

## **CAPÍTULO 5**

### **EXPERIMENTOS FLUIDINÁMICOS**

En este trabajo se realizaron pruebas fluidinámicas de partículas de pimienta chica con vapor sobrecalentado. Se realizaron nueve experimentos de fluidinámica bajo diferentes condiciones cada uno. Tres bajo presiones atmosféricas (80 kPa), tres a una presión de vacío de 67 kPa y tres a una presión de vacío de 58.7 kPa. En los tres casos se utilizó una temperatura para cada experimento; es decir, tres temperaturas, las cuales fueron 120°, 140° y 160°.

#### **5.1 PROPIEDADES DE LA PARTÍCULA**

En el estudio de las propiedades fluidinámicas de cierto tipo de partículas, es necesario conocer sus propiedades físicas para realizar una comparación entre resultados teóricos y experimentales. Para este trabajo fue necesario calcular la densidad de las partículas ( $\rho$ ), su esfericidad ( $\Phi$ ) y su diámetro promedio ( $d_p$ ). A continuación se describirá la metodología utilizada para el cálculo de las tres propiedades antes mencionadas.

##### **5.1.1 DENSIDAD DE LAS PARTÍCULAS**

Con ayuda de una probeta graduada de vidrio de 50 ml. y una báscula de precisión de 0.001 grs. fue posible calcular la densidad de las partículas. Para el cálculo de la densidad de las partículas se realizaron cinco experimentos en donde se introdujo una cierta cantidad de masa de pimienta, previamente medida con la báscula de precisión, en la probeta graduada y de esta forma se obtuvo un promedio de la relación de la masa de las partículas de pimienta con respecto al volumen que desplazan. A continuación se muestran los resultados del cálculo de la densidad de la pimienta.

**Tabla 5.1** Cálculo experimental de la densidad de las partículas

M [grs]	V [ml]	P [kg/m <sup>3</sup> ]
2.36	2.7	874
3.27	3.9	838.6
2.68	3.	893.3
3.25	3.9	833.3
2.66	3.1	858.1

En donde la densidad promedio de de 859.46 kg/m<sup>3</sup>. Patiño [7] calculó previamente la densidad de la pimienta chica y obtuvo 838.87 kg/m<sup>3</sup>. Ambos valores son muy similares, por lo que valor de densidad calculado en este trabajo es aceptable.

### 5.1.2 ESFERICIDAD DE LA PARTÍCULA

El método utilizado para calcular la esfericidad de las partículas de pimienta fue el mismo usado por Guarneros [13]. Para el cálculo de la esfericidad se utilizo la siguiente ecuación citada por Guarneros [13]:

$$\Phi = \frac{\sqrt{a \cdot b}}{c} \quad (5.1)$$

donde a, b y c son tres diámetros de la partícula perpendiculares entre ellos y c es el diámetro mayor de la partícula.

Para la medición de la esfericidad de las partículas de pimienta se tomaron quince muestras al azar, a las cuales se les midió los tres diámetros previamente mencionados. Una vez calculadas las quince esfericidades correspondientes a cada muestra se obtuvo un valor promedio de las esfericidades. Para la medición de estas esfericidades se utilizó un micrómetro con una precisión de 0.01 micras de pulgadas. A continuación la tabla 5.2 muestra los valores de los diámetros y esfericidades de las quince pruebas de pimienta utilizadas.

**TABLA 5.2** Medición de la esfericidad de las partículas de pimienta

<b>Esfericidad</b>			
<b>a [in]</b>	<b>b [in]</b>	<b>c [in]</b>	<b><math>\Phi</math></b>
0.188	0.189	0.206	0.92
0.191	0.198	0.214	0.91
0.17	0.175	0.187	0.92
0.185	0.181	0.19	0.96
0.2	0.196	0.204	0.97
0.184	0.18	0.185	0.98
0.178	0.187	0.205	0.89
0.169	0.21	0.232	0.81
0.168	0.164	0.191	0.87
0.19	0.183	0.192	0.97
0.206	0.196	0.209	0.96
0.18	0.186	0.197	0.93
0.185	0.184	0.192	0.96
0.187	0.192	0.197	0.96
0.178	0.183	0.199	0.91
<b><math>\Phi = 0.93 \pm 0.047</math></b>			

### 5.1.3 DIÁMETRO PROMEDIO DE LA PARTÍCULA

Para calcular el diámetro promedio de la partícula fueron necesarios los diámetros a, b y c descritos anteriormente. Primero se obtuvo el promedio de los tres diámetros a, b y c para cada partícula utilizada. Después se obtuvo un diámetro promedio de los quince diámetros obtenidos anteriormente. La tabla 5.23 muestra los valores de los diámetros y el valor promedio de estos.

