

CAPÍTULO 10

ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1 Fluidinámica del arroz con cáscara

Los experimentos de fluidinámica resultaron de muy alta complejidad, ya que los valores que arroja el manómetro de tetracloruro (CCl_4) para la diferencia de presión en la columna tienen un margen de error considerable, pues las diferencias de altura que se reportan en el manómetro de CCl_4 al principio y al final de la prueba no compaginan, y además la sensibilidad y comportamiento del CCl_4 en el manómetro es irregular, por lo tanto resultó difícil elaborar las gráficas de velocidad de fluidización contra la diferencia de caída de presión en el lecho. Por lo irregular de las gráficas, y falta de un mecanismo en las hojas de cálculo que nos permita analizar las gráficas adecuadamente, es sumamente complicado y poco certero el encontrar la velocidad mínima de fluidización. Estos problemas ya se habían detectado con tesis anteriores [64]. Se trató de mejorar esta situación cambiando la válvula de globo existente por una de aguja, y se mejoró en el aspecto de que es muy precisa, y se puede reducir el flujo de vapor muy suavemente, pero aun así la lectura del manómetro de tetracloruro de carbono es muy imprecisa. La metodología que se utiliza en Excel (como regresión lineal) también resulta muy inexacta, ya que al fin y al cabo se decide arbitrariamente el punto de velocidad de fluidización mínima, con la pendiente $m=0$. Es necesario analizar estos problemas y darles una solución antes de intentar próximas experimentaciones, para que las mismas sean certeras y confiables.

El arroz con cáscara es una partícula difícil de fluidizar, y ambos tipos de experimentos (fluidinámicos y de secado), se tenía que darles pequeños golpes a la columna para que las partículas fluidizara, principalmente, cuando la partícula se encuentra húmeda o la velocidad del vapor es pequeña. Las pruebas de fluidinámica con la partícula húmeda también tienen que ser revisadas, ya que la humedad a lo largo de la prueba no permanece constante, y el tiempo a la hora de tomar las lecturas no son fijas, por lo que no se tiene un criterio similar, para determinar una velocidad de fluidización real para un tipo de partículas con una humedad determinada, es decir el contenido de humedad a la velocidad mínima de fluidización para cada prueba es muy diferente. Las figuras 10.1 y 10.2 muestran gráficas generadas para los diversos experimentos fluidinámicos. Estas gráficas se encuentran en el apéndice A de este trabajo. La figura 10.1 es en la que se grafica la caída de presión en el lecho en función de la velocidad del vapor sobrecalentado. Se cuenta con una gráfica de este tipo para cada uno de los experimentos fluidinámicos. Estas gráficas se dibujan con los datos que se generan de las tablas explicadas en el capítulo 8. Para poder determinar la velocidad mínima de fluidización, se deben de trazar dos líneas, una con pendiente mayor a cero y la otra con pendiente igual a 0. Para la primera línea se realiza una regresión lineal con el comando “linest” de Excel, de los datos que forman parte del lecho fijo, es decir cuando la caída de presión en el lecho no es constante y se hace creciente. Con este comando se puede obtener la ecuación de la recta que corresponde a la regresión, y también arroja un factor de correlación R, el cual es de utilidad para saber el grado de confiabilidad que tiene nuestra regresión. La segunda recta es una predicción visual por donde debía de estar, ésta considerando los valores obtenidos que forman parte de del lecho fluidizado [64]. La

figura 10.2 nos muestra la gráfica que muestra cómo varía la altura del lecho en función de la velocidad de fluidización. Para obtener esta gráfica, también existe el problema de que la visibilidad hacia el lecho es muy reducida, debido a que las mirillas son muy pequeñas. Para obtener la velocidad mínima de fluidización con esta gráfica también resulta muy difícil, por lo que sólo se puede establecer un rango de velocidades en las que la velocidad mínima de fluidización puede suceder.

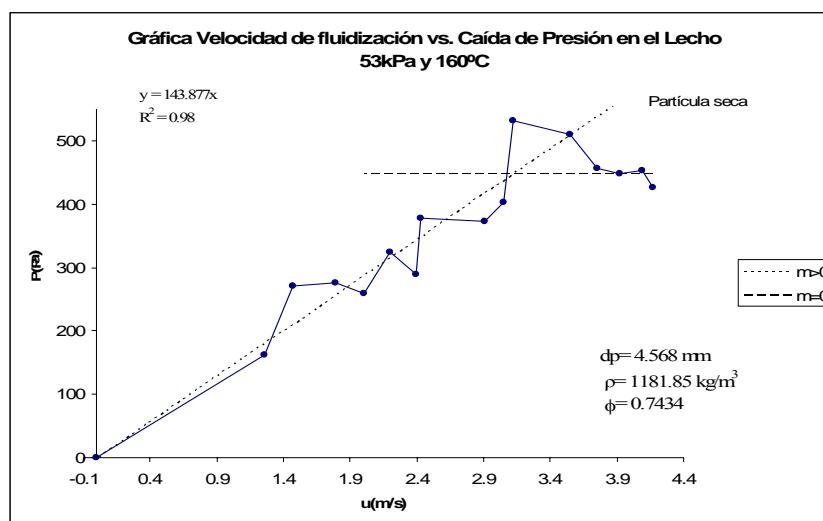


Figura 10.1 Gráfica de velocidad de fluidización vs. Caída de Presión en el lecho

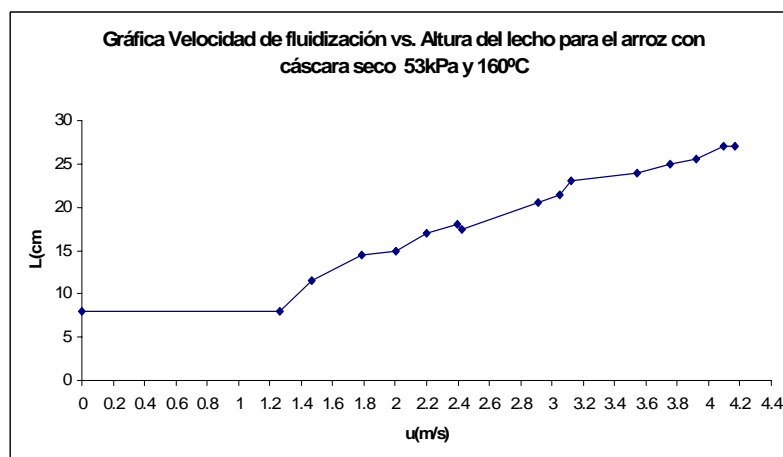


Figura 10.2 Gráfica de velocidad de fluidización vs. Altura del lecho para el arroz con cáscara

Tabla 10.1 Valores Teóricos de diferentes autores para determinar la velocidad mínima de fluidización del arroz con cáscara.

Temp[°C]	Presión[Pa]	ρ [kg/m ³]	μ [N*s/m ²]	Ar	λ [m]	Kn_p	Ergun[66]		Geldart[52]		Wen&Yu[67]		Kozanoglu[8]	
							Re_p	U_{mf}	Re_p	U_{mf}	Re_p	U_{mf}	Re_p	U_{mf}
90	67000	0.4044	1.19E-05	3.14E+06	9.08E-08	1.99E-05	594.7532	3.84	325.81	2.10	325.71	2.10	365.55	2.36
90	53000	0.3191	1.19E-05	2.47E+06	1.15E-07	2.52E-05	526.3237	4.31	285.69	2.34	285.61	2.34	319.97	2.62
90	40000	0.2403	1.20E-05	1.86E+06	1.53E-07	3.35E-05	454.5825	4.95	243.70	2.65	243.62	2.65	272.27	2.97
100	67000	0.3930	1.23E-05	2.87E+06	9.50E-08	2.08E-05	568.2889	3.89	310.29	2.13	310.19	2.12	347.91	2.38
100	53000	0.3102	1.23E-05	2.26E+06	1.20E-07	2.63E-05	503.002	4.37	272.03	2.36	271.95	2.36	304.45	2.64
100	40000	0.2336	1.23E-05	1.70E+06	1.60E-07	3.50E-05	434.4917	5.02	231.95	2.68	231.88	2.68	258.93	2.99
110	67000	0.3822	1.27E-05	2.63E+06	9.92E-08	2.17E-05	543.5055	3.94	295.76	2.15	295.67	2.15	331.40	2.40
110	53000	0.3018	1.27E-05	2.07E+06	1.26E-07	2.75E-05	481.1309	4.42	259.23	2.38	259.15	2.38	289.90	2.67
110	40000	0.2274	1.27E-05	1.56E+06	1.67E-07	3.65E-05	415.6276	5.08	220.93	2.70	220.86	2.70	246.42	3.01
120	80000	0.4450	1.30E-05	2.89E+06	8.66E-08	1.90E-05	570.5204	3.66	311.60	2.00	311.50	2.00	349.40	2.24
120	67000	0.3721	1.30E-05	2.42E+06	1.04E-07	2.27E-05	520.2711	3.99	282.15	2.17	282.06	2.16	315.93	2.42
120	53000	0.2939	1.31E-05	1.91E+06	1.31E-07	2.87E-05	460.6048	4.48	247.22	2.40	247.14	2.40	276.26	2.69
140	80000	0.4227	1.38E-05	2.45E+06	9.41E-08	2.06E-05	524.0822	3.75	284.38	2.03	284.29	2.03	318.47	2.28
140	67000	0.3536	1.38E-05	2.05E+06	1.12E-07	2.46E-05	477.9907	4.09	257.39	2.20	257.31	2.20	287.81	2.46
140	53000	0.2793	1.38E-05	1.62E+06	1.42E-07	3.12E-05	423.2069	4.58	225.36	2.44	225.29	2.44	251.44	2.72
160	80000	0.4026	1.46E-05	2.09E+06	1.02E-07	2.23E-05	483.0901	3.83	260.38	2.07	260.30	2.06	291.20	2.31
160	67000	0.3368	1.46E-05	1.75E+06	1.22E-07	2.66E-05	440.6256	4.18	235.54	2.23	235.46	2.23	262.99	2.49
160	53000	0.2662	1.46E-05	1.38E+06	1.54E-07	3.37E-05	390.1163	4.68	206.04	2.47	205.97	2.47	229.52	2.76

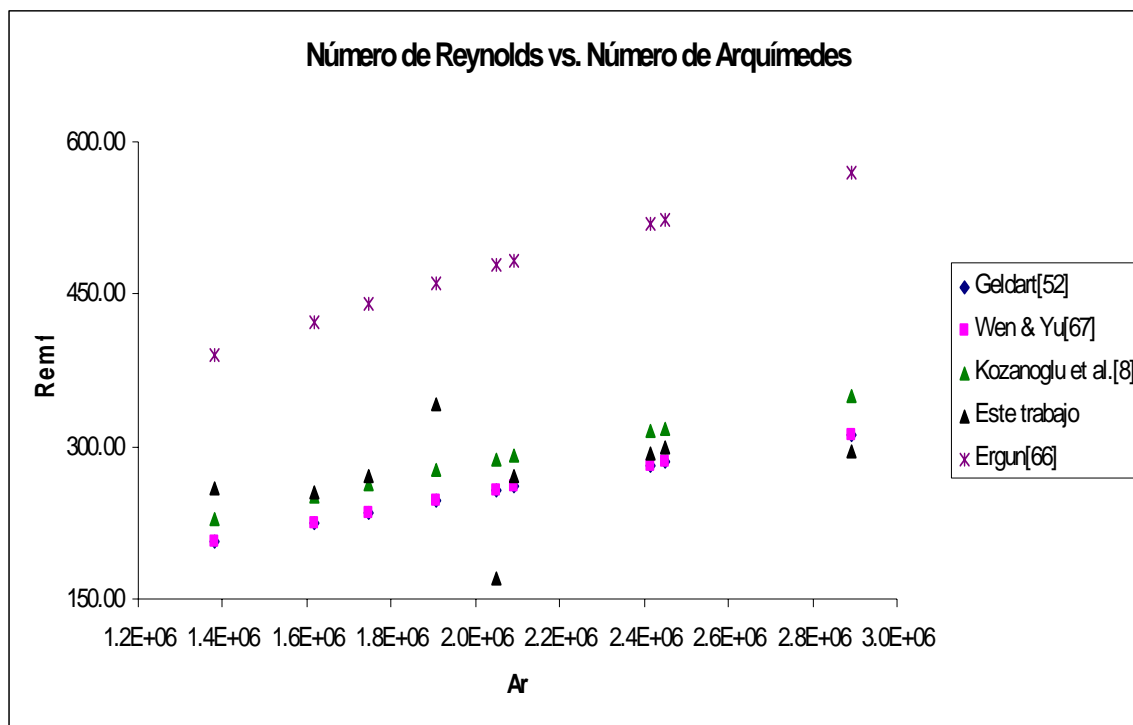


Figura 10.3 Comparación del número de Reynolds de distintos autores para arroz con cáscara a distintas presiones y temperaturas para los experimentos fluidinámicos.

