

## CAPÍTULO 8

### REALIZACIÓN DE EXPERIMENTOS FLUIDINÁMICOS

En este capítulo se explicará la metodología de trabajo para las pruebas experimentales de fluidinámica correspondientes a este trabajo de investigación.

#### 8.1 Propiedades de la partícula a fluidizar

Este trabajo se ha centrado en estudio del comportamiento fluidinámico y de secado de una partícula, el arroz con cáscara. Para realizar ciertos cálculos con esta partícula se deben de conocer ciertas propiedades. Estas propiedades son tales como densidad ( $\rho$ ), esfericidad( $\phi$ ) y diámetro promedio de la partícula ( $d_p$ ). Para obtener cada una de las propiedades antes mencionadas se tuvo que realizar una serie de experimentos, los cuales serán detallados a continuación.

##### 8.1.1 Densidad de la partícula

Esta propiedad física relaciona la masa y el volumen de un objeto, en este caso nuestra partícula. Para poder obtener la densidad de nuestra partícula se utiliza el método en el cual se mide la masa de la partícula y se deposita en un volumen conocido, determinando la densidad conociendo cuanto es el volumen que dicha cantidad de masa desplaza. Para los experimentos, se utilizó una báscula para poder determinar la masa de ocho pruebas aleatorias de arroz con cáscara y se depositó cada muestra en una probeta graduada de 100 ml y se observó que volumen desplazaba. La densidad de la partícula

con la que se trabajo en estos experimentos fue el promedio de las ocho mediciones que se tomaron.

**Tabla 8.1** Muestras para la obtención de la densidad del arroz.

Densidad			
Muestra	Masa(g)	Volumen(ml)	$\rho(\text{kg/m}^3)$
1	7.106	6	1184.46
2	14.709	13	1131.5
3	11.564	10	1156.45
4	10.013	8.5	1178.09
5	11.082	9.5	1166.52
6	17.738	15	1182.54
7	5.819	4.5	1293.17
8	4.880	4.2	1162.07

$\rho_{\text{prom}} =$	<b>1181.85 (kg/m<sup>3</sup>)</b>
------------------------	-----------------------------------

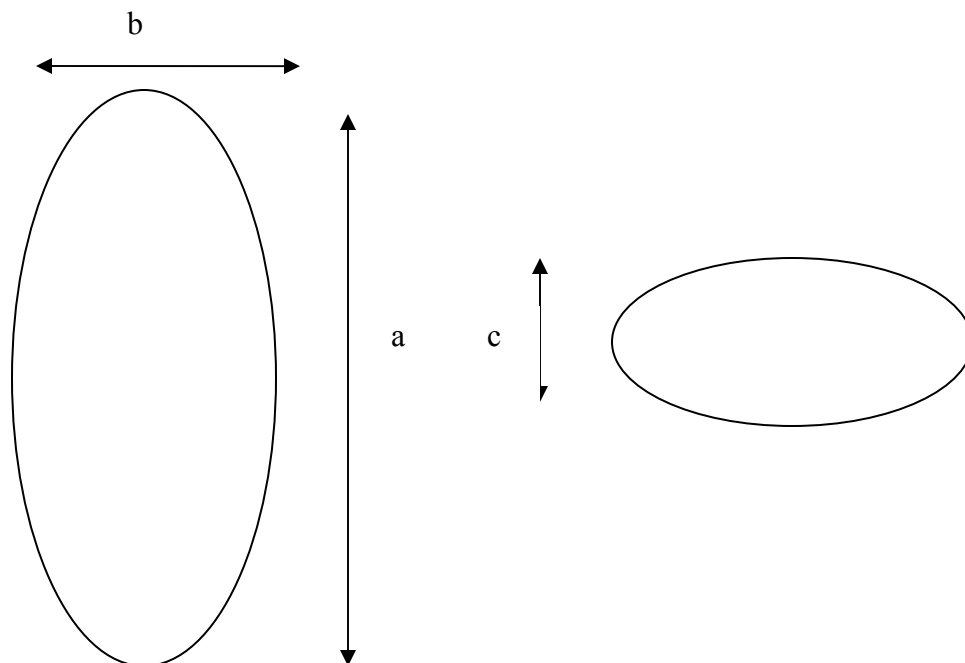
### 8.1.2 Esfericidad de la partícula

Para calcular la esfericidad de la partícula de arroz se miden el semieje mayor y menor de 20 muestras y se introdujeron dichos datos en la siguiente fórmula para calcular la esfericidad de una partícula elíptica [64]:

$$\phi = \frac{\sqrt{a \cdot b^2} \cdot 2^3}{a + \frac{b^2}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \left( \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} \right)} \quad (8.1)$$

Donde a es el semieje mayor y b es el semieje menor.