**TABLA 5.3 Medición del diámetro promedio de las partículas**

<b>Diámetro promedio</b>			
<b>a [in]</b>	<b>B [in]</b>	<b>c [in]</b>	<b>Dp</b>
0.188	0.189	0.206	0.19
0.191	0.198	0.214	0.20
0.17	0.175	0.187	0.18
0.185	0.181	0.19	0.19
0.2	0.196	0.204	0.20
0.184	0.18	0.185	0.18
0.178	0.187	0.205	0.19
0.169	0.21	0.232	0.20
0.168	0.164	0.191	0.17
0.19	0.183	0.192	0.19
0.206	0.196	0.209	0.20
0.18	0.186	0.197	0.19
0.185	0.184	0.192	0.19
0.187	0.192	0.197	0.19
0.178	0.183	0.199	0.19
<b>Dp = 0.19 ±0.0089 in</b>			
<b>Dp = 4.83±0.0517 mm</b>			

## **5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL EQUIPO**

Como ya fue descrito en el capítulo 4, el agua que toma la bomba para generar el vacío alcanza temperaturas de hasta 90° C. Esto ocasiona que la eficiencia de la bomba se reduzca enormemente y por lo tanto, ya no genera las presiones de vacío requeridas en la columna. Para evitar este problema se introdujo un intercambiador de calor con la finalidad de enfriar constantemente el agua que toma la bomba para generar el vacío dentro de la columna. La bomba descarga agua caliente a un tanque de 450 litros. Este tanque está conectado al tanque que contiene el serpentín del intercambiador de calor. Por lo tanto, el tanque de 450 litros descarga agua caliente al tanque que contiene el serpentín del intercambiador. El agua caliente descargada es enfriada por el serpentín y la bomba toma agua fría para producir el vacío. Sin embargo, la descarga de agua de la bomba de vacío hacia el tanque de 450 litros es menor que la descarga que realiza el tanque de 450 litros

hacia el tanque que contiene el serpentín de calor. Por lo tanto, se colocó una válvula de bola a la manguera que conecta el tanque de 450 litros con el tanque que contiene el serpentín de calor. De esta forma, es posible regular la descarga de agua hacia el tanque del serpentín de calor y evitar que un tanque se llene antes que el otro. No obstante, siempre es necesaria la constante supervisión de este sistema para estar regulando el flujo de agua con la válvula de bola y evitar que el agua se derrame. Las figuras 5.1 y 5.2 muestran el sistema de enfriamiento del agua y la válvula de bola que regula el flujo de agua que entra al tanque del serpentín de calor.



**FIGURA 5.1 Sistema de enfriamiento del agua**



**FIGURA 5.2 Conexión entre tanques para facilitar enfriamiento**

En experimentos de fluidinámica al vacío, era posible trabajar solamente hasta 30 minutos continuos cuando no se contaba con este intercambiador de calor. Después de este tiempo la eficiencia de la bomba disminuía enormemente sin generar las presiones requeridas. Con este sistema de enfriamiento del agua colocado en este trabajo es posible trabajar hasta noventa minutos continuos sin que la eficiencia de la bomba disminuya. Después de este tiempo, es necesario dejar enfriar el agua sin introducir vapor sobrecalentado en el sistema, o cambiar el agua de los tanques o al menos parte de ella.

Cuando el equipo no contaba con el serpentín, la temperatura que alcanzaba el agua usada para generar el vacío alcanzaba los 70° C. en tan solo 30 minutos. Con este intercambiador de calor el agua alcanza la temperatura de 50° C. después de 90 minutos de uso. Con esto podemos contar con una presión constante durante todos los experimentos.

### **5.3 REGISTRO DE DATOS DURANTE LOS EXPERIMENTOS DE FLUIDINÁMICA**

Una vez que las partículas se encuentran fluidizando dentro de la columna y la presión es la adecuada, es necesario registrar los datos necesarios para calcular los parámetros importantes del estudio de la fluidinámica. Estos datos deben tomarse cada vez que se disminuye el flujo de vapor a la columna provocando que el mercurio del manómetro de la placa disminuya máximo 3mm. La hoja de registro de datos que se utilizó en este trabajo fue la siguiente:

#### REGISTRO DE DATOS EN LA PLACA

**TABLA 5.4** Formato de registro de datos en la primera parte del equipo.

medición	T	P <sub>man</sub>	P <sub>vacío</sub>	manómetro Hg	
				h <sub>min</sub>	h <sub>max</sub>
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

