

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizarán en forma detallada tanto los experimentos de fluidinámica como los de secado.

7.1 Análisis de los Experimentos de Fluidinámica

Como se estableció en el capítulo 5, las partículas usadas para el estudio experimental de fluidinámica son pimienta chica. Estas partículas tienen una esfericidad alta y una densidad menor a la del agua. Por falta de tiempo fue imposible experimentar con partículas de diferente diámetro y densidad.

En este trabajo se hicieron 2 rondas de experimentos para obtener mayor seguridad en los resultados. Los resultados de los primeros experimentos ya han sido comentados en el capítulo 5. A continuación se compararán los resultados de los segundos experimentos.

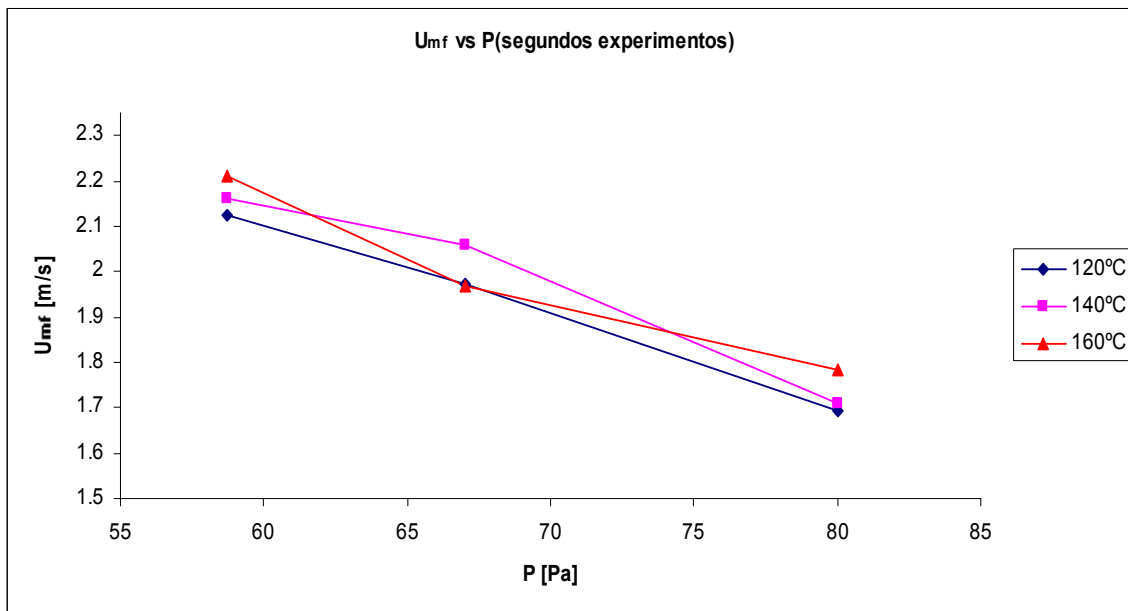


Figura 7.1 Efecto de la temperatura y presión de vapor sobrecalentado sobre la velocidad mínima de fluidización

Figura 7.2 Efecto de la temperatura y presión de vapor sobrecalentado sobre la velocidad mínima de fluidización

Las figuras 7.1 y 7.2 nos muestran la variación de la velocidad mínima de fluidización al modificar los parámetros de presión y temperatura de operación. Es posible observar que la velocidad mínima de fluidización disminuye al aumentar la presión de operación y aumenta al incrementar la temperatura. Sin embargo, es posible observar que los efectos causados por la presión de operación en la variación de la velocidad mínima de fluidización son mayores a los efectos causados por la temperatura; ya que las pendientes de las curvas en la figura 7.1 son mayores a las de la figura 7.2.

En estos segundos experimentos se encontró congruencia con los primeros experimentos realizados, ya que estos primeros mostraban características similares a los realizados posteriormente.

A continuación se presentan las porosidades mínimas de fluidización obtenidas en ambos experimentos:

Tabla 7.1 Porosidades mínimas de fluidización obtenidas en los primeros experimentos

	120°C	140°C	160°C
80kPa	0.302	0.3	0.31
67kPa	0.325	0.31	0.31
59kPa	0.31	0.291	0.345

Tabla 7.2 Porosidades mínimas de fluidización obtenidas en los segundos experimentos

	120°C	140°C	160°C
80kPa	0.352	0.367	0.435
67kPa	0.397	0.356	0.256
59kPa	0.299	0.282	0.322

En las tablas 7.1 y 7.2 se observa que no existe ninguna tendencia en especial de la porosidad mínima de fluidización con respecto a la presión o a la temperatura. Sin embargo,

es posible observar que algunos valores de porosidades se mantuvieron constantes al variar tanto la temperatura como la presión. Lo que nos hace suponer que la porosidad mínima de fluidización no es función ni de la temperatura ni de la presión de operación sino de las características físicas de las partículas.