En la siguiente figura se muestran las dimensiones principales de una partícula:



**Figura 8.1** Dimensiones principales de la partícula

Para obtener la medida de dichos semiejes se utilizó un calibrador Vernier.

### **8.1.3 Diámetro Promedio de la partícula**

Para poder obtener el diámetro promedio de la partícula se toma cada una de las tres dimensiones de la partícula (a,b,c) como en la figura 8.1 y se realiza un promedio de estas dimensiones de cada una de las veinte muestras. La tabla 8.2 nos muestra los valores obtenidos de esfericidad y diámetro promedio:

**Tabla 8.2** Esfericidad y diámetro promedio.

Esfericidad						
Muestra	a(in)	b(in)	c(in)	$\phi$	d <sub>p</sub> (in)	d <sub>p</sub> (mm)
1	0.356	0.106	0.076	0.759	0.180	4.563
2	0.335	0.096	0.077	0.748	0.170	4.305
3	0.388	0.098	0.08	0.703	0.189	4.792
4	0.379	0.096	0.086	0.706	0.187	4.758
5	0.37	0.11	0.082	0.758	0.188	4.763
6	0.36	0.106	0.075	0.756	0.180	4.583
7	0.399	0.104	0.078	0.715	0.194	4.928
8	0.327	0.098	0.078	0.762	0.168	4.268
9	0.342	0.106	0.072	0.773	0.174	4.412
10	0.307	0.114	0.076	0.830	0.166	4.214
11	0.321	0.090	0.072	0.740	0.161	4.100
12	0.392	0.104	0.082	0.721	0.193	4.901
13	0.366	0.102	0.078	0.738	0.182	4.631
14	0.321	0.096	0.082	0.762	0.167	4.235
15	0.379	0.102	0.078	0.726	0.187	4.742
16	0.378	0.11	0.062	0.751	0.183	4.659
17	0.37	0.092	0.082	0.700	0.182	4.616
18	0.346	0.106	0.086	0.769	0.180	4.563
19	0.362	0.106	0.078	0.754	0.182	4.631
20	0.382	0.092	0.08	0.689	0.185	4.695
<b>Esfericidad</b>				0.743	<b>d<sub>p</sub>=</b>	4.568

Las mediciones se realizaron con un calibrador Vernier en pulgadas, pero al usarse en este proyecto de investigación unidades del SI, se convirtió el resultado final a milímetros.

## 8.2 Parámetros a Identificar en el equipo

Cuando se realizan los experimentos de fluidinámica existen dos series de datos que se deben registrar para posteriores cálculos, y son los datos de la placa de orificio y los datos de la columna.

En la placa de orificio se deben de registrar los valores de temperatura y presión, los cuales se toman del termómetro bimetalico y el manovacuómetro, que se encuentran

ahí instalados. La presión que se registra en la placa de orificio es la presión del vapor antes de pasar por el cambio de sección. Además de estos dos datos es necesario saber la caída de presión provocada por la placa de orificio, la cual se puede medir, con el manómetro en “U” de mercurio.

En la columna también se deben de registrar una serie de datos. Para empezar se debe de tomar la temperatura que existe dentro de la columna, para lo cual se utilizan los termopares que se encuentran instalados dentro de la columna y se saca el promedio. Hay que tener en cuenta que dichos termopares suelen descomponerse con cierta frecuencia. Estos termopares se conectan al pirómetro que es el que nos da las lecturas de las temperaturas correspondientes. Dentro de la columna se encuentra pegada con silicón térmico, una cinta métrica, la cual se utiliza para medir la altura del lecho, observando la altura máxima y mínima del mismo a través de las mirillas. Para tomar la presión que existe dentro de la columna de fluidización se toma la lectura de los tres manovacúómetros que se encuentran instalados en diferentes posiciones y así tengamos la certeza de que la presión que se tiene en la columna es con la que se quiere trabajar en los experimentos. La caída de presión en la columna se mide a través de un manómetro en “U” con tetracloruro de carbono ( $\text{CCL}_4$ ).