#### REGISTRO DE DATOS EN LA COLUMNA

**TABLA 5.5** Formato de registro de datos en la segunda parte del equipo

medición	T	Altura lecho			manometro CCl <sub>4</sub>	
		L <sub>min</sub>	L <sub>max</sub>	L <sub>prom</sub>	h <sub>min</sub>	h <sub>max</sub>
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

Los datos registrados en la tabla 5.4 son usados para calcular el flujo volumétrico  $Q$  del vapor sobrecalentado, el coeficiente de descarga  $C_d$  y el número de Reynolds. Por medio de la temperatura  $T$ , y la presión manométrica  $P_{man}$  o de vacío  $P_{vacío}$  es posible calcular las propiedades del vapor sobrecalentado para obtener los tres parámetros antes mencionados. Estas propiedades fueron calculadas con ayuda del complemento de Excel®: water97\_v13.xla [37].

Los datos registrados en la tabla 5.5 son usados para obtener la caída de presión en la columna  $\Delta P_{col}$ , la caída de presión en el lecho  $\Delta P_{lecho}$ , la caída de presión en el distribuidor  $\Delta P_{dist}$  y la porosidad del lecho  $\varepsilon$ . Con estos parámetros es posible determinar las velocidades mínimas de fluidización mediante gráficas.

Sin embargo, los manómetros en este equipo, tanto el de mercurio como en el de tetracloruro de carbono no están nivelados. Por lo que fue necesario aplicar un factor de corrección. Al calcular la diferencia de presión en la placa, fue necesario restar la diferencia inicial de alturas del manómetro a cada diferencia de alturas medidas durante el experimento. Al calcular la diferencia de presión en la columna, fue necesario restar la



diferencia de alturas medidas en cada experimento a la diferencia inicial de alturas antes de cada experimento.

#### 5.4 CÁLCULO DE PARÁMETROS IMPORTANTE DE FLUIDINÁMICA

En este trabajo fueron calculados tres parámetros importantes para el estudio de la fluidinámica de partículas de pimienta chica; la velocidad mínima de fluidización, la altura y la porosidad del lecho. Las gráficas de estos tres parámetros son mostradas en el apéndice A. Sin embargo, para el cálculo de estos tres parámetros es necesario obtener primeramente el flujo volumétrico al que viaja el vapor a través del sistema. De esta manera podremos obtener las diferentes velocidades en cada caso y, por lo tanto, obtener la velocidad mínima de fluidización.

Para el cálculo de la velocidad del flujo de vapor, el único dato con el que se cuenta es la caída de presión de la placa de orificio, medida con un manómetro U de mercurio. La caída de presión en la placa puede ser calculada por medio de la fórmula general:

$$\Delta P = \Delta h \times \Delta \rho \times g \quad (5.2)$$

donde:

$\Delta \rho$  es la diferencia de densidad entre el mercurio y el agua

$\Delta h$  es la diferencia de alturas del mercurio

$g$  es la aceleración gravitacional.

Una vez que se conoce la caída de presión en el lecho, es posible utilizar la siguiente fórmula citada por White [35] para obtener el flujo volumétrico del sistema:

$$Q = C_d A_t \left[ \frac{2(\Delta P)}{\rho(1 - \beta^4)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

Donde:

$C_d$  es el coeficiente de descarga de la placa

$A_t$  es el área del orificio

$\beta$  es el radio de contracción del orificio

$\Delta P$  es la caída de presión del sistema

$\rho$  es la densidad del vapor

Los cuatro últimos datos mencionados son conocidos, ya que son constantes o pueden obtenerse mediante tablas. Sin embargo, el coeficiente de descarga  $C_d$  no es conocido. Para obtenerlo es posible utilizar la fórmula citada por White [35]:

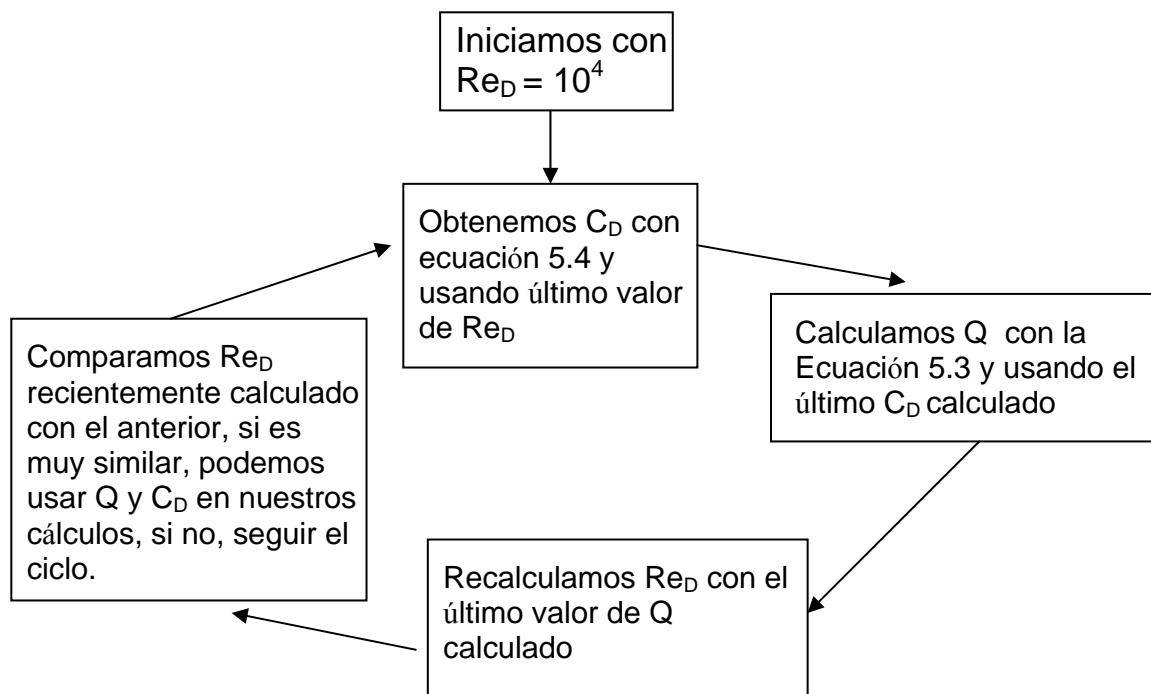
$$C_d = 0.5899 + 0.05\beta^2 - 0.08\beta^6 + (0.0037\beta^{1.25} + 0.011\beta^8) \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

En donde:

$Re_D$  es el número de Reynolds en la parte previa al orificio.

Sin embargo, no contamos con un número de Reynolds inicial, por lo que será necesario asumir inicialmente un flujo turbulento y elegir un número de Reynolds considerablemente grande. En este trabajo se asumió un número de Reynolds inicial de  $10^4$ . Con este valor inicial fue posible calcular un coeficiente de descarga  $C_D$  inicial aproximadamente igual a 0.63. Con este valor fue posible calcular un flujo volumétrico inicial al igual que una velocidad. Finalmente con esta velocidad y los valores de viscosidad del vapor bajo las condiciones experimentales se recalculó nuevamente el número de Reynolds. Este nuevo número de Reynolds es usado para calcular nuevamente los parámetros antes mencionados que a su vez serán usados para calcular otro número de Reynolds. Este proceso debe repetirse al menos dos veces o hasta que el valor del número de Reynolds deje de variar mucho.

Para describir mejor este proceso, se presenta a continuación un diagrama de flujo que muestra cada paso usado al calcular el coeficiente de descarga y el flujo volumétrico.



**FIGURA 5.3 Metodología para obtener el flujo volumétrico del sistema**

Sin embargo, es necesario multiplicar el flujo volumétrico por el coeficiente de expansión que existe en el orificio, ya que este al expandirse debido a la temperatura y la presión permitirá pasar menor flujo. El coeficiente de expansión se obtiene con la ecuación dada por Benedict [36]:

$$Y = 1 - \frac{(0.41 + 0.35\beta^4)(1 - r)}{\gamma} \quad (5.5)$$

donde  $r$  es la relación entre la presión antes y después del orificio.

A continuación se presenta la tabla de constantes utilizadas en los cálculos de este trabajo y previamente usadas también por Guarneros [13] y por Patiño [7].

Para determinar la velocidad mínima de fluidización fue necesario realizar gráficas de velocidad del vapor contra la caída de presión en el lecho fluidizado. El punto en donde

estas gráficas cambian su trayectoria es la velocidad mínima de fluidización. Durante los experimentos se partió de una fluidización completa y se fue reduciendo el flujo poco a poco hasta alcanzar el flujo cero. Durante cada reducción se registraron los datos mostrados en las tablas 5.4 y 5.5. Cada experimento se realizó a presión y temperatura constantes. Cabe mencionar que en estos experimentos, el flujo volumétrico no es constante, ya que la presión y la temperatura varían de una zona a otra en el equipo. Por lo que es necesario ocupar la fórmula de continuidad del flujo másico para calcular la velocidad con la que el vapor entra a la columna:

$$Q_{placa} \rho_{placa} = Q_{columna} \rho_{columna} \quad (5.6)$$

Donde  $Q_{placa}$  es el flujo volumétrico en la placa, calculado con la ecuación 5.3

$\rho_{placa}$  es la densidad del vapor que sale de la placa

$\rho_{columna}$  es la densidad del vapor que se encuentra dentro de la columna

$Q_{columna}$  es el flujo volumétrico de vapor dentro de la columna, necesario para calcular la velocidad del vapor.