A continuación se presentan los resultados de fluidinámica de ambos experimentos graficados en una misma figura con la finalidad de observar la tendencia con la que se comporta la velocidad mínima de fluidización al variar la presión y la temperatura.

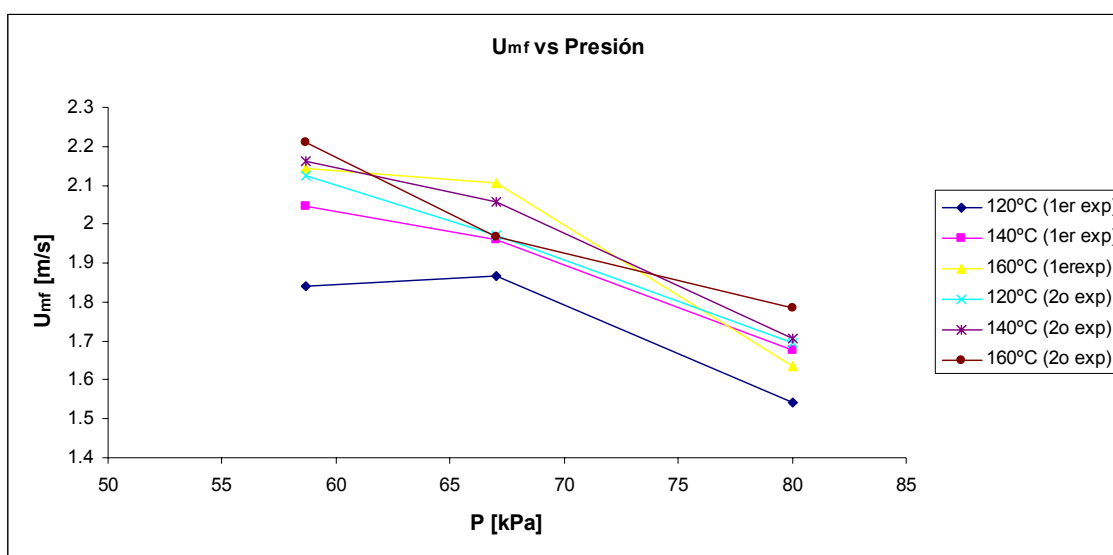


Figura 7.3 Variación de la velocidad mínima de fluidización con respecto a la presión de operación en ambos experimentos.

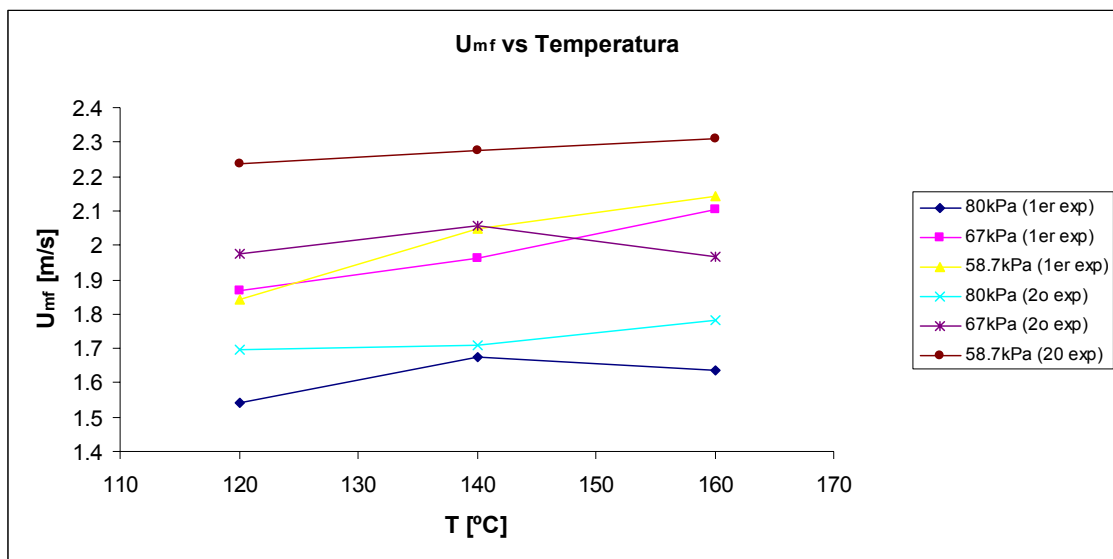


Figura 7.4 Variación de la velocidad mínima de fluidización con respecto a la temperatura de operación en ambos experimentos.

La tendencia de los resultados presentados en las figuras anteriores coincide con la tendencia encontrada por Patiño [5] al variar la presión y la temperatura de operación.