### **8.3 Condiciones iniciales para los experimentos fluidinámicos**

Antes de realizar los experimentos se debe de establecer las temperaturas y las presiones a las cuales se va a trabajar. Para este trabajo, se tomaron como referencia de presiones y temperaturas de trabajos de tesis anteriores. La tabla 8.3 muestra las condiciones de experimentación que se fijaron en este trabajo en comparación con otros

tesistas, y que aunque no trabajaron arroz con cáscara, se utilizan sus parámetros como referencia para establecer las condiciones a las que realizarán los experimentos.

**Tabla 8.3** Diversas condiciones para experimentos fluidinámicos para arroz con cáscara.

Este trabajo		Guarneros [37]		Martínez[64]	
Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)
120	80	112	80	120	80
140	80	136	80	140	80
160	80	154	80	160	80
120	67	112	67	120	67
140	67	136	67	140	67
160	67	154	67	160	67
120	53	112	53	120	59
140	53	136	53	140	59
160	53	154	53	160	59

Debemos de considerar también las constantes que existen dentro del equipo que son independientes a las diferentes condiciones de presión y temperatura con las que se trabajan en los experimentos. La tabla 8.4 muestra dichos valores.

**Tabla 8.4** Constantes requeridas para los experimentos fluidinámicos.

$D_{or, placa}[m]$	0.0165	$\rho_{Hg} [kg/m^3]$	13350
$A_{or, placa}[m^2]$	0.000214	$\rho_{CCL_4} [kg/m^3]$	1604
$D_{c_{ol}}[m]$	0.1082	$\rho_{H_2O} [kg/m^3]$	1000
$A_{c_{ol}}[m^2]$	0.00919	$\gamma_{vapor}$	1.33
$\beta$	0.65	$C_{d,or}$	0.814
$D_{or, dist}[m]$	0.00159	$C_c$	0.674
$N_{or, dist}[or/m^2]$	30017	$\tau[\mu]$	0.0015

Donde;

$D_{or. placa}$ , es el diámetro del orificio de la placa [m]

$A_{or. placa}$ , es el área del diámetro del orificio de la placa, [m<sup>2</sup>]

$D_{col}$ , es el diámetro de la columna, [m]

$A_{col}$ , es el area de la columna, [m<sup>2</sup>]

$\beta$ , es el coeficiente de orificio de la placa

$D_{or. dist}$ , es el diámetro del orificio del distribuidor, [m]

$N_{or. dist}$ , son el número de orificios que tiene el distribuidor por unidad de area, [Número /m<sup>2</sup>]

$\gamma$  **vapor**, es la relacion de calor específico

$C_{d,or}$ , es el coeficiente de arrastre en el orificio del distribuidor

$C_c$ , es el coeficiente de arrastre

En este trabajo, se realizaron 2 series de pruebas, una serie con la partícula seca y la otra con la partícula húmeda. Para determinar el porcentaje de humedad requerido se trazó la curva de humedad, base húmeda de la partícula, con la ecuación 5.1, poniendo 100 gr de partículas en 2 litros de agua. Con ello se determino que para que fueran válidas las pruebas húmedas se deberían de dejar humedeciendo las partículas 2 horas y media.

#### **8.4 Registro de datos de los experimentos fluidinámicos**

Existen dos tablas de registro en los experimentos fluidinámicos, los datos que se obtienen de las lecturas en la placa de orificio y los datos que se obtienen de las lecturas de la columna. Los datos se introducen en una hoja de cálculo, para que se puedan realizar los cálculos correspondientes con dichos datos y podamos conseguir los valores

que nos interesan. Para la realización de los experimentos fluidinámicos, se parte del flujo máximo, es decir con la válvula de aguja completamente abierta y se va disminuyendo (generalmente de 1 a 3 mm de mercurio por lectura) hasta que se logre un lecho estático. Antes de empezar cada experimento se introduce a la tabla inicial, los valores fijos que se requieren en el experimento, es decir la temperatura y presión deseados, y al final de cada experimento, es decir cuando se cierra completamente la válvula se toman las lecturas del manómetro de mercurio y el de tetracloruro, para que después se puedan considerar los errores iniciales, y también se ve el lecho estático. L

La tabla inicial de los experimentos de partícula húmeda también incluyen la humedad inicial y final de las partículas con las que se trabajaron. Para conseguir dicha humedad se tomaban muestras al principio y final de cada experimento, y se determinaba su humedad, dejándolas en el horno por 24 horas y haciendo los cálculos correspondientes. La tabla 8.5 nos indica como es que quedo la tabla inicial.