Para obtener la caída de presión en el lecho es necesario utilizar la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{COLUMNA} = \Delta P_{DISTRIBUIDOR} + \Delta P_{LECHO} \quad (5.7)$$

La diferencia de presión en la columna es medida con el manómetro de tetracloruro de carbono, la caída de presión en el distribuidor puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \rho_{H_2O} g (B_M + h_2 - A_M - h_1) + \rho_{CCl_4} g (h_1 - h_2) \quad (5.8)$$

Es necesario mencionar que las alturas en este manómetro no se mantienen constantes, por lo que será necesario restar la caída de presión última a cada caída de presión registrada en el experimento. Es decir, se restará la caída de presión que marca el manómetro cuando el

experimento haya finalizado.  $A_M$  y  $B_M$  son constantes con valores de 10 y 81 respectivamente.

Finalmente es posible calcular la caída de presión en el lecho para cada experimento.

**TABLA 5.6** Constantes en las pruebas experimentales.

CONSTANTES	
$\rho$ Hg (kg/m <sup>3</sup> )	13350
$\rho$ CCl <sub>4</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1604
$\rho$ H <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	1000
D or placa (m)	1.65E-2
A or placa (m <sup>2</sup> )	2.14E-4
D col (m)	0.1082
A col(m <sup>2</sup> )	9.19E-3
B	0.65
D or dist (m)	1.59E-3
N or dist (or/m <sup>2</sup> )	30017
t (m)	1.5E-3
$C_{d,or}$	0.814
$\Gamma$	1.33

El formato de las tablas de resultados será la misma que utilizó Guarneros [13].

**TABLA 5.7:** Tabla de resultados de fluidinámica.

RESULTADOS							
No. medición	$C_D$	Y	Q (m <sup>3</sup> /s)	u (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta P_{dist}$	$\Delta P_{lecho}$	Re
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

### 5.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Mediante la graficación de la velocidad de entrada del vapor a la columna con respecto a la caída de presión y la longitud del lecho, fue posible calcular las velocidades mínimas de fluidización visualmente. No obstante, se hizo una comparación de los resultados

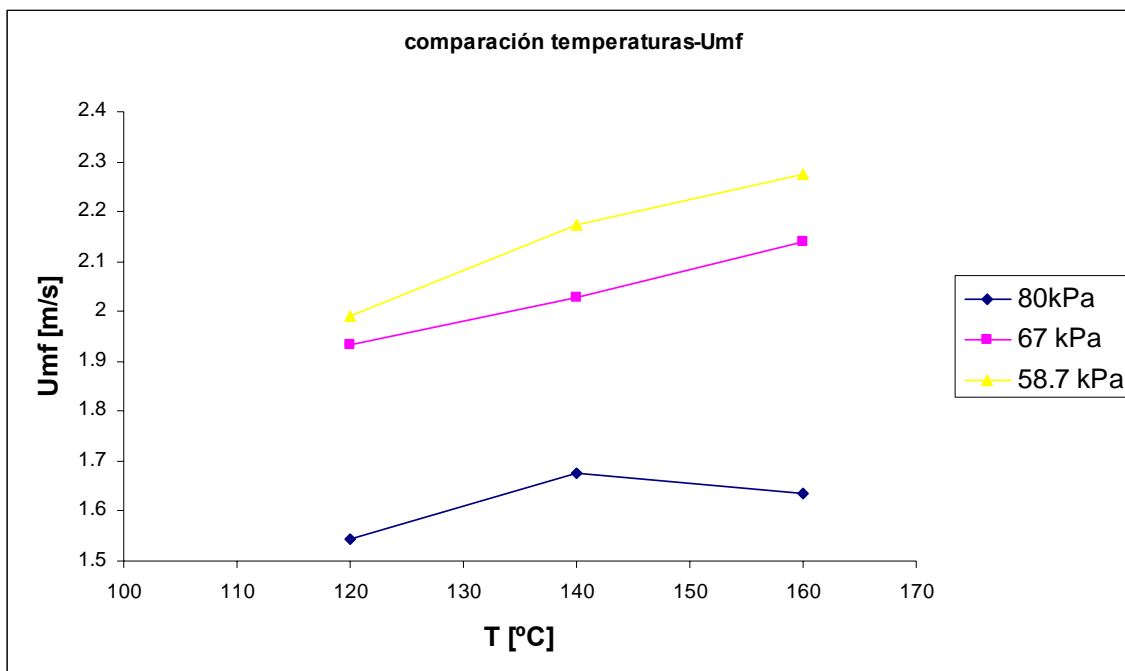
experimentales con los resultados teóricos. Se calculó la velocidad mínima de fluidización con la ecuación 2.8. Los resultados son presentados a continuación:

**TABLA 5.8 Comparación de resultados teóricos con experimentales**

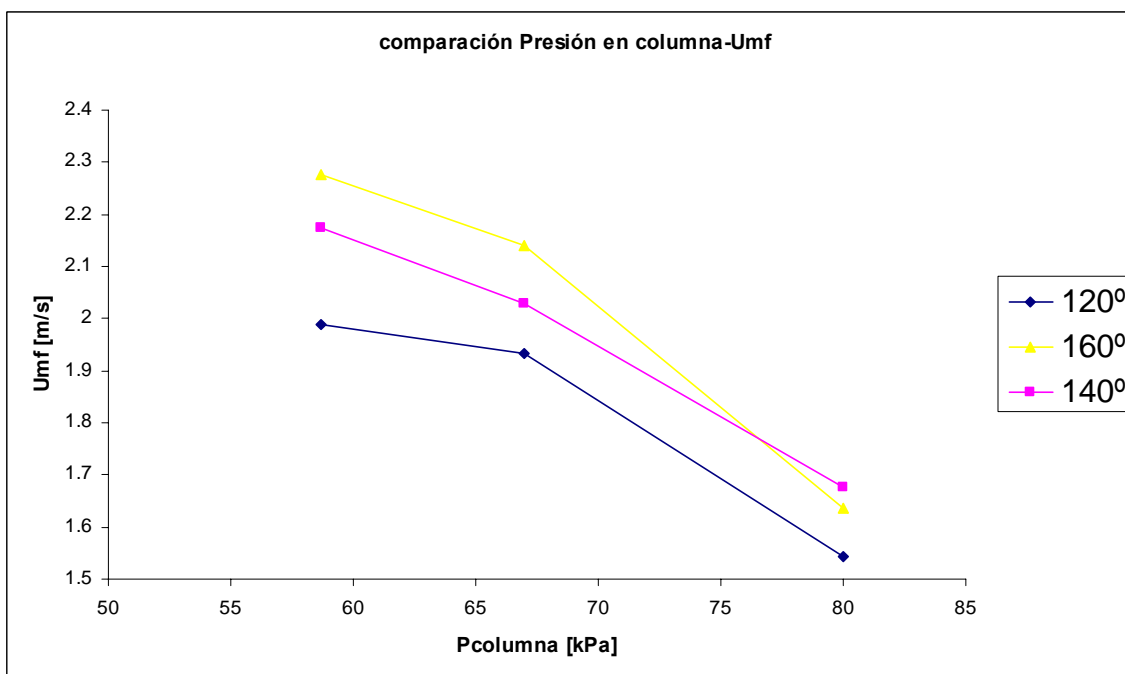
Presión [kPa]	Temp [°C]	U <sub>mf</sub> ( $\Delta P_{lecho}$ ) [m/s]	U <sub>mf</sub> (altura del lecho) [m/s]	U <sub>mf</sub> teórica. (ecuación 2.8)	U <sub>mf</sub> teórica. (ecuación 2.22)
		primeros experimentos	primeros experimentos		
80	120	1.543	1.543	1.738	1.884
80	140	1.676	1.676	1.768	1.905
80	160	1.635	1.635	1.794	1.923
67	120	1.868	1.868	1.882	2.027
67	140	1.962	1.962	1.912	2.047
67	160	2.105	1.843	1.939	2.063
58.7	120	1.99	1.99	1.996	2.140
58.7	140	2.174	1.979	2.026	2.158
58.7	160	2.275	2.275	2.053	2.173

En donde se observa que existe poca diferencia entre los resultados teóricos con los experimentales. Esta diferencia puede deberse a difícil manejo del equipo de vapor sobrecalentado con el que cuenta la universidad, ya que es muy difícil tener un control exacto tanto de la temperatura como de la presión dentro de la columna. También la diferencia pudo deberse a malas lecturas de los manómetros, sobretodo al manómetro de tetracloruro de carbono, ya que, al ser tan sensible, es también muy inestable durante los experimentos al vacío.