En la tabla 10.1 se muestran las velocidades de fluidización teóricas obtenidas por varios autores y las cuales servirán como referencias y como puntos de comparación para velocidades mínimas de fluidización obtenidas durante la experimentación de este trabajo. Para obtener estos datos se utilizaron las siguientes fórmulas:

El número de Reynolds [8]:

$$Re_{mf} = \frac{u_{mf} \rho_g d_p}{\mu_g} \quad (10.1)$$

El número de Arquímedes [8]:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (10.2)$$

El número de Knudsen [8]:

$$Kn_p = \frac{\lambda}{d_p} \quad (10.3)$$

Camino libre de partículas [7]:

$$\lambda = \mu_g \left(\frac{3.14}{2.0 \rho_g P_o} \right)^{0.5} \quad (10.4)$$

Con estas fórmulas fue posible calcular las velocidades mínimas de fluidización teóricas de varios autores a través del número de Reynolds:

Wen y Yu [67]:

$$Re_{mf} = \left[(33.7)^2 + 0.0408 Ar \right]^{1/2} - 33.7 \quad (10.5)$$

Kozanoglu et al., Para partículas afiladas ($0.5 < \phi \leq 0.8$), [8]:

$$Re_{mf} = \left[\left(\frac{1.507}{Kn_p + 0.0340} \right)^2 + 0.0529 Ar \right]^{1/2} - \frac{1.507}{(Kn_p + 0.0340)} \quad (10.6)$$

Ergun [66]:

$$1.75 \frac{Re_{mf}^2}{\phi \cdot \epsilon_{mf}^3} + 150 \left(\frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi^2 \cdot \epsilon_{mf}^3} \right) Re_{mf} = Ar \quad (10.7)$$

Geldart[52]:

$$24.5 Re_{mf}^2 + 1650 Re_{mf} = Ar \quad (10.8)$$

Donde,

ϕ , es la esfericidad de la partícula

Ar , es el número de Arquímedes

ϵ_{mf} , es porosidad del lecho a mínima fluidización

La tabla 10.2 muestra las velocidades de fluidización mínima obtenidas experimentalmente, los valores teóricos, así como las condiciones a las que se consiguieron.

Tabla 10.2 Estimación experimental y teórica de la velocidad mínima de fluidización en un lecho de arroz empleando vapor sobrecalentado.

Temperatura [°C]	Presión [Pa]	U_{mf} partícula húmeda[m/s]	$U_{mf,p}$ partícula seca[m/s]	% de diferencia
120	80000	2.01	1.89	5.97%
120	67000	2.32	2.25	3.02%
120	53000	3.26	3.33	-2.15%
140	80000	1.96	2.14	-9.18%
140	67000	2.33	2.39	-2.58%
140	53000	3.31	2.76	16.62%
160	80000	1.83	2.15	-17.49%
160	67000	2.59	2.57	0.77%
160	53000	3.59	3.12	13.09%

Como se puede observar en la tabla 10.2, los datos de las pruebas secas y las pruebas húmedas (C_0 de aprox. 0.18) son muy similares, y en promedio, los experimentos con las partículas húmedas reportaron una velocidad de fluidización un 0.90% mayor a las velocidades mínimas de fluidización de los experimentos con partículas secas. Para poder comparar las velocidades mínimas de fluidización obtenidas en este trabajo de investigación, se obtuvo una diferencia porcentual, entre las velocidades mínimas de fluidización de los experimentos con partículas secas y con partículas húmedas y las velocidades mínimas de fluidización calculadas con las ecuaciones correspondientes, de investigaciones realizadas por otros autores.

Tabla 10.3 Comparación porcentual de las velocidades mínimas de fluidización de los experimentos con partícula seca y las calculadas con ecuaciones de otros autores.

Ergun [66]	Geldart[52]	Wen&Yu[67]	Kozanoglu[8]
-93.57%	-5.72%	-5.69%	-18.55%
-77.45%	3.77%	3.80%	-7.75%
-34.50%	27.81%	27.83%	19.33%
-75.09%	4.99%	5.02%	-6.39%
-71.03%	7.90%	7.93%	-2.98%
-66.07%	11.57%	11.60%	1.33%
-78.21%	3.95%	3.98%	-7.42%
-62.59%	13.09%	13.11%	2.95%
-50.12%	20.71%	20.74%	11.68%

Observando la tabla 10.3 podemos concluir, que las velocidades mínimas de fluidización obtenidas en la experimentación con partícula seca coinciden en mayor proporción con las velocidades mínimas de fluidización calculadas con la ecuación de Kozanoglu[8], ya que en promedio las velocidades que se obtuvieron en este trabajo de investigación son sólo un 0.85% menores a las comentadas anteriormente. En comparación con las velocidades mínimas de fluidización calculadas con las ecuaciones

de Geldart[52] las velocidades que se obtuvieron en este trabajo de investigación son un 9.78% mayores. En comparación con las velocidades mínimas de fluidización calculadas con las ecuaciones de Wen & Yu[67], las velocidades que se obtuvieron en este trabajo de investigación son un 9.81% mayores, y finalmente comparando con las velocidades mínimas de fluidización calculadas con las ecuaciones de Ergun[52], las velocidades que se obtuvieron en este trabajo de investigación son un 67.63% menores.

Tabla 10.4 Comparación porcentual de las velocidades mínimas de fluidización de los experimentos con partícula húmeda y las calculadas con ecuaciones de otros autores.

Ergun [66]	Geldart[52]	Wen&Yu[67]	Kozanoglu[8]
-108.82%	-14.67%	-14.63%	-18.55%
-91.46%	-4.44%	-4.41%	-7.75%
-45.15%	21.57%	21.60%	19.33%
-88.91%	-3.11%	-3.08%	-6.39%
-84.56%	-0.02%	0.01%	-2.98%
-79.25%	3.86%	3.89%	1.33%
-92.30%	-4.31%	-4.27%	-7.42%
-75.48%	5.55%	5.58%	2.95%
-62.07%	13.74%	13.77%	11.68%

Observando la tabla 10.4 podemos concluir, que las velocidades mínimas de fluidización obtenidas en la experimentación con partícula húmeda coinciden en mayor proporción con las velocidades mínimas de fluidización calculadas con la ecuación de Kozanoglu[8], ya que en promedio las velocidades que se obtuvieron en este trabajo de investigación son sólo un 0.87% menores a las comentadas anteriormente. En comparación con las velocidades mínimas de fluidización calculadas con las ecuaciones de Geldart[52] las velocidades que se obtuvieron en este trabajo de investigación son un 2.02% mayores. En comparación con las velocidades mínimas de fluidización calculadas

con las ecuaciones de Wen & Yu[67], las velocidades que se obtuvieron en este trabajo de investigación son un 2.05% mayores, y finalmente comparando con las velocidades mínimas de fluidización calculadas con las ecuaciones de Ergun[52], las velocidades que se obtuvieron en este trabajo de investigación son un 80.89% menores.

La obtención experimental de la magnitud de la velocidad mínima de fluidización, teniendo la seguridad de que realmente se refleja lo que sucede en la columna de fluidización, es difícil de conseguir, ya que en muchas ocasiones la gráfica no tiene una tendencia clara, debido a la mala lectura del manómetro de tetracloruro, que a su vez puede verse afectado por el flujo irregular del vapor. En trabajos anteriores [11, 64], se ha reportado la poca sensibilidad que tiene el manómetro de tetracloruro con partículas pequeñas a fluidizar, y esto se hizo muy notorio en este trabajo, ya que no se presentaba una variación significativa en las lecturas, lo que hace muy difícil, tratar de calcular el valor real experimental de la velocidad mínima de fluidización.

10.1.1 Predicción de la velocidad mínima de fluidización

Como se ha venido haciendo en trabajos anteriores, se ha desarrollado una ecuación basada en el número de Reynolds y Arquímedes que nos puede predecir, según el comportamiento y resultados de nuestros experimentos, la velocidad mínima de fluidización, para diferentes condiciones.

A continuación se muestran los valores de Reynolds y Arquímedes que resultaron de nuestros experimentos y que serán los que tomaremos como base para realizar nuestra predicción:

Tabla 10.5 Valores del número de Reynolds y Arquímedes.

Temperatura [°C]	Presión [Pa]	Ar partícula húmeda	Ar partícula seca	Re _p partícula húmeda	Re _p partícula seca
120	80000	3.36E+06	2.89E+06	313.44	294.73
120	67000	2.80E+06	2.42E+06	302.32	293.20
120	53000	2.21E+06	1.91E+06	335.25	342.45
140	80000	2.84E+06	2.45E+06	274.15	299.33
140	67000	2.38E+06	2.05E+06	272.47	279.48
140	53000	1.87E+06	1.62E+06	305.62	254.83
160	80000	2.43E+06	2.09E+06	230.73	271.08
160	67000	2.03E+06	1.75E+06	273.11	271.00
160	53000	1.60E+06	1.38E+06	299.01	259.86

Con estos valores, se traza una gráfica y con la función linest de Excel se puede hacer una regresión lineal, y obtener la ecuación de la misma, que es la que nos sirve para predecir las velocidades mínimas de fluidización, teniendo como base el comportamiento obtenido en las experimentaciones de este trabajo. Las figuras 10.4 y 10.5 muestran las gráficas y sus ecuaciones correspondientes.

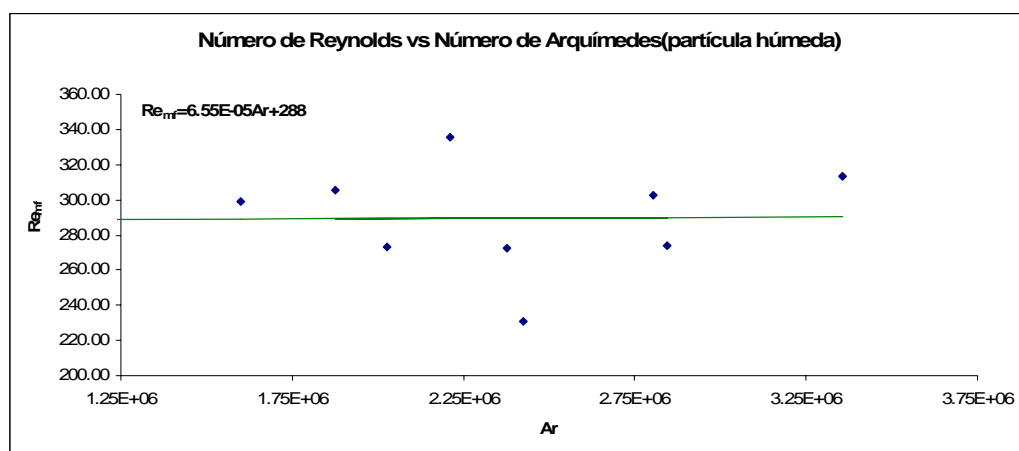


Figura 10.4 Evaluación del número de Reynolds del arroz con cáscara (partícula húmeda) en condiciones de fluidización incipiente contra el número de Arquímedes.

