en un aumento de la temperatura, lo cual también contribuye a las variaciones del volumen específico del aire. [STREETER, 2000]

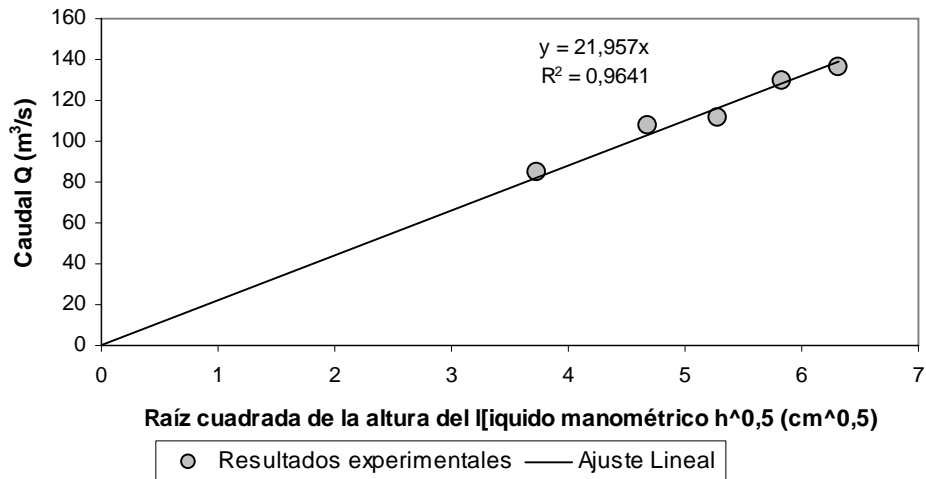
Siguiendo con el análisis, se presenta la tabla para determinar la curva de calibración del tubo de Venturi a partir del tubo de Pitot.

**Tabla N° 3:** Caudal experimental en función de la raíz cuadrada de la variación de altura.

Caudal experimental, $Q_e$ [m <sup>3</sup> /s]	Raíz cuadrada de la diferencia de altura del líquido manométrico, $\sqrt{\Delta H}$ [m <sup>1/2</sup> ]
0,136	6,325
0,130	5,831
0,112	5,292
0,108	4,690
0,085	3,728

Se puede notar que en la tabla, a medida que el caudal aumenta existe un aumento en la diferencia de altura, esto se puede observar

con más facilidad en una curva de calibración de este equipo que se muestra a continuación.



**Gráfico N° 1:** Curva de calibración del tubo de venturi

Se puede observar del gráfico N° 1, que la curva de calibración del tubo de venturi presenta un comportamiento lineal, cumpliéndose y ajustándose a lo esperado, obteniéndose un valor de  $R^2 = 0.9641$ , lo cual da una idea que los datos obtenidos experimentalmente están muy bien ajustado a una recta. Esta curva de calibración ajustada es una recta que pase por el origen ya que se puede afirmar que existe una proporcionalidad entre el caudal del aire y la raíz cuadrada de la altura del líquido manométrico [McCabe, 1991].