**Tabla 8.5** Tabla inicial.

<b>Lestatico(cm)</b>	9.5
<b>H<sub>1</sub> placa(cm)</b>	68.7
<b>H<sub>2</sub> placa(cm)</b>	68.6
<b>H<sub>1</sub> columna(cm)</b>	48.7
<b>H<sub>2</sub> columna(cm)</b>	35.9
<b>Temperatura(°C)</b>	160
<b>Presion(Pa)</b>	53000
<b>Humedad de entrada(%)</b>	0.2071572
<b>Humedad de salida(%)</b>	0.0453557

La tabla 8.6 muestra la tabla de ingreso de registro en la placa de orificio, esto es la tabla en la que se ingresaban los datos correspondientes a la placa. En ella se registra,



la presión, la temperatura, la presión manométrica o de vacío del flujo justo antes de pasar por la placa, así como las diferencias de altura ( $h_1$  y  $h_2$ ) registradas en el manómetro de mercurio. El factor de corrección que se aplica a nuestros cálculos en la placa de orificio por la lectura del mercurio es ( $R_{placa}$ ), pues se considera el error inicial que se tiene. En el manómetro de mercurio esta diferencia inicial era muy pequeña o nula. Esta  $R_{placa}$  se calcula restando las dos lecturas del manómetro de mercurio cuando todavía no se encuentra encendido el dispositivo.

**Tabla 8.6** Datos empleados para el cálculo de la velocidad de fluidización.

Placa						
Medición	T[°C]	$P_{man}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$P_{vacío}$ [cmHg]	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$R_{placa}$
1	157	0.03	0	71.6	65.5	0.1
2	157	0.02	0	71.5	65.6	0.1
3	158	0.01	0	71.4	65.7	0.1
4	158	0	1	71.2	65.9	0.1
5	157	0	2	70.9	66.2	0.1
6	158	0	4	70.8	66.3	0.1
7	160	0	8	70.5	66.6	0.1
8	161	0	11	70.2	66.8	0.1
9	163	0	10	70	67.1	0.1
10	165	0	11	69.9	67.2	0.1
11	164	0	14	69.6	67.5	0.1
12	163	0	16	69.4	67.8	0.1
13	162	0	16	69.1	68.2	0.1
14	162	0	20	69	68.3	0.1
15	160	0	21	68.8	68.5	0.1

Para los datos que se obtienen en la columna existe otra tabla, donde se ingresan los valores de la temperatura promedio, que se leen a través de los termopares, las lecturas del manómetro de tetracoloruro de carbono ( $CCl_4$ ), para poder determinar la caída de presión en la columna.

En esta tabla al igual que en la pasada existe un error en la lectura de las alturas, por lo que se tiene que aplicar un factor de corrección, que para el tetracoloruro de carbono

es mucho mayor al del mercurio, y varía para cada experimento. Nosotros observamos que es mejor tomar dicha lectura el final del experimento, cuando no pasa nada de vapor a la columna. Por último para conocer la altura en el lecho, se toma la altura máxima y la altura mínima de las alturas a las cuales fluidizan las partículas ( $L_{max}$  y  $L_{min}$ ) y se realiza un promedio. Esto se realiza, porque debido a la poca visibilidad que se tiene hacia dentro de la columna a través de las mirillas, sería muy calcular una altura del lecho con una medición. La tabla 8.7 muestra la forma en la que se organizan dichos datos para posteriores cálculos.

**Tabla 8.7** Ingreso de datos para la columna.

Columna								
Medición	T[°C]	$L_{min}$ [cm]	$L_{max}$ [cm]	$L_{prom}$ [cm]	$h1$ [cm]	$h2$ [cm]	Rcolumna	L estatico
1	157	27	37	32	42.5	42	12.8	9.5
2	157	26	36	31	42.8	41.8	12.8	9.5
3	158	26	36	31	43	41.5	12.8	9.5
4	158	25	35	30	43.5	41	12.8	9.5
5	157	25	33	29	44.2	40.6	12.8	9.5
6	158	24	32	28	44.4	40.2	12.8	9.5
7	160	24	30	27	45.2	38.9	12.8	9.5
8	161	25	30	27.5	45.8	39	12.8	9.5
9	163	25	30	27.5	45.8	38.6	12.8	9.5
10	165	24	30	27	46	38.4	12.8	9.5
11	164	20	26	23	46.5	38.2	12.8	9.5
12	163	19	22	20.5	46.7	38	12.8	9.5
13	162	15	20	17.5	47	37.5	12.8	9.5
14	162	12	15	13.5	47.2	37	12.8	9.5
15	160	9.5	10	9.75	48	36.5	12.8	9.5