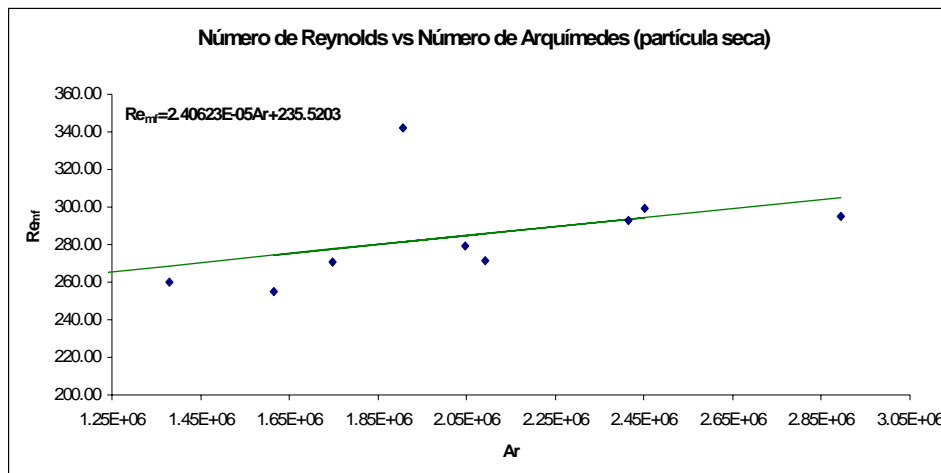


Figura 10.5 Evaluación del número de Reynolds del arroz con cáscara (partícula seca) en condiciones de fluidización incipiente contra el número de Arquímedes.

Ecuación para partículas secas:

$$Re_{mf} = 2.40623 \text{ E-}05 + 235.5203 \quad (10.9)$$

Ecuación para partículas húmedas:

$$Re_{mf} = 6.55 \text{ E-}05 + 2.88 \quad (10.10)$$

10.1.1.1 Comparación De ecuaciones para la Predicción de Re_{mf}

Se han realizados trabajos anteriormente en el lecho fluidizado, y el más parecido al realizado en este trabajo es el realizado por Martínez [64], que también incluye una ecuación para la predicción de la velocidad mínima de fluidización. Hay que tomar en cuenta que las condiciones de operación varían un poco, y las partículas son también diferentes, ya que en este trabajo de investigación se utilizó arroz con cáscara y él utilizó

con arroz sin cáscara y estas partículas fluidizan de distinta manera. En la figura 10.6 se muestra la comparación de dichas ecuaciones.

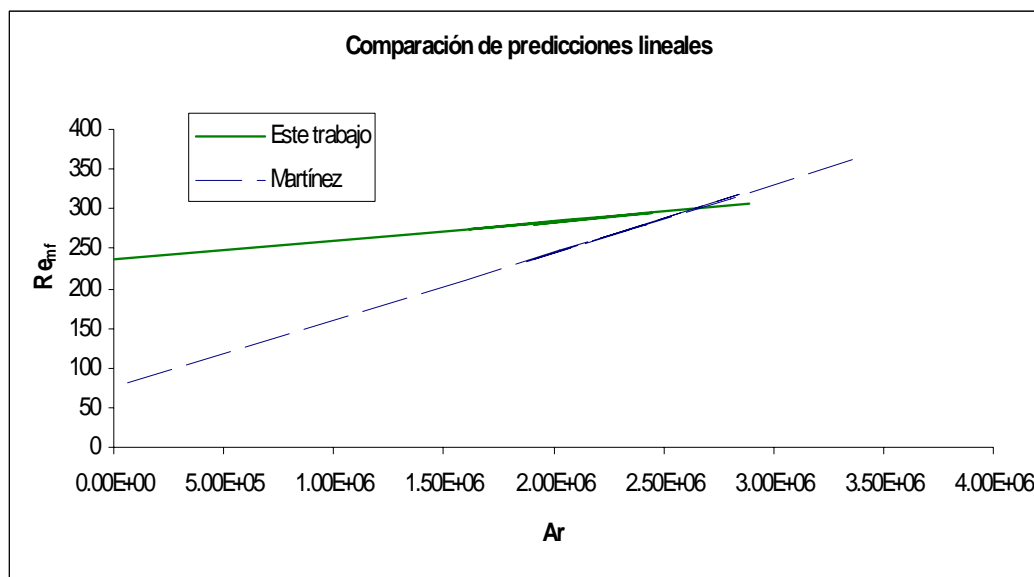


Figura 10.6 Comparación de ecuaciones entre este trabajo (partícula seca) y el trabajo de Martínez. [64]

Como se puede observar existe una diferencia significativa en las gráficas, lo que nos indica, que las diferencias en las propiedades de las partículas afecta la velocidad mínima de fluidización

10.1.2 Comportamiento de la velocidad mínima de fluidización

Para analizar el comportamiento de la velocidad mínima de fluidización se traza una gráfica de la velocidad mínima de fluidización en función de la presión, las figuras 10.7 y 10.8 nos muestran dichas gráficas.

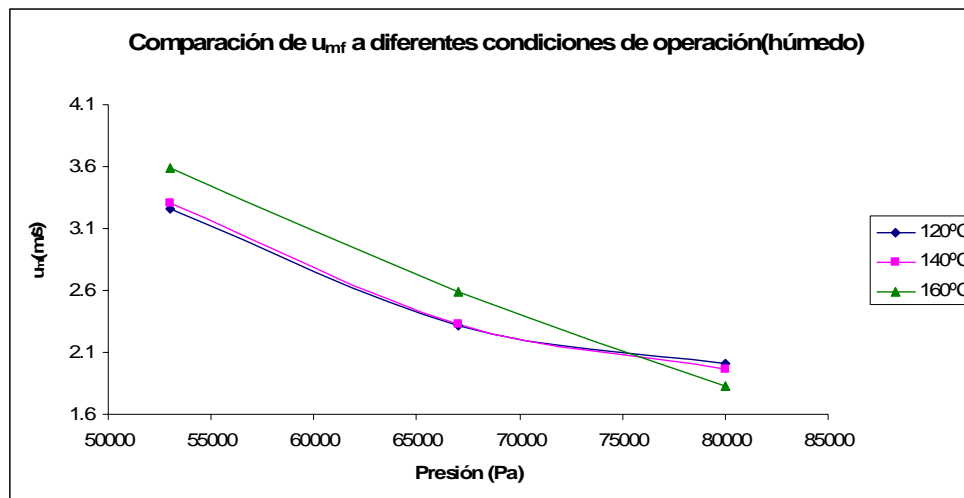


Figura 10.7 Valores de u_{mf} como función de la presión de operación del arroz con cáscara (partícula húmeda).

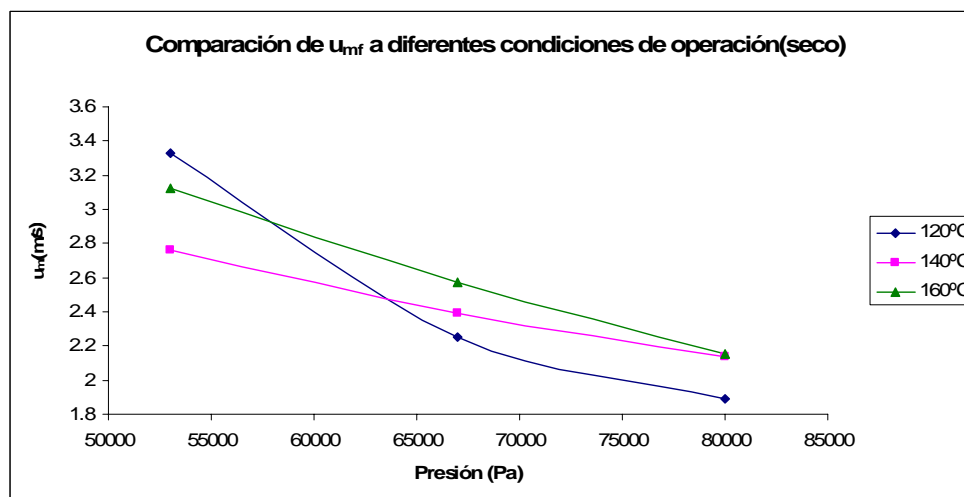


Figura 10.8 Valores de u_{mf} como función de la presión de operación del arroz con cáscara (partícula seca).

Se puede observar en estos resultados que se muestra dependencia al disminuir la presión de operación, y aumenta la velocidad mínima de fluidización, y existe una menor dependencia de la temperatura, y al aumentar esta, aumenta poco la velocidad mínima de

fluidización. Esto también se puede apreciar en las gráficas 10.9 y 10.10. Estas dos observaciones, también fueron reportadas por Martínez. [64]

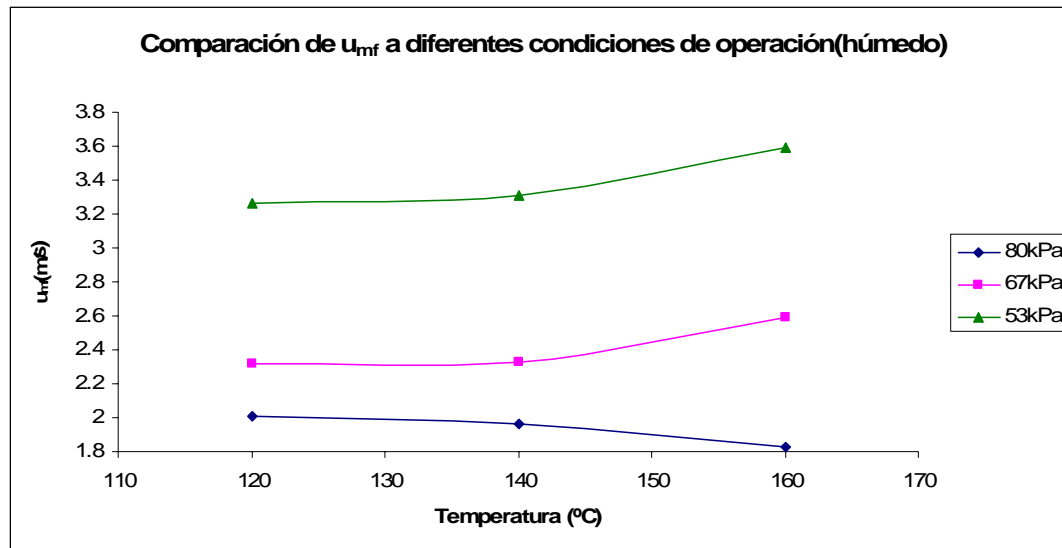


Figura 10.9 Valores de u_{mf} como función de la temperatura de operación del arroz con cáscara (partícula húmeda).

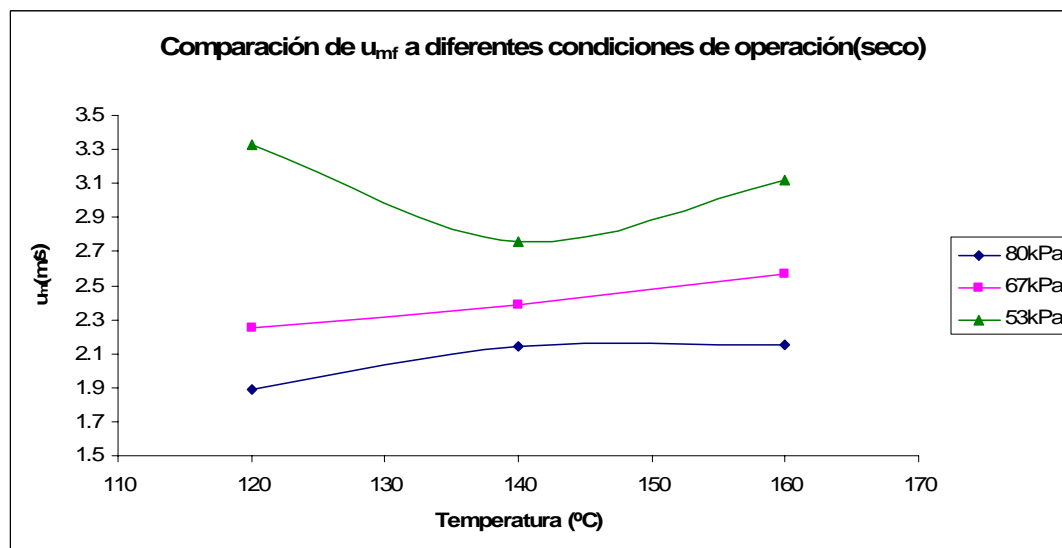


Figura 10.10 Valores de u_{mf} como función de la temperatura de operación del arroz con cáscara (partícula seca).