Es necesario ahora verificar que los resultados encontrados experimentalmente sean congruentes con los resultados teóricos. En el capítulo 5 se realizó una comparación de los resultados de los primeros experimentos y los resultados obtenidos con la ecuación 2.8. Esta ecuación fue publicada por Chen [1]. Sin embargo, existen ecuaciones desarrolladas bajo condiciones de vacío que pueden ser más útiles. En este trabajo, la ecuación 2.22 desarrollada por Kozanoglu et al [12] será usada para realizar una comparación entre resultados experimentales y teóricos.

TABLA 7.3 Comparación de resultados teóricos con experimentales usando la ecuación presentada por Chen [1] y la ecuación de Kozanoglu et la [12]

Presión [kPa]	Temp [°C]	Umf (ΔP_{lecho}) [m/s]		Umf (altura del lecho) [m/s]		Umf teórica. (Wen y Yu[1])	Umf teórica. (Kozanoglu[12])
		primeros experimenten	segundos experiment	primeros experiment	segundos experiment		
80	120	1.543	1.694	1.543	1.694	1.7383	1.795
80	140	1.676	1.708	1.676	1.708	1.7675	1.833
80	160	1.635	1.784	1.635	1.528	1.7941	1.868
67	120	1.868	1.973	1.868	1.737	1.8823	1.952
67	140	1.962	2.058	1.962	1.797	1.9121	1.992
67	160	2.104	1.968	1.843	1.968	1.9389	2.030
58.7	120	1.841	2.123	1.841	2.123	1.9960	2.078
58.7	140	2.047	2.163	2.047	2.163	2.0261	2.119
58.7	160	2.143	2.212	2.143	2.212	2.0530	2.158

Donde $U_{mf} (\Delta P_{lecho})$ es la velocidad mínima de fluidización obtenida de las gráficas de caída de presión del lecho y $U_{mf} (altura\ del\ lecho)$ es la velocidad mínima de fluidización obtenida de las gráficas de altura del lecho.

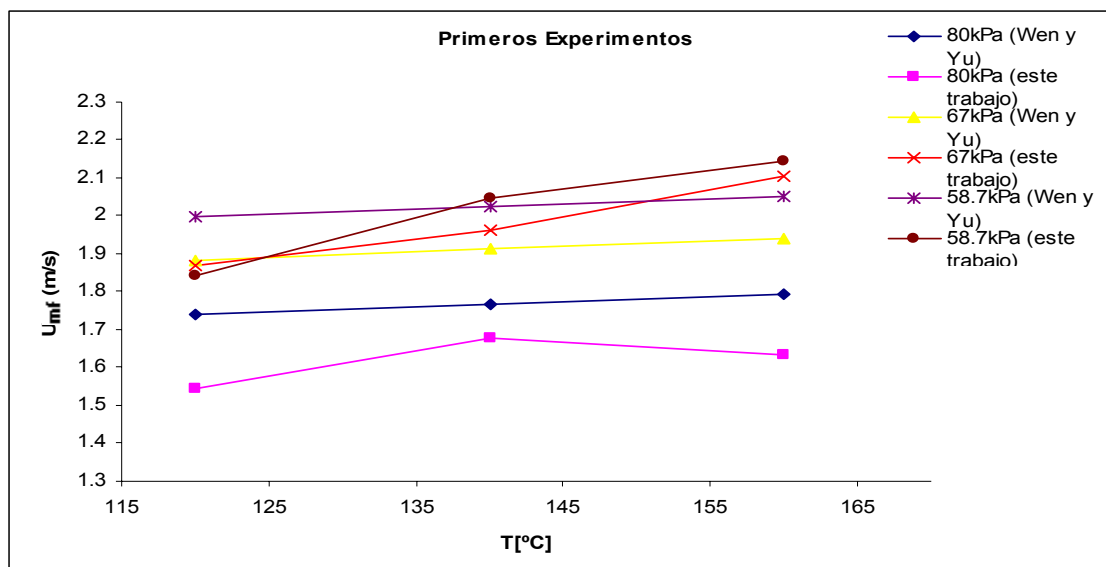


Figura 7.5 Comparación de los primeros experimentos con valores de Wen y Yu [1].