### 8.5 Cálculos de los experimentos fluidinámicos

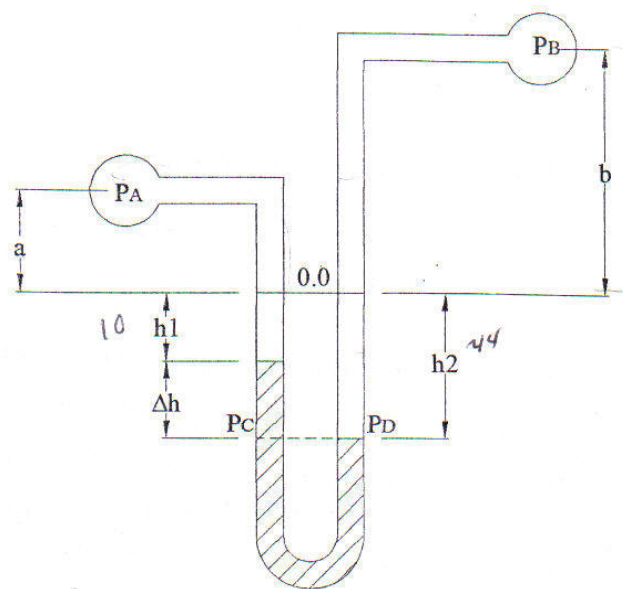
Después de que se obtuvieron y se registraron los datos tanto de la placa de orificio, como de la columna, se cuentan con otras tablas que realizan de manera

automática los cálculos que se necesitan hacer, para obtener los valores más importantes, la velocidad mínima de fluidización y la diferencia de presión en el lecho.

La tabla 8.8 trabaja con datos que se registraron en la tabla 8.6 de la placa de orificio. La temperatura es la misma que en dicha tabla; la presión absoluta es igual a la suma de la presión atmosférica y la manométrica o de vacío; las propiedades del vapor como el volumen específico ( $v$ ) y la viscosidad dinámica ( $\mu$ ) se obtienen del complemento de Excel llamado water97\_v13.xla [65] dando como valores de entrada la misma temperatura en grados Kelvin y la presión en bares;  $r_p$ , es la relación de presiones; la viscosidad cinemática( $\nu$ )se obtiene a partir de la ecuación 8.2 [64], sabiendo que el volumen específico es el inverso de la densidad:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (8.2)$$

Por último, la diferencia de presión en la placa  $\Delta P_{\text{placa}}$  se obtiene a partir del siguiente modelo de un manómetro en “U”:



**Figura 8.2** Modelo de un manómetro en U. [64]



La tabla 8.9 trabaja con datos que se registraron en la tabla 8.7 de la columna. La temperatura es la misma que en dicha tabla; la presión absoluta es la que se define antes de empezar con el experimento, ya sea de vacío o atmosférica; la diferencia de presión se calcula con la misma metodología que en el manómetro de mercurio pero con las densidades del tetracloruro de carbono ( $\text{CCl}_4$ ) y del agua; el volumen específico con el mismo complemento de Excel que la tabla pasada con los valores de la temperatura en Kelvin y la presión en bares; y la porosidad del lecho con la fórmula 3.1 que se reduce a:

$$\varepsilon = 1 - \frac{L_{est}}{L} \quad (8.7)$$

Este valor de porosidad se utiliza únicamente para cálculos de la tabla, ya que posteriormente se utilizará la velocidad mínima de fluidización, para conocer el valor de  $\varepsilon_{mf}$ . Dichos valores se estudiarán en el capítulo de análisis de resultados.

**Tabla 8.9** Estructura para los cálculos en la columna.

Columna					
Medición	T[°C]	P <sub>abs</sub> [Pa]	$\Delta P_{columna}$ [Pa]	$v$ [m <sup>3</sup> /kg]	$\varepsilon$
1	157	53000	1935.43	3.731	0.703
2	157	53000	1856.75	3.731	0.693
3	158	53000	1778.08	3.739	0.693
4	158	53000	1620.72	3.739	0.683
5	157	53000	1447.64	3.731	0.672
6	158	53000	1353.23	3.739	0.660
7	160	53000	1022.79	3.757	0.648
8	161	53000	944.11	3.765	0.654
9	163	53000	881.17	3.783	0.654
10	165	53000	818.23	3.801	0.648
11	164	53000	708.08	3.792	0.586
12	163	53000	645.14	3.783	0.536
13	162	53000	519.26	3.774	0.457
14	162	53000	409.11	3.774	0.296
15	160	53000	204.55	3.757	0.025