Estadísticamente, podremos comparar estas dos tendencias diciendo, que en los experimentos de partícula húmeda, el efecto de la presión es significativo, ya que a una presión operacional de 80 kPa, la velocidad mínima de fluidización es en promedio, un 42.91% menor que a una presión operacional de 53 kPa.

En los experimentos con partículas secas, se observa este mismo comportamiento, ya que a una presión operacional de 80 kPa, la velocidad mínima de fluidización es en promedio, un 32.9% menor que a una presión operacional de 53 kPa.

El efecto de la temperatura operacional, no es tan significativo y estadísticamente en los experimentos con partículas húmedas se obtuvo, que a una temperatura operacional de 120°C, la velocidad mínima de fluidización es en promedio, sólo un 5.24% menor que a una temperatura operacional de 160°C.

En los experimentos con partículas secas, se observa este mismo comportamiento, ya que a una temperatura operacional de 120°C, la velocidad mínima de fluidización es en promedio, sólo un 4.72% menor que a una temperatura operacional de 160°C.

10.1.3 Evaluación de ϵ_{mf}

Aquí se presenta una tabla con las porosidades del lecho en las condiciones de fluidización mínima de la partícula seca y partícula húmeda, y hasta abajo se pone el promedio de las cada una.

Tabla 10.6 Valores experimentales de ϵ_{mf} .

Presión[kPa]	Temperatura[°C]	secas	húmedas
80	120	0.491	0.665
80	140	0.534	0.573
80	160	0.616	0.528
67	120	0.489	0.598
67	140	0.636	0.678
67	160	0.638	0.652
53	120	0.661	0.682
53	140	0.652	0.728
53	160	0.652	0.679
promedio		0.597	0.643

10.2 Secado del Arroz

La segunda parte de experimentos correspondió a los experimentos de secado. Estos experimentos son muy diferentes a los de fluidinámica. En este tipo de pruebas, primero se establecen condiciones de temperatura y presión para la columna y después se procede a ingresar las partículas, las cuales permanecen 1 hora en la columna, tiempo en el cual se secan. Mientras esto sucede, se van tomando muestras que nos permiten conocer la humedad en diferentes tiempos del proceso y graficar las curvas.

El problema más grande que se encontró en este tipo de pruebas, era mantener las condiciones de temperatura y presión durante toda la prueba. Si la presión de vacío era menor, la toma de muestras era muy difícil, e incluso se tenía que elevar el vacío al momento de sacar la muestra, para que esta fuera significativa. Al hacer esto se corría el peligro de que el control de temperatura empezara a oscilar de manera importante. Si la presión de vacío era alta, el problema era mantener la temperatura del agua de la bomba suficientemente baja para que la bomba trabajara correctamente durante todo el proceso, para lo que se requería enfriar el agua cerca de 4 horas.

Otra situación que se presentaba a lo largo de este tipo de pruebas y las de fluidinámica, era el irregular flujo de vapor, el cual nos podía llegar bastante seco, o se podía condensar a la mitad de la prueba, no importando que se hubiera purgado correctamente. Esto tiene que ver directamente con la operación de equipo de calderas, ya que la eficiencia con la que nos llegaba el vapor (seco o con mucho agua) variaba de operario a operario. A pesar de hacer esta observación tuvimos este tipo de problema durante todo el período de realización de las pruebas. Uno de los problemas que más pruebas arruinó, fue una fuga que se tuvo en planta piloto durante casi todo el semestre, ya que si alguien abría una llave en la planta de abajo del laboratorio (lo cual sucedía muy a menudo), el agua les salía hirviendo y nuestra columna se condensaba inmediatamente, arruinando por completo nuestra prueba.

Nos dimos cuenta, que el calentar las resistencias por media hora antes de la prueba puede evitar en gran parte la posibilidad de condensación durante el proceso. Como se reporta en otras tesis, se tiene sin embargo en algunas pruebas ganancia de humedad. [64]

Para este tipo de secado se trazan tres gráficas, que son la de humedad contra tiempo, humedad normalizada contra tiempo, y velocidad de secado contra promedio de humedad. Estas gráficas nos ayudan a observar el proceso, cómo se desarrolla y sus dos etapas principales, que son las de velocidad constante, que es donde se remueve la humedad superficial de la partícula, y la otra donde la remoción de humedad no es constante y la humedad se elimina desde el interior de la partícula.

La humedad inicial, oscilaba entre 0.25 y 0.33 kg. agua / kg sólido seco. En las figuras 10.11, 10.12 y 10.13 se muestran las gráficas que se trazaban para cada experimento y que en encuentran en los distintos apéndices.

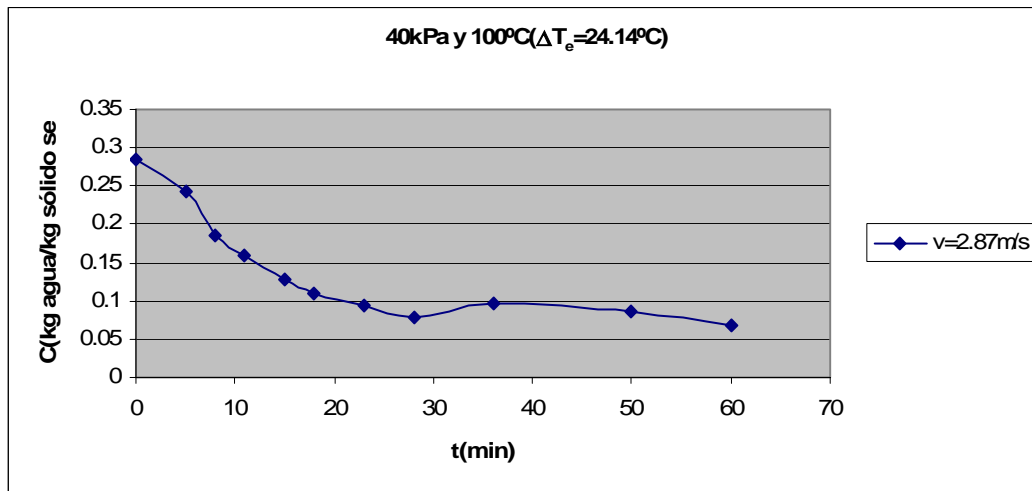


Figura 10.11 Gráfica de Humedad en función del tiempo.

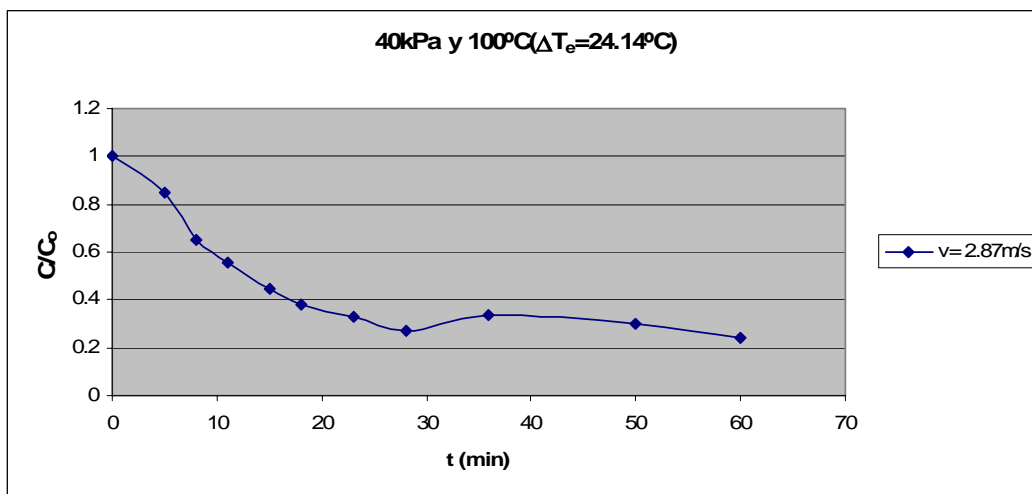


Figura 10.12 Gráfica de Humedad normalizada en función del tiempo.

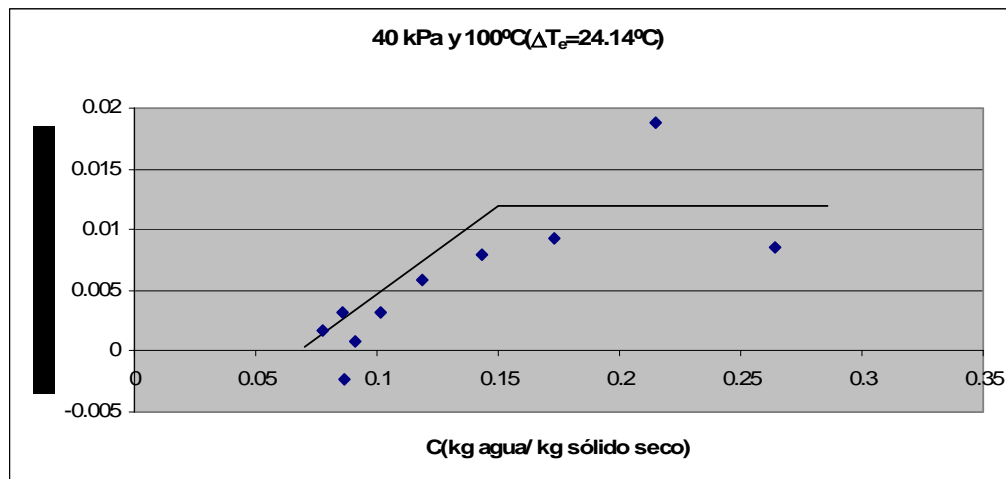


Figura 10.13 Gráfica de velocidad de secado en función de la humedad.

En muchas ocasiones, la gráfica de velocidad de secado, no es fácil de interpretar, ya que no se distingue claramente el período de velocidad constante de secado del período decreciente de secado.

Par poder trazar bien dichas gráficas, llevar a cabo un análisis más profundo de cada de uno de los dos períodos, y validar las afirmaciones que se obtienen de las comparaciones, se ha realizado un estudio del período de velocidad constante a través de la magnitud de su velocidad de secado, es decir la pendiente de la regresión lineal hecha a los datos correspondientes al período de velocidad constante, en la curva de humedad normalizada contra tiempo, por lo que la velocidad de secado (x), se define como:

$$\frac{C}{C_o} = -x t + b \quad (10.11)$$

Esta regresión lineal se obtuvo para cada experimento de secado:

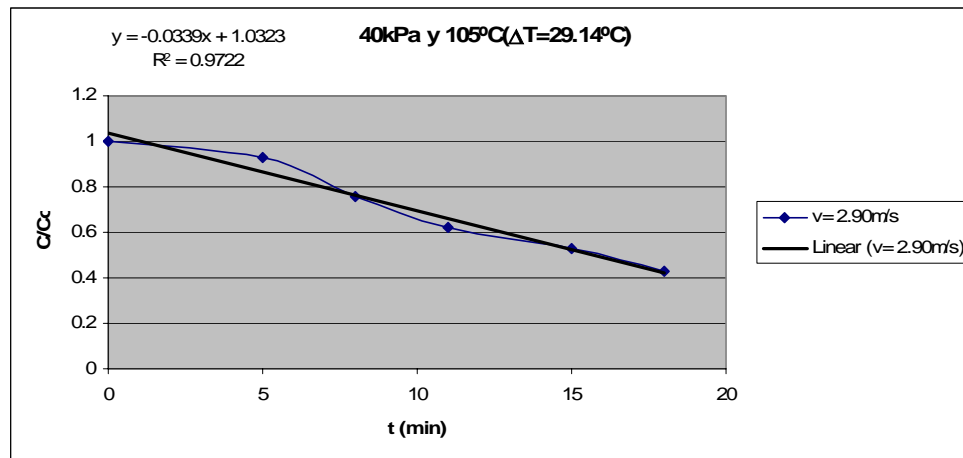


Figura 10.14 Regresión lineal del período constante de secado.