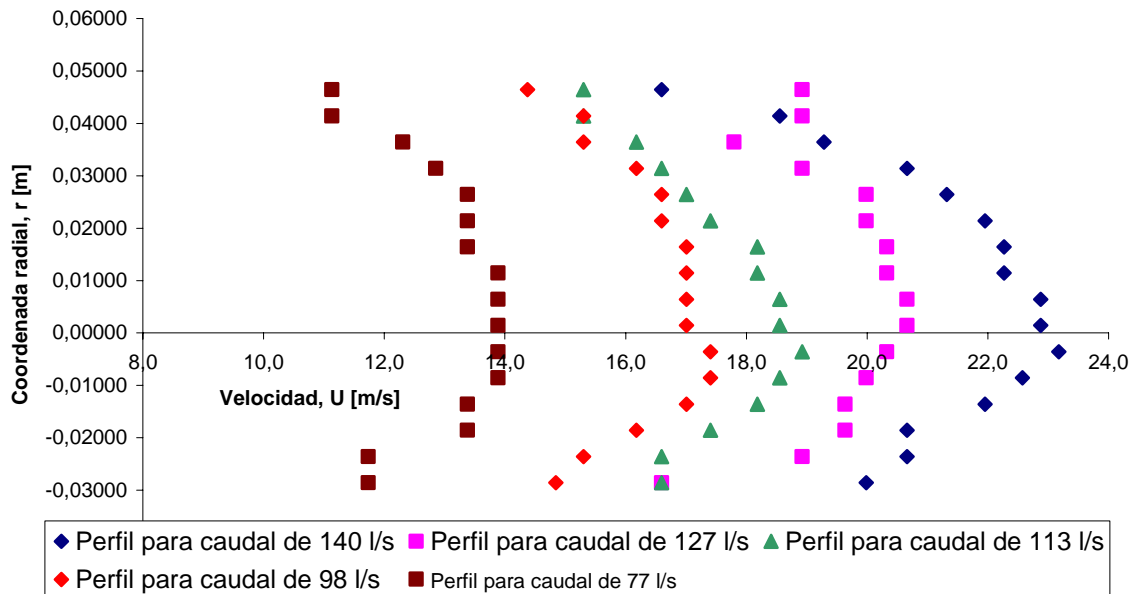
A continuación se presentan las velocidades puntuales para cada caudal obtenidas a través del tubo de Pitot, las cuales se utilizarán para determinar el perfil de velocidades.

**Tabla N°4:** Velocidades puntuales en la tubería en función de la coordenada radial.

POSICIÓN DEL TUBO DE PITOT (cm)	COORDENADA RADIAL (cm)	DENSIDADES PROMEDIOS				
		1,073	1,074	1,075	1,076	1,077
		VELOCIDAD PUNTUAL EN LA TUBERÍA U <sub>o</sub> (m/s)				
		MEDICION 1	MEDICION 2	MEDICION 3	MEDICION 4	MEDICION 5
0,0	0,046	16.6	18.9	15.3	14.4	11.1
0,5	0,041	18.6	18.9	15.3	15.3	11.1
1,0	0,036	19.3	17.8	16.2	15.3	12.3
1,5	0,031	20.7	18.9	16.6	16.2	12.9
2,0	0,026	21.3	20.0	17.0	16.6	13.4
2,5	0,021	22.0	20.0	17.4	16.6	13.4
3,0	0,016	22.3	20.3	18.2	17.0	13.4
3,5	0,011	22.3	20.3	18.2	17.0	13.9
4,0	0,006	22.9	20.7	18.6	17.0	13.9
<b>4,5</b>	<b>0,001</b>	<b>22.9</b>	<b>20.7</b>	<b>18.6</b>	<b>17.0</b>	<b>13.9</b>
<b>5,0</b>	<b>0,004</b>	<b>23.2</b>	<b>20.3</b>	<b>18.9</b>	<b>17.4</b>	<b>13.9</b>
5,5	0,009	22.6	20.0	18.6	17.4	13.9
6,0	0,014	22.0	19.6	18.2	17.0	13.4
6,5	0,019	20.7	19.6	17.4	16.2	13.4
7,0	0,024	20.7	18.9	16.6	15.3	11.7
7,5	0,029	20.0	16.6	16.6	14.8	11.7

Haciendo el análisis correspondiente a estos datos, se puede verificar que para diferentes caudales se obtienen densidades distintas, esto porque cuando aumenta el caudal aumentan las caídas de presión y por ende aumenta la densidad, ya que esta es directamente proporcional, además se puede decir que la velocidad se hace mayor a medida que se acerca al centro de la tubería ya que cerca de las paredes adyacentes a esta, existe fricción disminuyendo la velocidad y a medida que se acerca al centro de la tubería este efecto disminuye incrementando la velocidad.