Con los resultados obtenidos es posible observar el comportamiento de la velocidad mínima de fluidización con respecto a la temperatura y a la presión de operación. Este comportamiento es analizado con la siguiente figura:



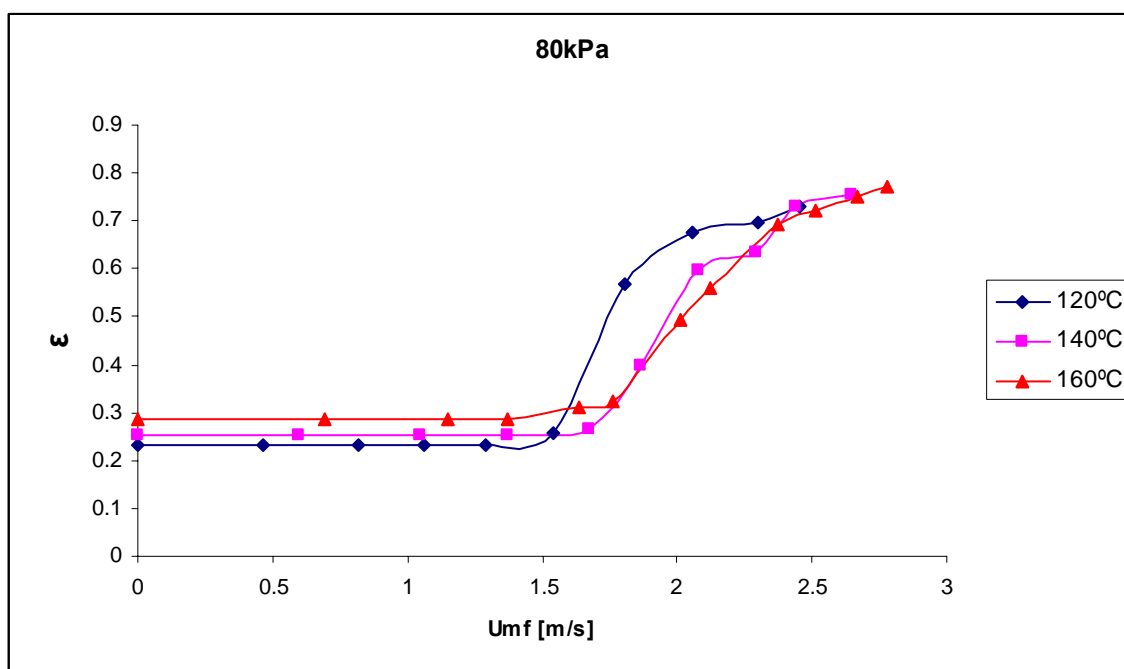
**FIGURA 5.4:** Efecto de la temperatura y presión de vapor sobrecalentado sobre la velocidad mínima de fluidización



**FIGURA 5.5:** Efecto de la temperatura y presión de vapor sobrecalentado sobre la velocidad mínima de fluidización

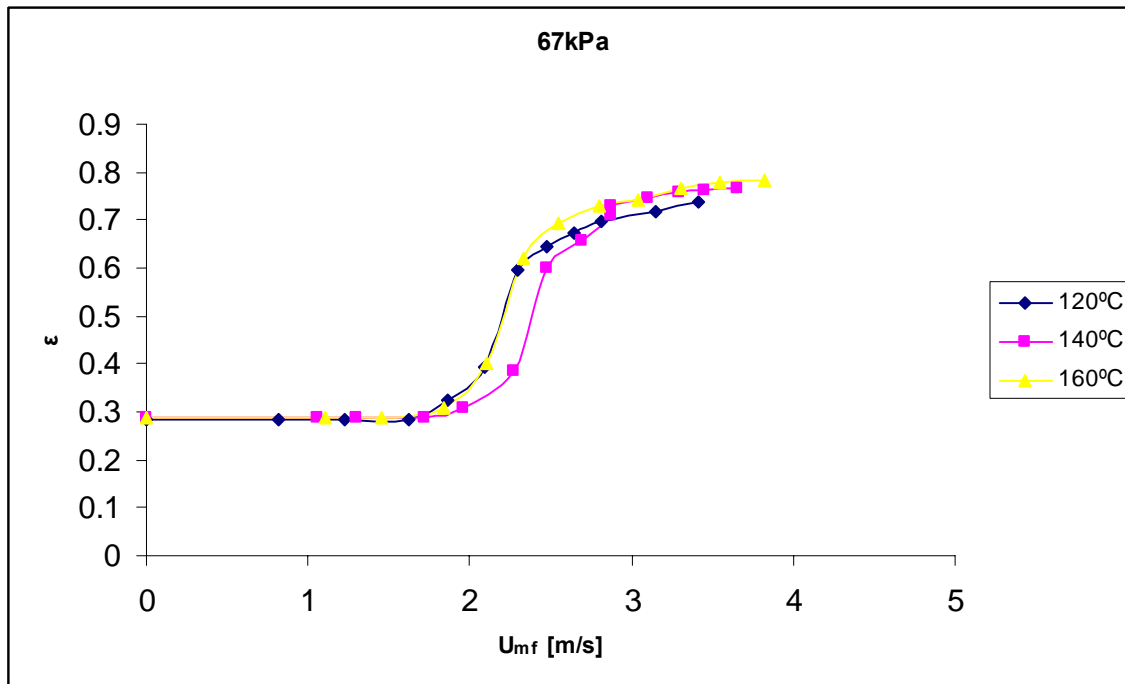
Se puede observar que la velocidad de fluidización es directamente proporcional a la temperatura, ya que esta tiende a aumentar cada vez que se aumenta la temperatura. Sin embargo, la velocidad mínima de fluidización es inversamente proporcional a la presión, ya que esta disminuye al aumentar la presión. Estos resultados serán discutidos más a fondo en la parte de conclusiones.