## 8.6 Resultados de los experimentos fluidinámicos

Después de que se introducen los datos en las tablas 8.5, 8.6 y 8.7, y se transfieren automáticamente a la tablas 8.8 y 8.9, se pueden realizar los cálculos necesarios para determinar los valores como las velocidades de fluidización y la caída de presión en el lecho  $\Delta P$ . La tabla 8.10 muestra la estructura para los resultados fluidinámicos. Todas las tablas relacionadas con los experimentos fluidinámicos se encuentran en el apéndice B que incluyen todas las mediciones obtenidas en los experimentos.

**Tabla 8.10** Estructura para los resultados de las pruebas fluidinámicas

Resultados								
Medición	$C_D$	$Y$	$m[\text{kg/s}]$	$Q[\text{m}^3/\text{s}]$	$u[\text{m/s}]$	$\Delta P_{\text{dist}}[\text{Pa}]$	$\Delta P_{\text{lecho}}[\text{Pa}]$	$Re$
1	0.626	0.968	0.01016	0.02416	4.12	968.897	966.53	54204.15
2	0.626	0.969	0.00993	0.02392	4.03	927.086	929.67	53020.02
3	0.627	0.970	0.00970	0.02370	3.94	885.977	892.10	51627.94
4	0.627	0.971	0.00923	0.02321	3.75	801.883	818.84	49113.06
5	0.627	0.974	0.00865	0.02207	3.51	702.138	745.50	46134.54
6	0.628	0.974	0.00772	0.02047	3.14	561.358	791.87	41087.17
7	0.628	0.976	0.00744	0.02134	3.04	523.356	499.43	39358.68
8	0.629	0.978	0.00674	0.02058	2.76	430.622	513.49	35559.58
9	0.629	0.981	0.00628	0.01889	2.58	376.242	504.93	32984.64
10	0.630	0.982	0.00599	0.01846	2.47	343.392	474.83	31269.56
11	0.631	0.985	0.00512	0.01678	2.11	250.333	457.75	26797.84
12	0.632	0.988	0.00427	0.01461	1.76	174.1323	471.01	22434.33
13	0.635	0.994	0.00322	0.01098	1.32	98.535	420.72	16941.11
14	0.636	0.995	0.00267	0.01001	1.09	67.688	341.42	14038.89
15	0.643	0.998	0.00154	0.0059	0.63	22.592	181.96	8173.23

La primer fórmula que se consideró de esta tabla es la que se utiliza para obtener  $Y$ :

$$Y = 1 - \frac{(0.41 + 0.35\beta^4)(1 - r)}{\gamma} \quad (8.8)$$

Para empezar a desglosar esta tabla, se debe de tener en consideración que para conseguir los valores de  $Q$ ,  $Re$  y  $C_d$ , se debe de iterar con sus tres ecuaciones correspondientes, empezando con un valor de  $C_d$  de 0.67. Estas ecuaciones se consiguieron de los cálculos que realizó Patiño, [11] para el diseño de la columna. Las ecuaciones son las siguientes:

$$Q = C_d Y A_{or,placa} \sqrt{2v\Delta P_{placa}} \quad (8.9)$$

Donde  $v$  es el volumen específico [ $m^3/kg$ ].

$$Re = \frac{4Q}{\pi D_o v} \quad (8.10)$$

Se programó en Excel, para que automáticamente se hicieran 10 iteraciones para cada valor, y por cada hoja de cálculo, se podían calcular 15 datos, es por eso que las tablas de experimentos fluidinámicos cuentan con 15 datos como máximo.

Con el gasto se puede conocer el flujo másico, y la velocidad de fluidización se puede calcular con la siguiente formula:

$$u = \frac{Q_{placa} \cdot u_{columna}}{u_{placa} \cdot A_{columna}} \quad (8.11)$$

Finalmente para la diferencia de presión en el lecho ( $\Delta P_{lecho}$ ) se obtiene restándole a la diferencia de presión de la columna ( $\Delta P_{columna}$ ), la del ( $\Delta P_{distribuidor}$ ), la cual se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\Delta P_D = \frac{\rho}{2} \left( \frac{4u}{C_{d,or} \pi d_{or}^2 N_{or}} \right)^2 \quad (8.12)$$