Para la mejor comprensión de estos datos se anexa la siguiente gráfica:



**Gráfica N° 2:** Perfil de velocidades en coordenada radial a diferentes caudales.

Como se puede observar en la gráfica N° 2, la forma de los perfiles de velocidad obtenidos indica que el régimen de flujo del aire en la tubería es turbulento, esto puede observarse en la distribución uniforme de velocidad que existe en la región central del diámetro de la tubería. En ésta región se presenta la máxima velocidad del fluido, la cual cae en forma abrupta al aproximarse a las paredes de la tubería debido a que la velocidad de cualquier fluido en contacto con un sólido estacionario es cero, esto se explica por la resistencia al movimiento que opone dicho sólido, que en este caso es la pared interna de la tubería. La curva obtenida es simétrica respecto al centro de la tubería, ya que en el centro el fluido vence una resistencia casi nula mientras que la resistencia aumenta a medida que se aproxima a ambos extremos.

La forma de la distribución de velocidad, es debida al movimiento bastante caótico y a la mezcla violenta de las moléculas del fluido en un flujo turbulento, donde existe transferencia de momento entre las moléculas lo cual trae como resultado una distribución de velocidad más uniforme que en flujo laminar.<sup>[Mott, 1996]</sup>. Para caudales mayores se observa que la velocidad alcanzada es mayor, esto muestra que el fluido obedece a la ecuación de continuidad que relaciona de manera directa al caudal con la velocidad.

Para verificar y confirmar lo anteriormente dicho, que el régimen de flujo del aire es turbulento, se presenta la siguiente tabla:

**Tabla N°5:** Número de Reynolds respecto al caudal de aire circulante

Medición	Caudal, $Q_{EXP}$ ()	Numero de Reynolds, Re (adim)
1	136	98218,3
2	130	94063,3
3	112	81046,2
4	108	77975,4
5	25	61352,3

De la tabla N° 5 se aprecia que efectivamente el régimen de flujo del aire, que circula por el sistema, es turbulento debido a que los números de reynolds son mayores que 2000; al mismo tiempo se observa que éste es mayor mientras más grande es el flujo volumétrico, lo que implica mayor velocidad del fluido circulante. Todo esto indica y compraba que los tendencias de los perfiles obtenidos anteriormente se ajustan a un modelo de régimen turbulento, en el cual presenta una velocidad uniforme en la región central de la tubería y una disminución abrupta hacia las paredes.

## CONCLUSIONES

Luego de un análisis y una discusión de los resultados obtenidos, se llegó, en base a fundamentos teóricos y mediante la revisión de las ecuaciones pertinentes, a las siguientes conclusiones:

- Los caudales teóricos son mayores que los experimentales debido a que no se mide la caída de presión existente en la sección transversal de la tubería y el equipo empleado no es el adecuado.
- Cuando aumenta el caudal a través de la tubería en estudio, se tiene mayor caída de presión debido a la fricción existente en el paso del fluido por la garganta del tubo de Venturi.
- Para un fluido incompresible, como el aire a las condiciones ambientales en la que se trabajó, se obtienen un factor de compresibilidad menor a la unidad, pero muy cercano a ella.
- Al aumentar el caudal, el factor de compresibilidad disminuye por no considerar el gradiente de temperatura existente en la tubería.
- Los perfiles de velocidad que se pueden presentar en el sistema de estudio, pueden ser variados, pero el más común el de forma parabólica; que presenta mayores velocidades en el centro de la tubería y menores velocidades en la pared de la tubería.
- El régimen de flujo del aire en la tubería es turbulento, presentando una velocidad uniforme en la región central de la tubería y una disminución abrupta hacia las paredes.

## **RECOMENDACIONES**

A continuación se presentan algunas recomendaciones para lograr un desarrollo más satisfactorio de la experiencia de laboratorio:

- Mantener la boquilla del tubo de Pitot paralelo a la dirección del flujo de gas en el momento de realizar las mediciones de la caída de presión ya que si este se gira sobre su mismo eje se producen oscilaciones en la altura del líquido manométrico que puede provocar errores en su determinación.
  