Finalmente se presenta a continuación gráficas de la porosidad del lecho con respecto a la velocidad. Existe una gran relación entre estos dos parámetros. Cuando se cuenta con este tipo de gráficas es fácil calcular el tamaño del lecho, las dimensiones del secador, o incluso es posible obtener la velocidad a la que se debe operar el lecho cuando se conoce la altura del lecho.

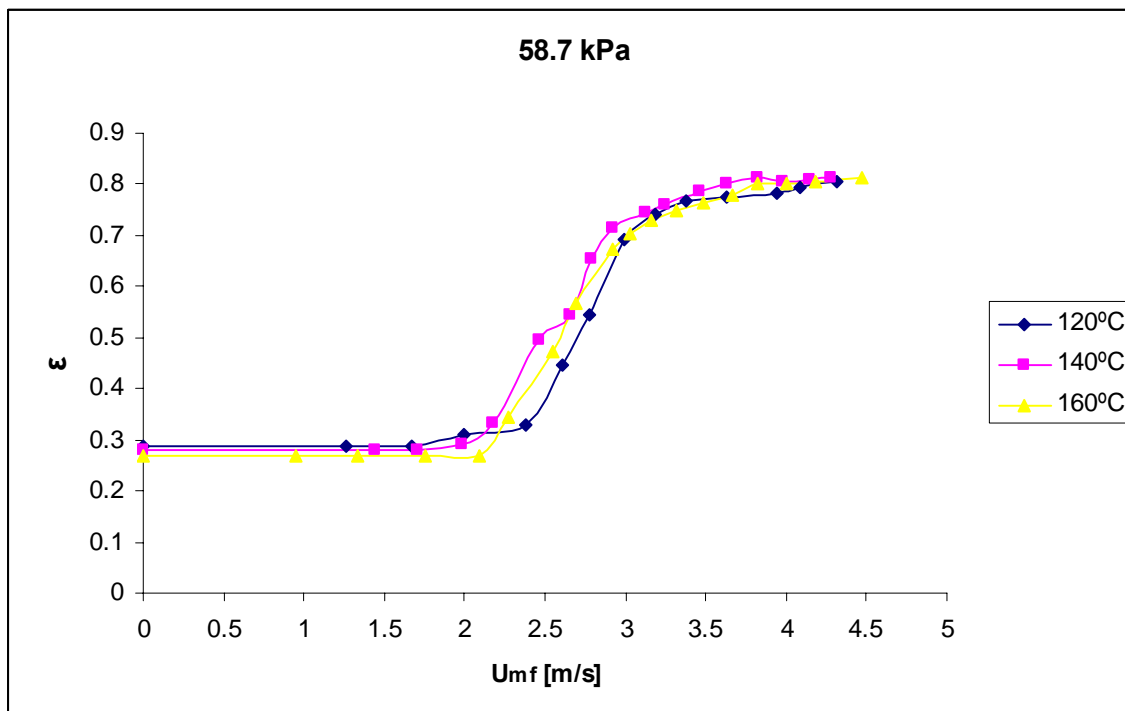


**FIGURA 5.6:** Relación entre la porosidad del lecho y la velocidad a 80 kPa





**FIGURA 5.7:** Relación entre la porosidad y la velocidad a 67kPa



**FIGURA 5.8:** Relación entre la porosidad y la velocidad a 58.7 kPa.

Las porosidades mínimas de fluidización son presentadas a continuación:

**Tabla 5.9** Efecto de la temperatura y presión del vapor sobrecalentado sobre la porosidad mínima de fluidización

	<b>120°C</b>	<b>140°C</b>	<b>160°C</b>
<b>80kPa</b>	0.302	0.3	0.31
<b>67kPa</b>	0.325	0.31	0.31
<b>59kPa</b>	0.31	0.291	0.345