Los valores de las velocidades de los períodos constantes de cada experimento son:

Tabla 10.7 Velocidades de secado del período constante.

Presión [kPa]	Temperatura[°C]	Velocidad del vapor [m/s]	Velocidad de secado[min^{-1}]
40	100	2.87	0.0265
40	105	2.9	0.0252
40	110	2.9	0.0379
40	100	3.3	0.0326
40	105	3.29	0.047
40	110	3.28	0.0375
40	100	4.01	0.0271
40	105	4.07	0.0339
40	110	4	0.0418
53	100	2.98	0.0234
53	105	2.84	0.0259
53	110	2.91	0.0314
53	100	3.29	0.0137
53	105	3.34	0.0227
53	110	3.38	0.0428
67	100	2.32	0.0105
67	105	2.33	0.0169
67	110	2.33	0.0324
67	100	2.51	0.0023
67	105	2.51	0.0176
67	110	2.47	0.018

Para poder analizar el período de velocidad decreciente se obtuvo el valor de k_d , que es el coeficiente de transferencia de masa. Este coeficiente es analizado posteriormente en este capítulo. También se realizaron comparaciones con gráficas que nos permiten observar más fácilmente el comportamiento de las curvas. En la figura 10.15 se muestra una gráfica de comparación en la que claramente se ve el efecto de la presión en el secado de la partícula a menores temperaturas.

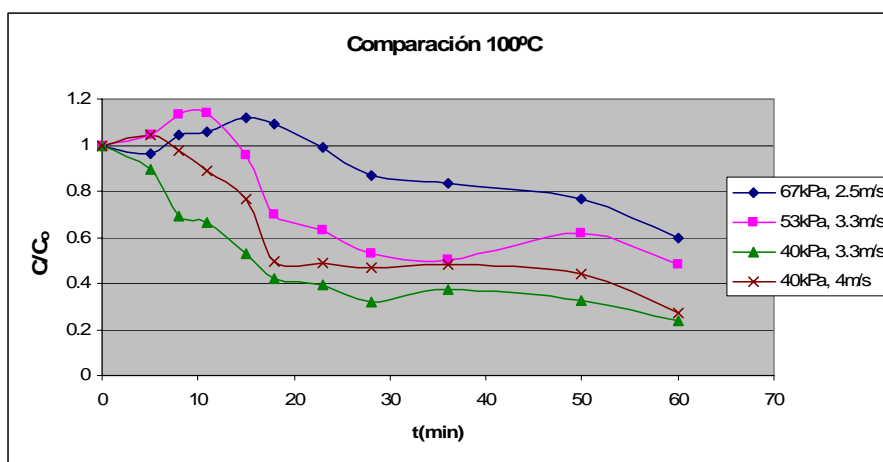


Figura 10.15 Comparación de curvas a diferentes presiones.

Este efecto tiende a desaparecer a temperaturas mayores, como también se observa en la tesis de Martínez[64], este efecto se puede observar en la figura 10.16.

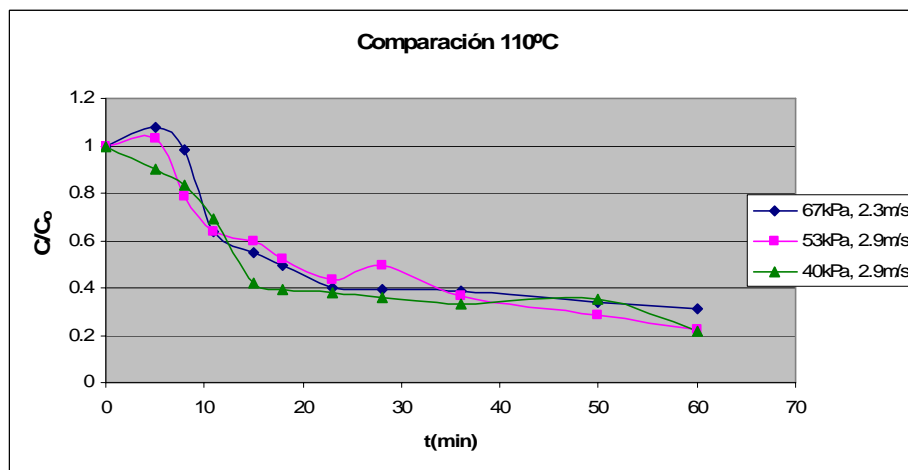


Figura 10.16 Comparación de curvas a diferentes presiones.

Estas afirmaciones se pueden corroborar estadísticamente con las velocidades de secado, ya que mientras a 100°C y altas velocidades de fluidización (4m/s y 40 kPa, 3.3 m/s y 40kPa, 3.3 m/s y 53 kPa, y 2.5m/s y 67 kPa) la velocidad de secado mayor en el período constante (40kPa y 3.3m/s) es 92.9% mayor a la velocidad de secado menor en el período constante (2.5 m/s y 67 kPa), a 110°C y bajas velocidades de fluidización (2.9 m/s y 40 kPa, 2.9 m/s y 53 kPa, y 2.3 m/s y 67 kPa),) la velocidad de secado mayor en el período constante (40kPa y 2.9m/s) es apenas 17.1% mayor a la velocidad de secado menor en el período constante (2.9 m/s y 53 kPa). Este comportamiento se puede visualizar en la figura 10.17.

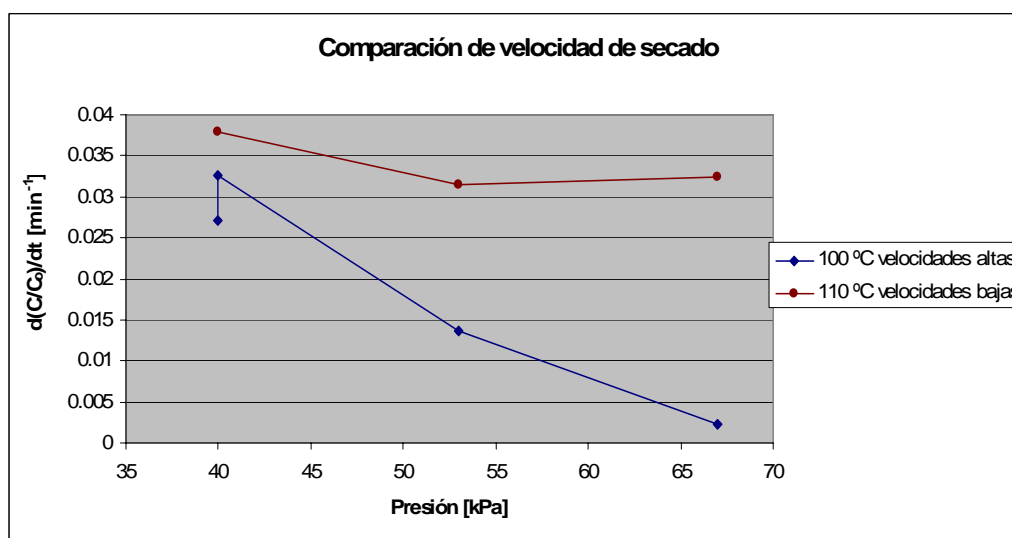


Figura 10.17 Comparación de velocidades de secado en el período constante.

La influencia de la temperatura se hace notoria con un menor vacío, pero este efecto disminuye mientras se disminuye la presión, es decir aumentando el vacío, este efecto se puede observar en las figuras 10.18, 10.19 y 10.20.

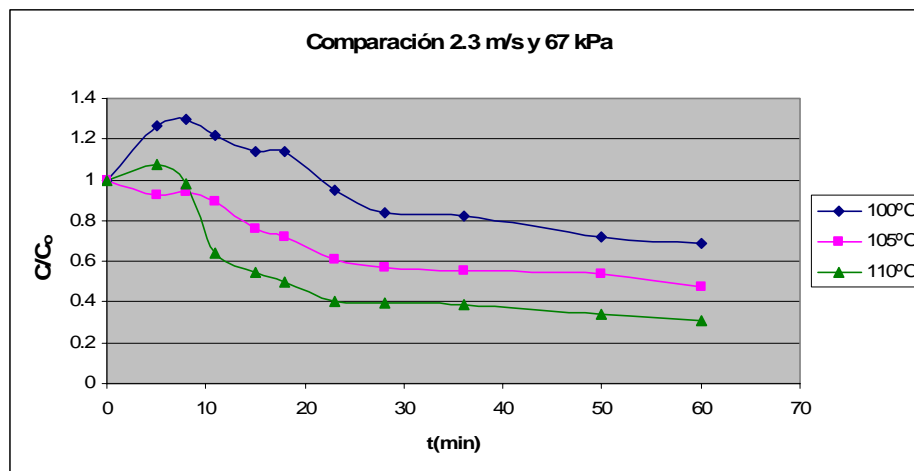


Figura 10.18 Comparación de curvas a diferentes temperaturas.

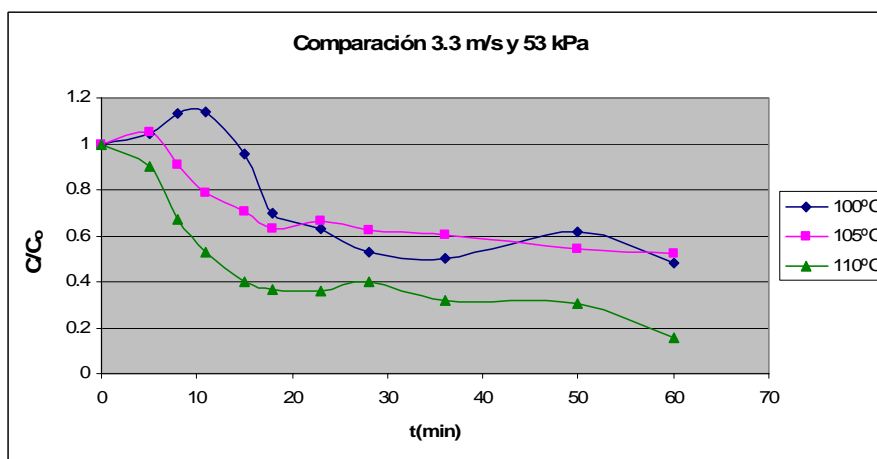


Figura 10.19 Comparación de curvas a diferentes temperaturas.

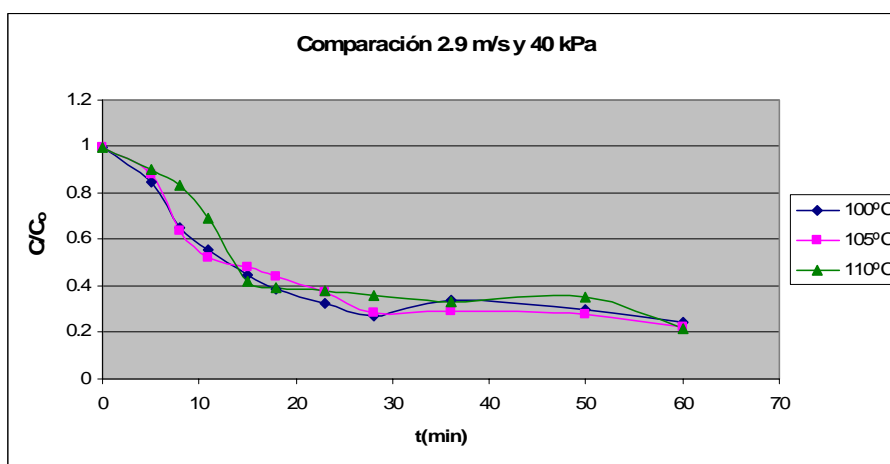


Figura 10.20 Comparación de curvas a diferentes temperaturas.