- Aumentar la longitud de tubería entre el medidor de Venturi y el tubo Pitot para garantizar el reestablecimiento del perfil de velocidades luego del medidor de Venturi.
  
- Utilizar un líquido manométrico con una densidad menor a la del alcohol isopropílico para el manómetro conectado al tubo de Pitot, esto con la finalidad de registrar las pequeñas variaciones de presión que ocurren al desplazar el tubo de Pitot por todo el diámetro de la tubería. De igual forma se debe considerar que para las caídas de presión que ocurren en el sistema, el líquido manométrico debe tener la suficiente densidad como para no salirse del manómetro.
  
- Instalar una escala graduada para el manómetro del tubo de Pitot, para facilitar la lectura.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Mc Cabe y Smith. "OPERACIONES BÁSICAS DE INGENIERÍA QUÍMICA", Editorial Mc Graw Hill. Madrid 1991.
2. Mott, Robert. "MECÁNICA DE FLUIDOS APLICADA", Editorial Prentice Hall. 4ta. Edición. México 1996.
3. Felder, Richard. "PRINCIPIOS ELEMENTALES DE LOS PROCESOS QUÍMICOS", Editorial Limusa Wiley. 3ra. Edición.
4. Streeter, Victor. "MECÁNICA DE FLUIDOS", Editorial Mc Graw Hill. Mexico 1979.
5. Wilinski, Silvia "CALIBRACIÓN DE UN MEDIDOR DE FLUJO", Manual de Práctica de Laboratorio, UCV, Ing. Química, 2004.

## APÉNDICES

### CÁLCULOS TIPOS

A continuación, se presentan los cálculos que se utilizaron para obtener los resultados de la experiencia realizada. Todos los cálculos fueron realizados para la primera medición. (TODAS LAS ECUACIONES EMPLEADAS EN ESTA SECCIÓN FUERON TOMADAS DE REFERENCIA 5)

#### 1. Caída de presión en el tubo de venturi:

$$\Delta P = \rho_{F1} \times g \times \Delta h_1 \times \frac{1m}{100cm} \quad (1)$$

Donde:

$\Delta P_1$ : Diferencia de presión en el tubo Venturi (Pa)

$\rho_{F1}$ : Densidad del líquido manométrico (agua destilada) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) [Wilinski, 2004]

$g$ : Aceleración de la gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ ),  $g=9,81 \text{ m}/\text{s}^2$  [Felder, 1999]

$\Delta h_1$ : Diferencia de altura del líquido manométrico con la pinza cerrada(cm)

$$\Delta P = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 40 \times \frac{1m}{100 \text{ cm}} = 3920 \text{ Pa}$$

#### 2. Diferencia de presión entre el inicio del tubo de Venturi y el ambiente:

$$P_1 = \rho_{F1} \times g \times \Delta h_2 \times \frac{1m}{100 \text{ cm}} + 133,32 \times P_{ATM} \quad (2)$$

Donde:

$P_1$ : Presión absoluta aguas arriba del tubo de venturi (Pa)

$\Delta h_2$ : Diferencia en los niveles del fluido manométrico con la pinza abierta(cm)

$P_{ATM}$ : Presión atmosférica (mm Hg)

$$P_1 = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 14,4\text{cm} \times \frac{1m}{100\text{cm}} + 133,32 \times 692,0\text{mmHg} = 93670\text{Pa}$$

3. **Presión absoluta en la garganta del tubo de venturi:**

$$P_2 = P_1 - \Delta P \quad (3)$$

Donde:

$P_2$ : Presión absoluta en la garganta del tubo Venturi (Pa)

$$P_2 = 93670 Pa - 3920 Pa = 89750 Pa$$

4. **Capacidad calorífica del aire:**

$$C_p = 28,09 + 1,965 \times 10^{-2} \times (T + 273) + 4,799 \times 10^{-6} \times (T + 273)^2 - 1,965 \times 10^{-9} \times (T + 273)^3 \quad (4)$$

Donde:

$C_p$ : Capacidad calorífica a presión constante (J/mol.K)

T: Temperatura del laboratorio ( $^{\circ}C$ )

$$C_p = 28,09 + 1,965 \times 10^{-2} \times (25 + 273) + 4,799 \times 10^{-6} \times (25 + 273)^2 - 1,965 \times 10^{-9} \times (25 + 273)^3$$

$$C_p = 29,52 \frac{J}{mol.K}$$

5. **Razón de las capacidades caloríficas:**

$$K = \frac{C_p}{C_p - R} \quad (5)$$

Donde:

K: Coeficiente de capacidades (adim)

R: Constante universal de los gases (J/mol.K),  $R = 8,314$  J/mol.K

[Felder, 1999]

$$K = \frac{29,52 \frac{J}{mol.K}}{29,52 \frac{J}{mol.K} - 8,314 \frac{J}{mol.K}} = 1,392$$

6. **Razón de diámetros:**

$$\beta = \frac{D_2 - 2e}{D_1} = 0,505 \quad (6)$$

Donde:

$\beta$ : Razón del diámetro de la garganta al diámetro de la tubería (adim)

$D_1$ : Diámetro interno de la tubería (cm)

$D_2$ : Diámetro externo de la garganta del tubo de venturi (cm)

$e$ : Espesor de la tubería (cm)

$$\beta = \frac{5,77\text{cm} - 2.0,301\text{cm}}{10,23\text{cm}} = 0,505$$

7. **Relación de presiones aguas arriba y garganta del tubo y la presión en la garganta:**

$$\gamma = \frac{P_2}{P_1} \quad (7)$$

Donde:

$\gamma$ : Relación entre presión aguas arriba del tubo de venturi y la presión de la garganta (adim)

$$\gamma = \frac{89750\text{Pa}}{93670\text{Pa}} = 0,958$$

8. **Factor de expansión en el tubo de venturi:**

$$Y = \left( \gamma^{\frac{2}{K}} \right) \times \left( \frac{K}{K-1} \right) \times \left( \frac{1 - \gamma^{\frac{K}{K-1}}}{1 - \gamma} \right) \times \left( \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \times \gamma^{2/K}} \right) \quad (8)$$

Donde:

$Y$ : Factor de expansión del tubo de venturi (adim)

$$Y = \left( 0,958^{\frac{2}{1,392}} \right) \times \left( \frac{1,392}{1,392 - 1} \right) \times \left( \frac{1 - 0,958^{\frac{1,392}{1,392-1}}}{1 - 0,958} \right) \times \left( \frac{1 - 0,505^4}{1 - 0,505^4 \times 0,958^{\frac{2}{1,392}}} \right) = 0,975$$

9. **Diferencia de presión entre la presión de impacto y la presión estática local en el tubo de Pitot:**

$$\Delta P_{tp} = \rho_{F2} \times g \times \Delta h \times \frac{1m}{100cm} \quad (9)$$

Donde:

$\Delta P_{tp}$ : Diferencia entre la presión estática y dinámica en el tubo de Pitot (Pa)

$\rho_{F2}$ : Densidad del líquido manométrico (tetracoloro de carbono) ( $\text{Kg/m}^3$ ) [Wilinski, 2004]

$\Delta h$ : Diferencia en la altura del líquido manométrico (cm)

$$\Delta P_{tp} = 785 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 2 \times \frac{1m}{100cm} = 154Pa$$

10. **Densidad del aire:**

$$\rho_{AIRE} = \frac{(P_1 + P_2) \times M_{AIRE}}{2 \times R \times (T + 273) \times 1000} \quad (10)$$

Donde:

$\rho_{AIRE}$ : Densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ )

$M_{AIRE}$ : Peso molecular del aire ( $\text{kg/kmol}$ ),  $M_{AIRE} = 29 \text{ kg/kmol}$  [Felder, 1999]

$$\rho_{AIRE} = \frac{(93670 + 89750)Pa \times 29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{2 \times 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}} \times (26 + 273) \times 1000} = 1,073 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

11. **Velocidad puntual:**

$$U_0 = C \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta P_{tp}}{\rho_{AIRE}}} \quad (11)$$

Donde:

$U_0$ : Velocidad puntual (m/s)

C: Coeficiente del tubo de Pitot (adim),  $C=0,98$  [Wilianski, 2004]

$$U_0 = 0,98 \times \sqrt{\frac{2 \times 154 Pa}{1,073 \frac{Kg}{m^3}}} = 16,6 m/s$$

### 12. Velocidad media teórica:

$$U_m = 0,817 \times U_{Máx} \quad (12)$$

Donde

$U_m$ : Velocidad media teórica (m/s)

$U_{Máx}$ : Velocidad puntual Máxima (m/s)

$$U_m = 0,817 \times 22,9 \frac{m}{s} = 18,50 \frac{m}{s}$$

### 13. Área de la sección transversal de la tubería:

$$A = \pi \times \left( \frac{D_1}{100} \right)^2 \quad (13)$$

Donde:

A: Área ( $m^2$ )

$$A = \pi \times \left( \frac{10,23}{200} \right)^2 = 0,008 m^2$$

### 14. Caudal de aire teórico:

$$Q_{TEORICO} = U_m \times A \times 1000 \quad (14)$$

Donde:

$Q_{TEORICO}$ : Caudal teórico (L/s)

$$Q_{TEORICO} = 18,5 \frac{m}{s} \times 0,008 m^2 \times 1000 L/s = 152,3 \frac{L}{s}$$

15. **Coordenada radial del tubo de Pitot:**

$$r = \left( \frac{D_1}{2} - \frac{D_p}{2} + X \right) \times \frac{1m}{100cm} \quad (15)$$

Donde

r: Coordenada radial (m)

X: Posición del tubo Pitot (adim)

D<sub>p</sub>: Diámetro externo del tubo de Pitot (cm)

$$r = \left( \frac{10,23cm}{2} - \frac{0,945cm}{2} + 0 \right) \times \frac{1m}{100cm} = 0,046m$$

16. **Tipo de régimen:**

$$Re = \frac{U_m \times \left( \frac{D_1}{100} \right) \times \rho}{\mu} \quad (16)$$

Donde:

Re: Reynolds (adim)

μ: Viscosidad del fluido (cp)

$$Re = \frac{16,5 \frac{m}{s} \times \left( \frac{10,23cm}{100} \right) \times 1,073 \frac{Kg}{m^3}}{1,84 \times 10^{-5} Pa} = 98218,3$$

17. **Perfil teórico:**

$$U_o = 2 \times U_m \times \left[ 1 - \left( \frac{2r}{D_1} \right)^n \right] \quad (17)$$

Donde:

n: Depende del tipo de régimen (2 para régimen laminar y 1/7 para turbulento)<sup>[Wilinski, 2004]</sup>

$$U_o = 2 \times 18,5 \frac{m}{s} \times \left[ 1 - \left( \frac{2 \times 0,046m}{10,23cm} \right)^{1/7} \right] = 18,12 \frac{m}{s}$$

18. **Radio interno de la tubería:**

$$R = \frac{D_1}{200} \quad (18)$$

Donde:

R: Radio interno de la tubería (m)

$$R = \frac{10,23cm}{200} = 0,051m$$

19. **Caudal de aire experimental:**

$$Q_{EXP} = \int_0^{r_i} 2\pi r U_o dr \quad (19)$$

Donde:

$Q_{EXP}$ : Caudal experimental (L/s)

Esta integral se solucionó con el método de trapecio:

$$Q_{EXP} = \frac{h}{2} \times \left[ f(x_0) + f(x_N) + 2 \times \sum_{i=1}^{N-1} f(x_i) \right] \times 1000 \quad (20)$$

Donde:

$$f(x) = 2 \times \pi \times r \times U_o$$

$$f(x_o) = 2 \cdot \pi \cdot 0,046 \cdot 16,6 \frac{m}{s} = 4,79$$

$$Q_{EXP} = \frac{0,005}{2} \times \left[ 4,84 + 3,59 + 2 \times (4,83 + 4,41 + 4,08 + 3,54 + 2,96 + 2,30 + 1,60 + 0,92 + 0,20 + 0,52 + 1,22 + 1,87 + 2,41 + 3,06 + 3,59) \right] = 136 \frac{L}{s}$$

21. **Constante de calibración:**

$$K = \frac{Q_2 - Q_1}{\sqrt{H_2} - \sqrt{H_1}} \quad (22)$$

Donde:

K: Constante de proporcionalidad (m<sup>3</sup>/min.cm<sup>2</sup>)

Q<sub>1,2</sub>: Caudales correspondientes a dos puntos de la recta (m<sup>3</sup>/min)

$\sqrt{H}_{1,2}$ : Raíz cuadrada de la diferencia de altura manométrica correspondientes a dos punto (cm<sup>2</sup>)

$$K = \frac{24,078 \times 5 - 24,078 \times 4}{5 - 4} = 24,078$$

## 22. Porcentaje de desviación entre el caudal teórico y experimental:

$$\%Desv.Q = \frac{(|Q_{TEORICO} - Q_{EXP}|) \times 100}{Q_{TEORICO}} \quad (23)$$

Donde:

$\%Desv.Q$ : Porcentaje de desviación del flujo volumetrico (%)

$$\%Desv.Q = \frac{(|152,3 \frac{L}{S} - 136 \frac{L}{S}|) \times 100}{136 \frac{L}{S}} = 11\%$$

**APÉNDICE**  
**HOJA DE DATO**

**Tabla N° 6.** Condiciones ambientales del Laboratorio

Temperatura Ambiente, ( $T \pm 1$ ) °C	Presión Atmosférica ( $P \pm 0,1$ ) mmHg
25	692,0