Este comportamiento estadísticamente nos dice que a 40 kPa y 2.9 m/s la diferencia entre la velocidad de secado mayor del período constante y la velocidad de secado menor en el período constante es del 33%, a 67 kPa y 2.3m/s la diferencia entre la velocidad de secado mayor del período constante y la velocidad de secado menor en el período constante es de 67.6%.

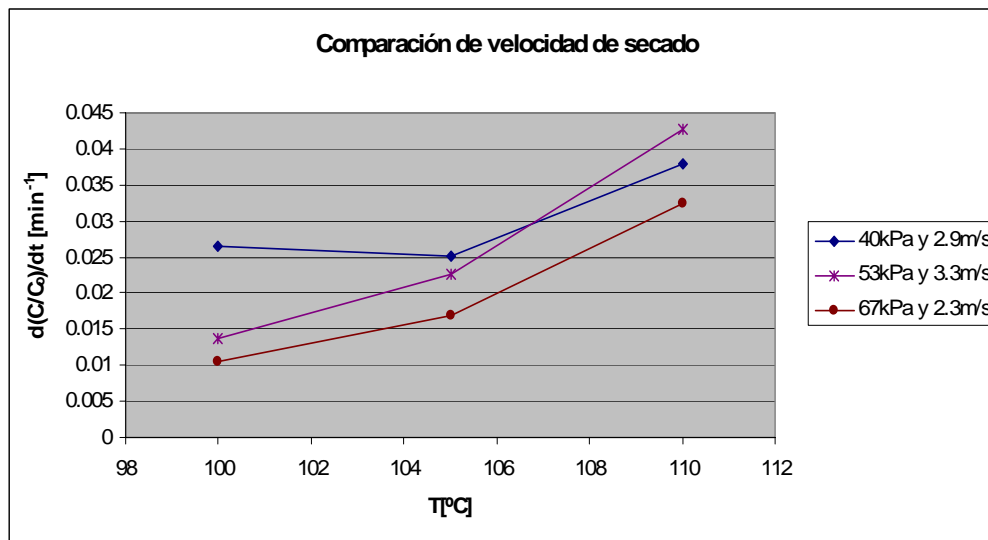


Figura 10.21 Comparación de velocidades de secado en el período constante.

Como también se observa en la tesis de Martínez[64], la velocidad tiene cierta incidencia al principio del experimento aunque como transcurre el tiempo la diferencia se hace menor, como se observa en las figuras 10.22 y 10.23 . Aunque también podemos observar que las velocidades tienen muy poco efecto a 40kPa, como se observa en la gráfica 10.24.

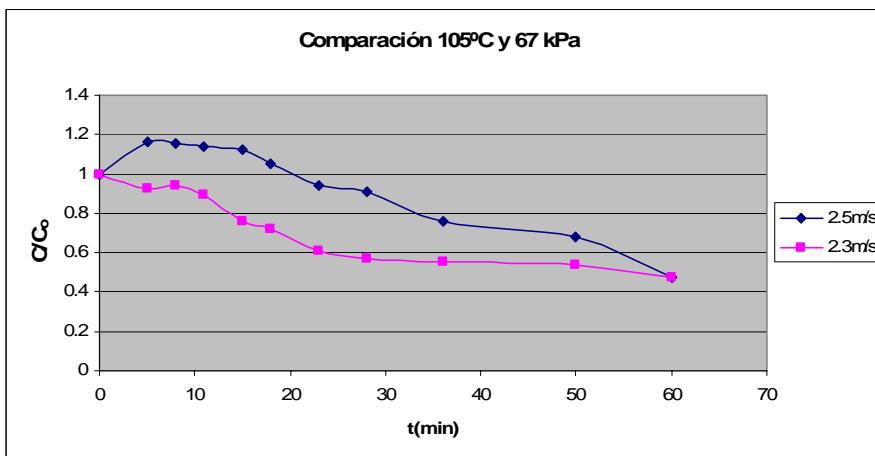


Figura 10.22 Comparación de curvas a diferentes velocidades.

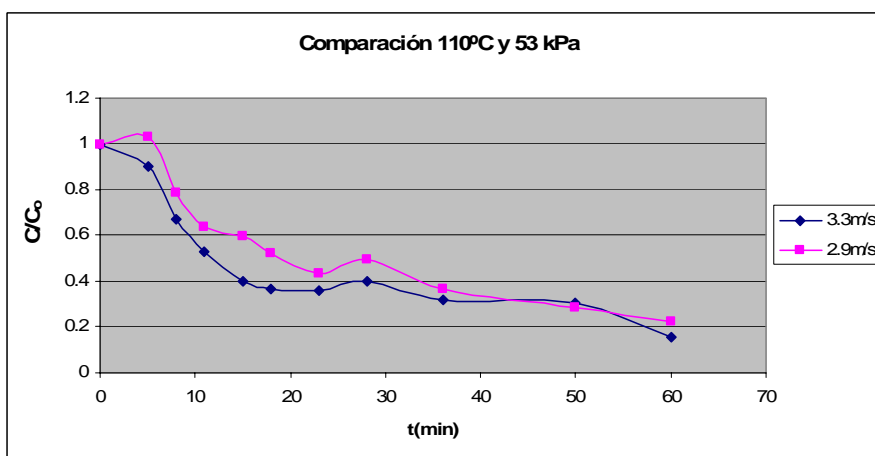


Figura 10.23 Comparación de curvas a diferentes velocidades.

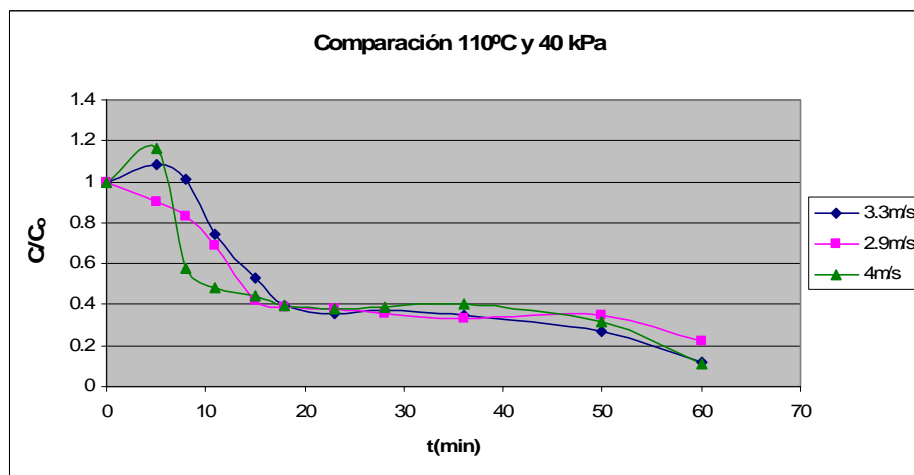


Figura 10.24 Comparación de curvas a diferentes velocidades.

Este comportamiento estadísticamente nos dice que a 53 kPa y 110 °C la diferencia entre la velocidad de secado mayor del período constante (3.3m/s) y la velocidad de secado menor en el período constante (2.9 m/s) es del 26.6%, a 40 kPa y 110 °C la diferencia entre la velocidad de secado mayor del período constante (4 m/s) y la velocidad de secado menor en el período constante (3.3 m/s) es de 10.3%.

Al trazar una gráfica de velocidad de secado en función de la temperatura en exceso, nos podemos dar cuenta, de que en efecto, estos dos valores guardan una relación directamente proporcional, es decir que entre mayor sea el exceso de temperatura, mayor será la velocidad de secado. Esto se puede observar en la figura 10.25.

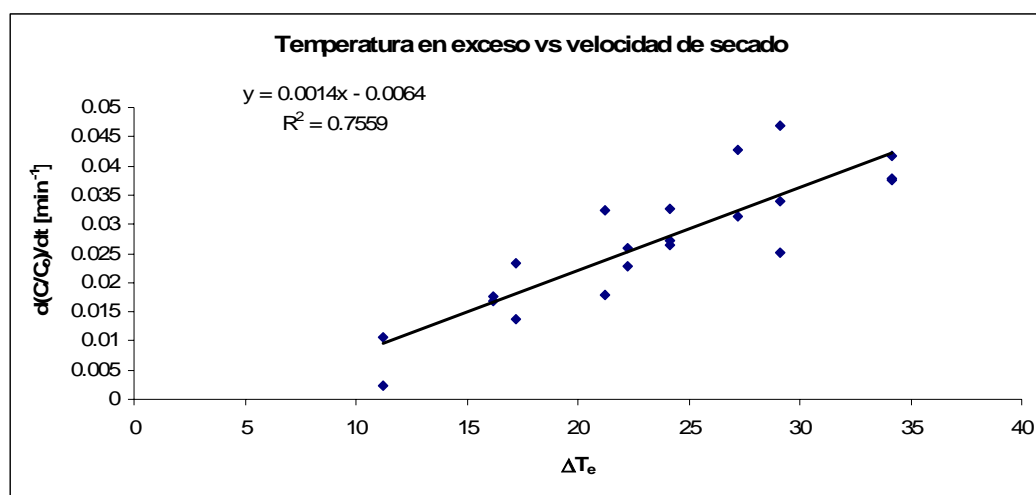


Figura 10.25 Velocidad de secado en función de la temperatura en exceso.

10.2.1 Comparación de la humedad del arroz

La tabla 10.8 muestra un resumen de los experimentos realizados, con sus condiciones de operación y humedades finales. Los experimentos del 1 al 22 son

experimentos válidos y cuyas gráficas y comparaciones se encuentran en el apéndice C y sus tablas en el apéndice D.

De los experimentos del 23 al 31 son experimentos se lograron completar, pero cuyos resultados no son óptimos. Sus gráficas se encuentran en el apéndice E y sus tablas se encuentran en el apéndice F. Estos últimos cuentan también con comparaciones, sólo para situarlas y compararlas con otras gráficas, sin afán de realmente analizarlas. Estos experimentos, no son óptimos, ya que presentan errores muy altos, y son principalmente del período cuando se aprendió a usar el equipo y no se conocían todos los detalles, y las rutinas que se tienen que realizar para que los experimentos salgan bien.

Para 67 kPa las velocidades fueron de 2.3 m/s y 2.5 m/s ya que la presión máxima de vapor no era suficiente para alcanzar las velocidades de 2.9 m/s y 3.3m/s, que se utilizaron tanto a 50kPa como en 40 kPa. A 40kPa también se realizaron experimentos a 4 m/s.

Tabla 10.8 Comparación de humedad final a diferentes condiciones de trabajo.