**Tabla N° 7.** Diámetro de las tuberías del equipo.

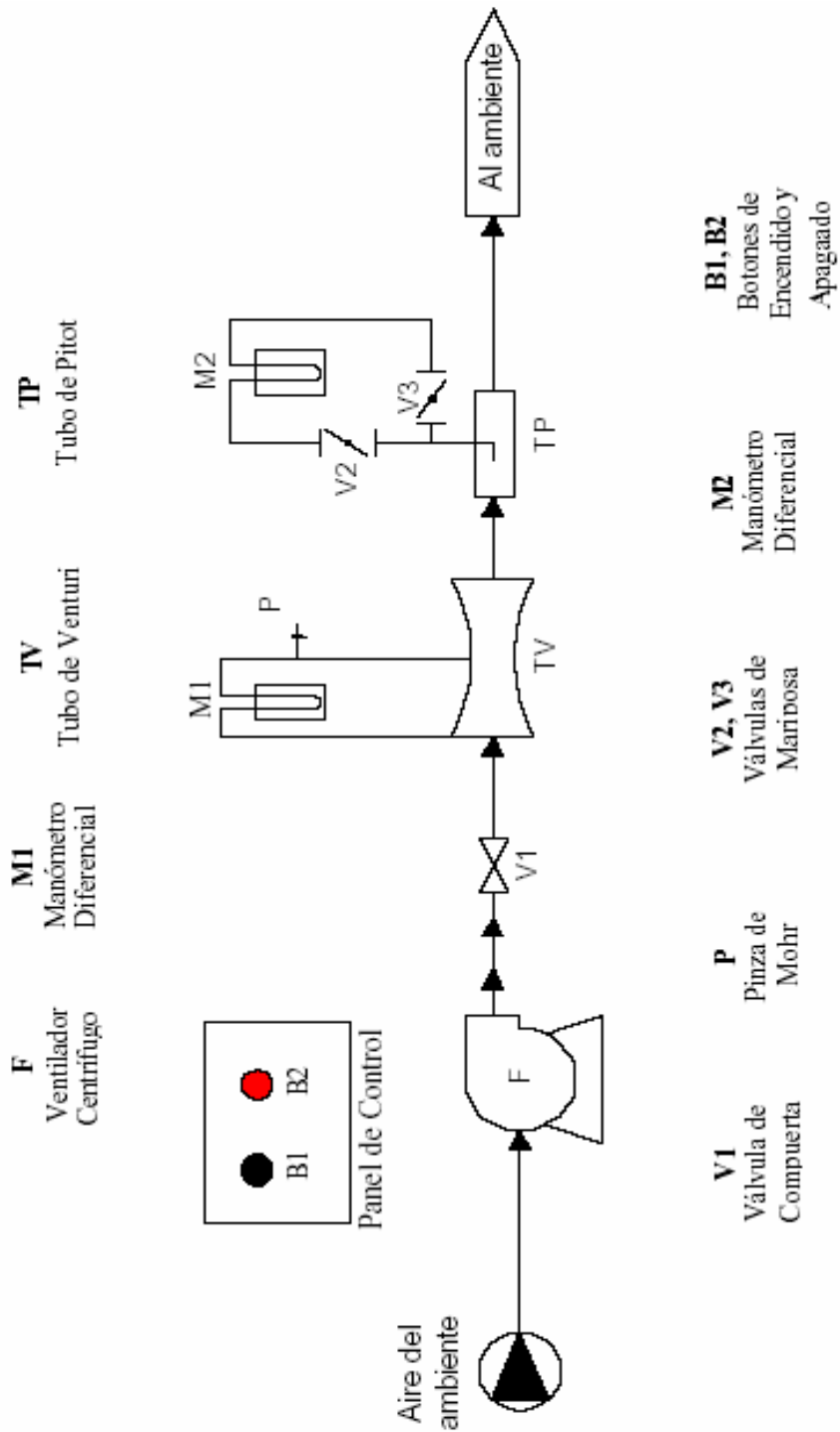
Diámetro de la garganta del Tubo de Venturi (cm)	Diámetro externo del Tubo de Pitot (cm)
5,77	0,945

**Tabla N° 8.** Lecturas correspondiente al tubo de pitot

Altura del Tubo de Pitot ( $X \pm 0,1$ ) cm	Diferencia de altura del líquido manométrico en M2 ( $\Delta h \pm 0,1$ ) cm				
	Medición1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición5
0.0	1.9	1.8	1.3	0.8	0.4
0.5	2.8	2.1	1.4	1.0	0.4
1.0	2.9	2.3	1.7	1.2	0.5
1.5	3.1	2.5	1.8	1.3	0.5
2.0	3.2	2.6	1.9	1.3	0.6
2.5	3.3	2.6	2.0	1.4	0.6
3.0	3.4	2.7	2.0	1.4	0.6
3.5	3.4	2.7	2.1	1.4	0.7
4.0	3.4	2.7	2.1	1.4	0.7
4.5	3.4	2.7	2.1	1.3	0.6
5.0	3.3	2.7	2.0	1.3	0.6
5.5	3.3	2.6	2.0	1.3	0.6
6.0	3.2	2.5	2.0	1.2	0.5
6.5	3.1	2.5	1.9	1.2	0.5
7.0	3.0	2.4	1.9	1.2	0.5
7.5	3.0	2.3	1.8	1.1	0.4

## APÉNDICE

### DIAGRAMA DEL EQUIPO



**Gráfico N° 3:** Diagrama del sistema empleado