Experimento	Presión [kPa]	Temperatura [T]	Temp. De sat.[°C]	ΔT_e [°C]	v[m/s]	Cfinal[kg agua/kg sólido seco]
1	40	100	75.86	24.14	2.87	0.07
2	40	105	75.86	29.14	2.90	0.06
3	40	110	75.86	34.14	2.90	0.06
4	40	100	75.86	24.14	3.30	0.07
5	40	105	75.86	29.14	3.29	0.05
6	40	110	75.86	34.14	3.28	0.03
7	40	100	75.86	24.14	4.01	0.08
8	40	105	75.86	29.14	4.07	0.06
9	40	110	75.86	34.14	4.00	0.03
10	53	100	82.77	17.23	2.98	0.15
11	53	105	82.77	22.23	2.84	0.08
12	53	110	82.77	27.23	2.91	0.05
13	53	100	82.77	17.23	3.29	0.13
14	53	105	82.77	22.23	3.34	0.17

15	53	110	82.77	27.23	3.38	0.04
16	53	115	82.77	32.23	3.50	0.02
17	67	100	88.78	11.22	2.32	0.19
18	67	105	88.78	16.22	2.33	0.15
19	67	110	88.78	21.22	2.33	0.09
20	67	100	88.78	11.22	2.51	0.18
21	67	105	88.78	16.22	2.51	0.14
22	67	110	88.78	21.22	2.47	0.13
23	53	100	82.77	17.23	2.97	0.18
24	53	100	82.77	17.23	3.34	0.21
25	53	100	82.77	17.23	3.30	0.27
26	53	100	82.77	17.23	3.36	0.22
27	53	105	82.77	22.23	3.27	0.58
28	53	105	82.77	22.23	3.26	0.12
29	67	100	88.78	11.22	2.50	0.21
30	67	100	88.78	11.22	2.51	0.34
31	67	105	88.78	16.22	2.45	0.12

En la tabla 10.9 se muestran las humedades finales, las humedades a los 15 minutos después de empezado el experimento de secado, y a los 28 minutos de haber empezado los experimentos de secado, de los experimentos que pudieron completarse satisfactoriamente.

Tabla 10.9 Comparación de humedades a diferentes tiempo en el proceso de secado.

Presión [kPa]	Temperatura [T]	Temp. De sat. [°C]	ΔT_e [°C]	v [m/s]	C _{final} [kg agua/kg sólido seco]	C _{15min} [kg agua/kg sólido seco]	C _{30min} [kg agua/kg sólido seco]
40	100	75.86	24.14	2.87	0.07	0.127	0.0775
40	105	75.86	29.14	2.9	0.06	0.136	0.0814
40	110	75.86	34.14	2.9	0.06	0.112	0.0957
40	100	75.86	24.14	3.3	0.07	0.15	0.09
40	105	75.86	29.14	3.29	0.05	0.1012	0.091
40	110	75.86	34.14	3.28	0.03	0.144	0.1
40	100	75.86	24.14	4.01	0.08	0.216	0.131
40	105	75.86	29.14	4.07	0.06	0.14	0.108
40	110	75.86	34.14	4	0.03	0.131	0.115
53	100	82.77	17.23	2.98	0.15	0.19	0.151
53	105	82.77	22.23	2.84	0.08	0.2	0.119

53	110	82.77	27.23	2.91	0.05	0.145	0.119
53	100	82.77	17.23	3.29	0.13	0.258	0.144
53	105	82.77	22.23	3.34	0.17	0.223	0.197
53	110	82.77	27.23	3.38	0.04	0.113	0.113
67	100	88.78	11.22	2.32	0.19	0.368	0.226
67	105	88.78	16.22	2.33	0.15	0.235	0.177
67	110	88.78	21.22	2.33	0.09	0.151	0.109
67	100	88.78	11.22	2.51	0.18	0.343	0.266
67	105	88.78	16.22	2.51	0.14	0.322	0.26
67	110	88.78	21.22	2.47	0.13	0.223	0.209

Las figuras 10.26 y 10.27 muestran las comparaciones de humedad final, la primera con diferentes presiones de operación y la segunda a diferentes velocidades. En la primera podemos apreciar que mientras menor sea la presión dentro de la columna, menor es el contenido de humedad final, mientras que la segunda nos arroja que mientras mayor sea el exceso de temperatura, menor será el contenido de humedad final.

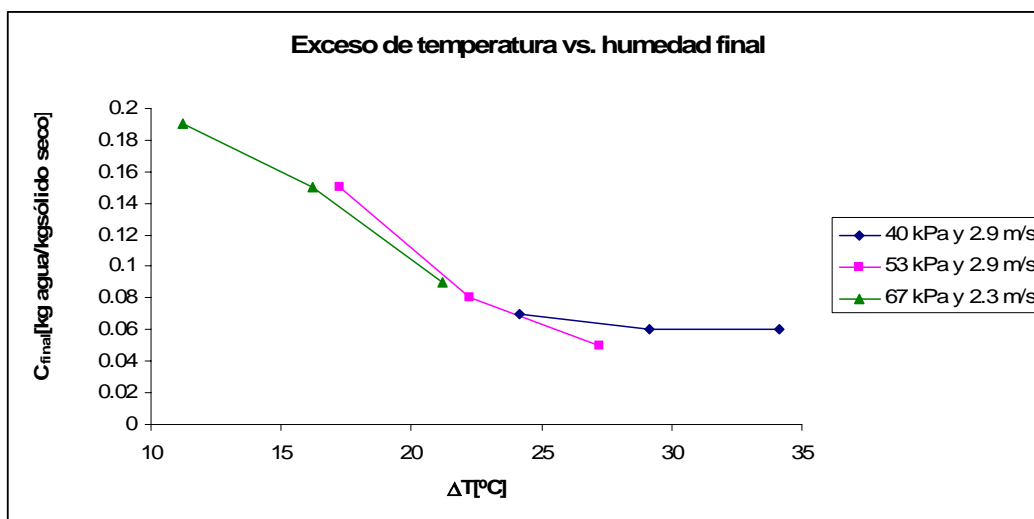


Figura 10.26 Efecto del exceso de temperatura en la humedad final.

Se puede observar que existe una amplia diferencia entre los contenidos de humedad a presiones operacionales de 67 kPa, pues a menor temperatura en exceso se

tiene casi un 52.6% más de contenido de humedad final, a 53 kPa la diferencia es de 66.7%, mientras que a 40 kPa la diferencia entre el contenido de humedad a la mayor temperatura y la menor es de apenas de 14 %.

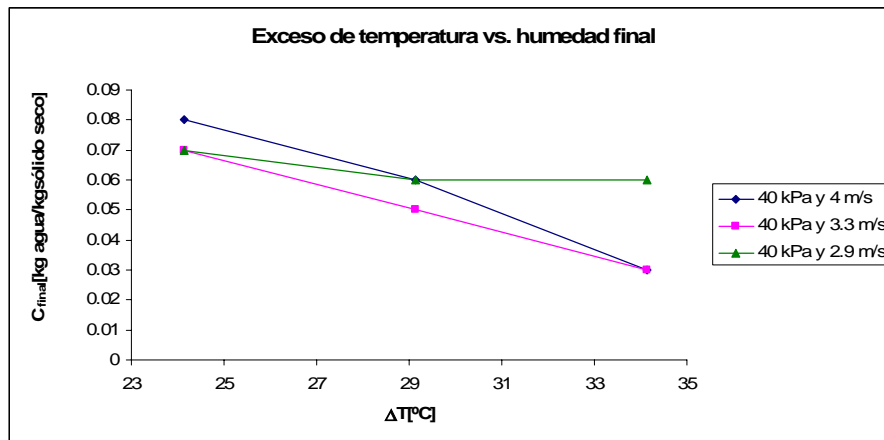


Figura 10.27 Efecto del exceso de temperatura en la humedad final.

Los anteriores análisis, están basados en la humedad final, es decir, la humedad al término de los procesos de secado, que duran para los experimentos de este trabajo de investigación, 60 minutos.

Pero para poder medir la eficiencia del proceso de secado, se realizará un análisis de las humedades de las muestras que se tomaron de cada experimento a los 15 minutos de haber empezado el experimento y a los 28 de haber empezado el experimento.

En la figura 10.28 podemos observar como se comporta cada proceso de secado, comparando las diferentes presiones operacionales, en una gráfica de exceso de temperatura contra contenido de humedad a los 15 minutos de haber comenzado con el experimento.

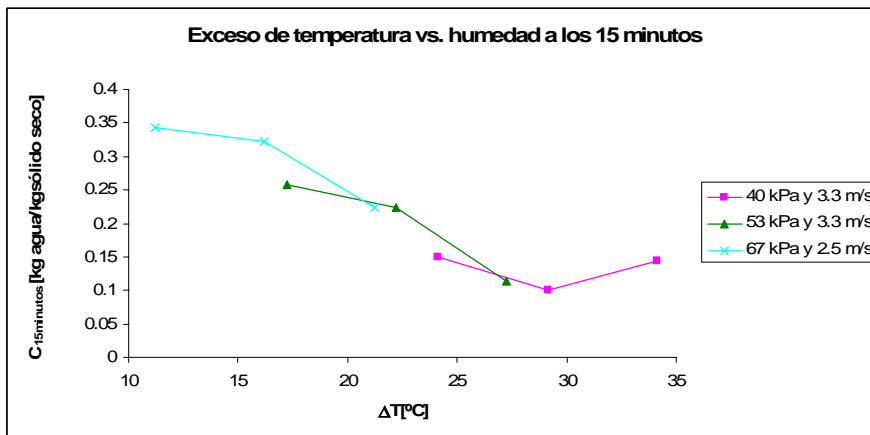


Figura 10.28 Efecto del exceso de temperatura a los 15 minutos

El exceso de temperatura, está en función de la temperatura operacional y de la presión operacional. La gráfica 10.28 nos muestra que en efecto a mayor exceso de temperatura, menor será el contenido de humedad. Se puede observar que existe una amplia diferencia entre los contenidos de humedad y que las líneas se intersectan, esto quiere decir, por ejemplo que el proceso de secado a 67 kPa y 110°C obtiene el mismo resultado que el proceso a 53 kPa y 105 °C. Lo mismo sucede entre los procesos de 53 kPa y 110°C y 40kPa y 105°C. En la figura 10.29 podemos analizar los procesos de secado a 28 minutos de empezado el proceso de secado.

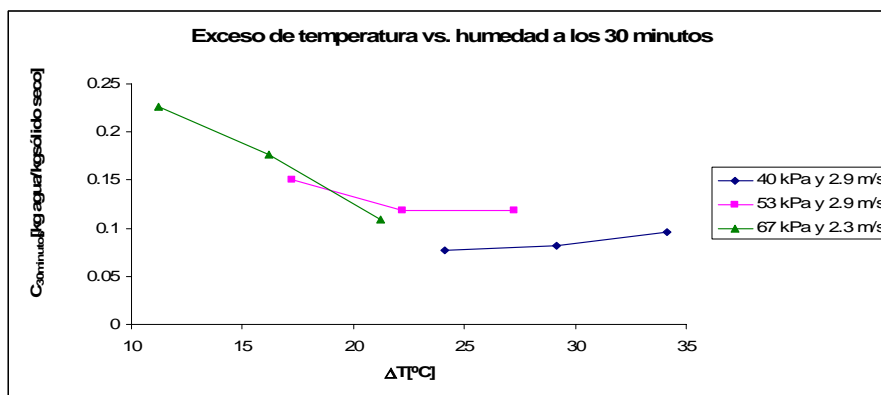


Figura 10.29 Efecto del exceso de temperatura a los 30 minutos

En esta gráfica se puede notar un efecto mayor a 40 kPa, es decir el contenido de humedad, es menor en comparación con los otros procesos a presiones operacionales mayores, sin embargo a esta presión operacional, el contenido de humedad a la menor temperatura es prácticamente igual, que a la de mayor temperatura. Los únicos procesos que podemos observar que tienen el mismo contenido de humedad a presiones operacionales distintas, son los procesos de 110°C a 67 kPa y 100°C a 53 kPa. En la figura 10.30 podemos observar que existe una relación inversamente proporcional entre el contenido de humedad y el exceso de temperatura, y obviamente, mientras más tiempo permanezca el arroz en la columna, menor va a ser su contenido de humedad.

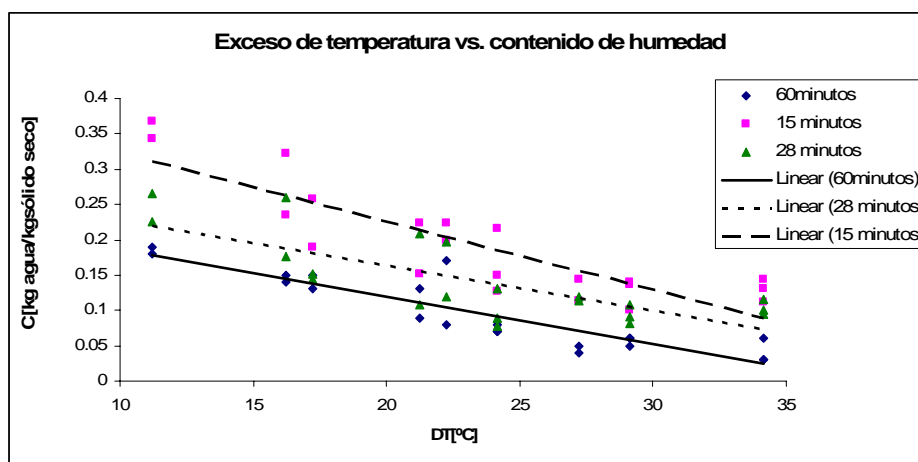


Figura 10.30 Comparación de contenido de humedad a diferentes tiempos.

10.2.2 Análisis de coeficientes de transferencia de masa

Para poder analizar el período de velocidad decreciente del proceso de secado, se obtiene el coeficiente de transferencia de masa (k_d). Para obtener este coeficiente, se tiene que obtener el logaritmo natural de la división de cada uno de los valores de contenido de humedad entre el valor de la humedad crítica (que es el valor del contenido de humedad del cual en el que sucede el cambio de etapa de velocidad constante de secado a

velocidad decreciente). Después se grafica el resultado del logaritmo natural para cada valor del período de velocidad decreciente contra el tiempo, y se hace una regresión lineal. El valor de la pendiente de dicha regresión, es el valor de k_d , que tiene unidades de $[\text{minutos}^{-1}]$.

$$\ln\left(\frac{C}{C_c}\right) = -k_d t + b \quad (10.12)$$

Donde t está en minutos.

Tabla 10.10 Coeficientes de transferencia de masa.

Presión [kPa]	Temperatura[°C]	Velocidad[m/s]	k_d [min ⁻¹]
40	100	2.87	0.0054
40	105	2.9	0.0073
40	110	2.9	0.0109
40	100	3.3	0.0104
40	105	3.29	0.0093
40	110	3.28	0.0241
40	100	4.01	0.0116
40	105	4.07	0.0181
40	110	4	0.0252
53	100	2.98	0.0024
53	105	2.84	0.014
53	110	2.91	0.02
53	100	3.29	0.0031
53	105	3.34	0.0055
53	110	3.38	0.0172
67	100	2.32	0.0067
67	105	2.33	0.0055
67	110	2.33	0.0069
67	100	2.51	0.0111
67	105	2.51	0.0174
67	110	2.47	0.0142

Se realizaron comparaciones entre los diferentes valores de k_d , gráfica y numéricamente, para conocer el comportamiento de la velocidad del secado en el período de velocidad decreciente.

En la gráfica 10.31 se puede observar el efecto de la temperatura operacional en el valor de k_d , y podemos concluir que es significativo a presiones de 40 kPa, pues con una velocidad de vapor de 3.3 m/s, el k_d a 110 °C es 2.31 veces mayor que a 100°C, y con una velocidad de vapor de 4 m/s, el k_d es a 110°C 2.17 veces mayor que a 100°C, a presiones de 53kPa, también es significativo, ya que con una velocidad de vapor de 3.3. m/s, el k_d es a 110°C 5.54 veces mayor que a 100°C. Sin embargo a 67 kPa este efecto ya no es tan significativo, pues el k_d es a 110°C sólo 21.8% mayor que a 100°C.

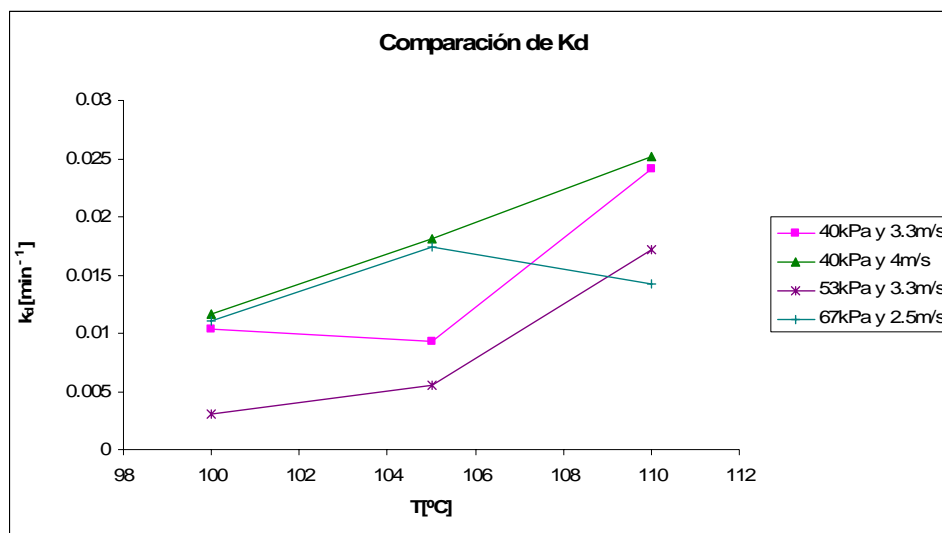


Figura 10.31 Gráfica de k_d en función de la temperatura operacional.

En la figura 10.32 se puede observar el efecto de la presión operacional en el valor de k_d , y podemos concluir que no es tan significativo como el efecto de la temperatura operacional, pues a temperaturas de 110°C, y una velocidad de vapor de 2.9 m/s, el k_d a 40 kPa es 36.7% mayor que a 67 kPa y 2.3 m/s, a temperaturas de 105°C, y una velocidad de vapor de 2.9 m/s, el k_d a 40 kPa es 24.7% mayor que a 67 kPa y 2.3 m/s, y a temperaturas de 100°C, y una velocidad de vapor de 2.9 m/s, el k_d a 40 kPa es 24% menor que a 67 kPa y 2.3 m/s.

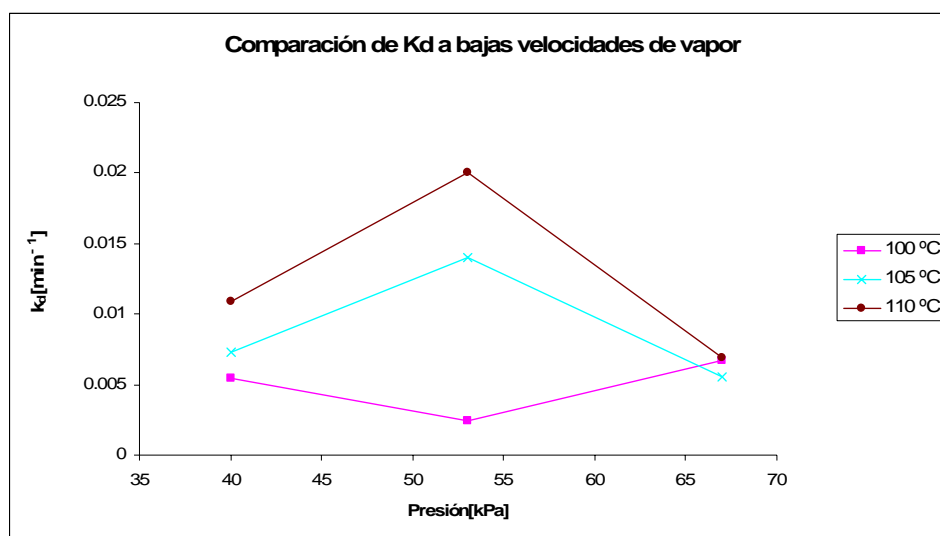


Figura 10.32 Gráfica de k_d en función de la presión operacional.

En la figura 10.33 podemos observar una graficación del coeficiente k_d en función de la temperatura en exceso, y se observa que a mayor exceso de temperatura, mayor el k_d .

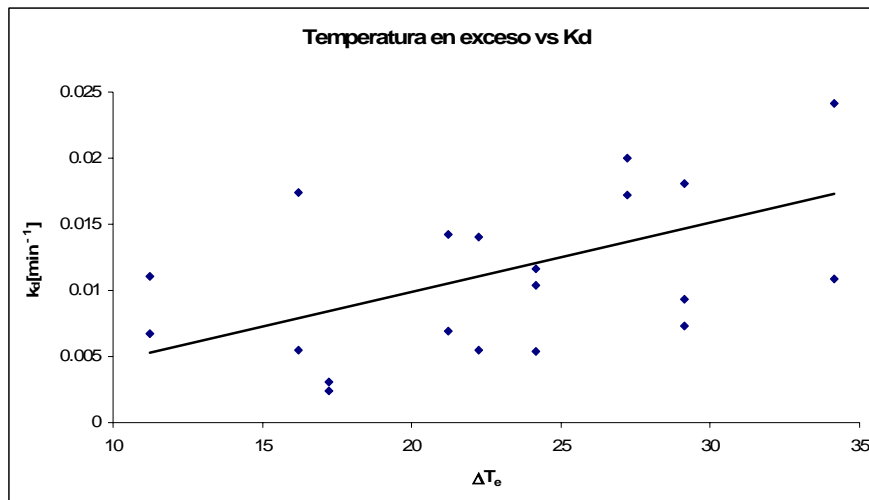


Figura 10.33 Gráfica de k_d en función de temperatura en exceso.

En la figura 10.34, se grafica k_d para diferentes presiones y velocidades, y se puede observar que el k_d es mayor a menores presiones operacionales, siendo a bajas temperaturas cuando se nota más este efecto, ya que a altas temperaturas, el efecto disminuye. En promedio a $110\text{ }^\circ\text{C}$ el valor de k_d es de $0.016\text{ minutos}^{-1}$, a $105\text{ }^\circ\text{C}$ el valor promedio de k_d es de $0.0107\text{ minutos}^{-1}$ y a $100\text{ }^\circ\text{C}$ el valor promedio de k_d es de $0.0069\text{ minutos}^{-1}$.

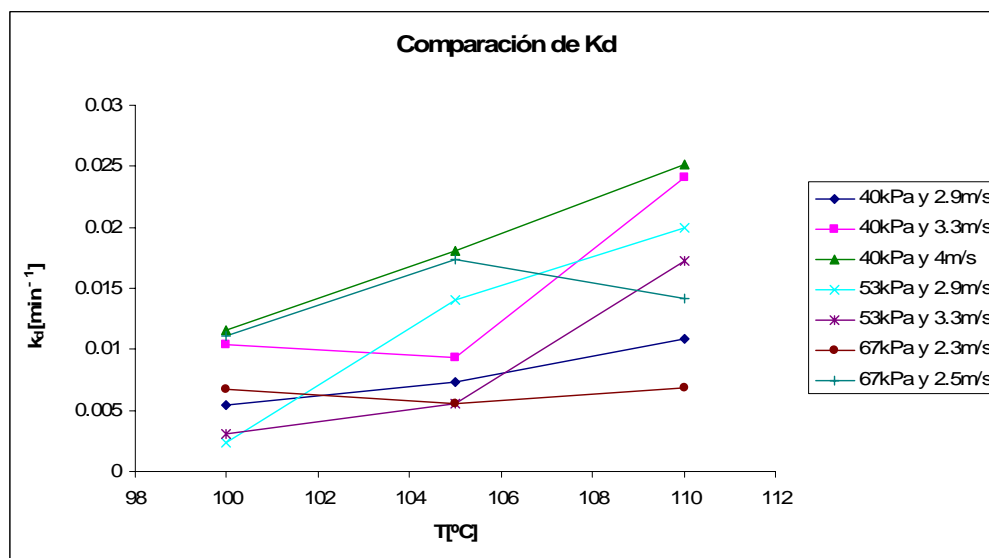


Figura 10.34 Gráfica de k_d en función de temperatura operacional.