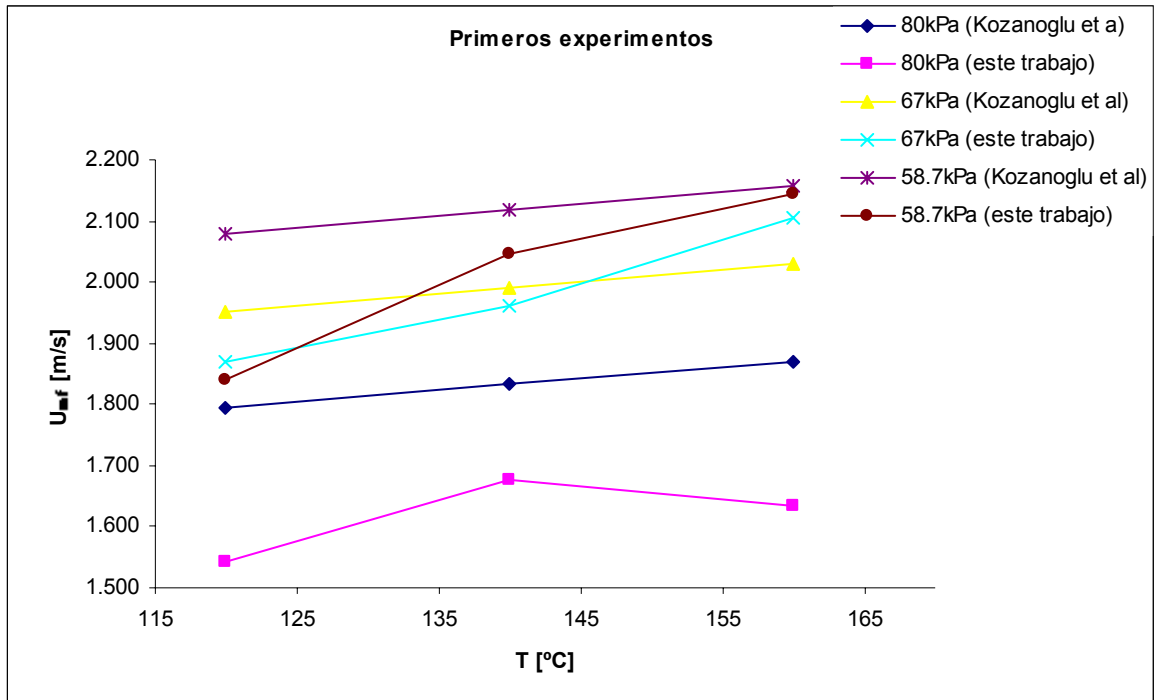


Figura 7.6 Comparación de los primeros experimentos con valores de Kozanoglu et al[12].

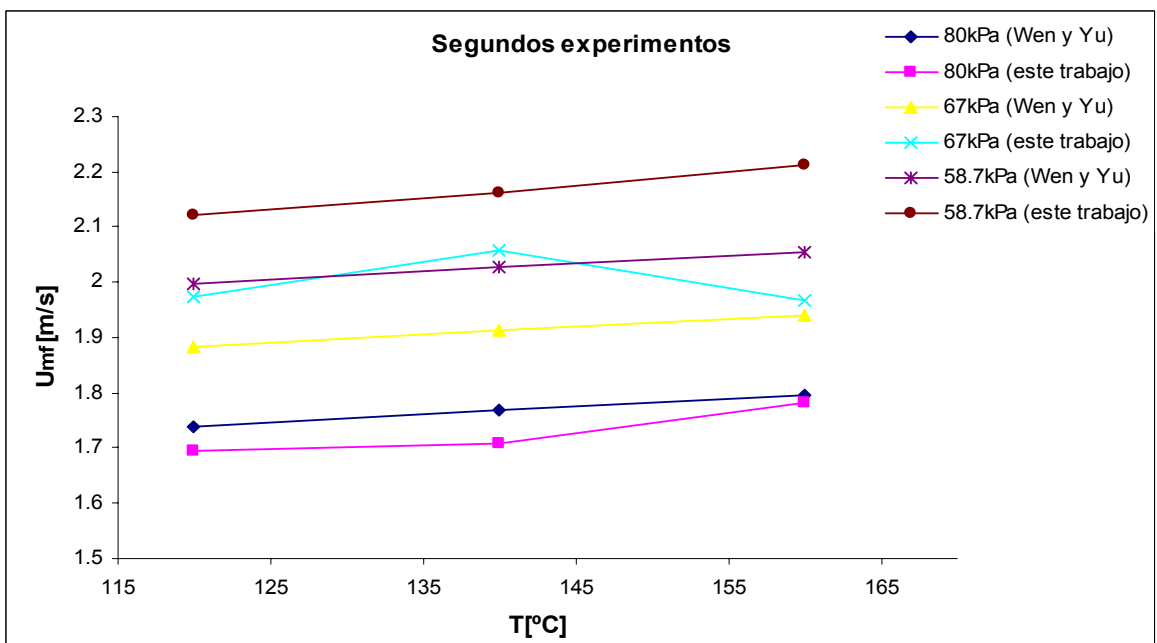


Figura 7.7 Comparación de los segundos experimentos con valores de Wen y Yu[1].

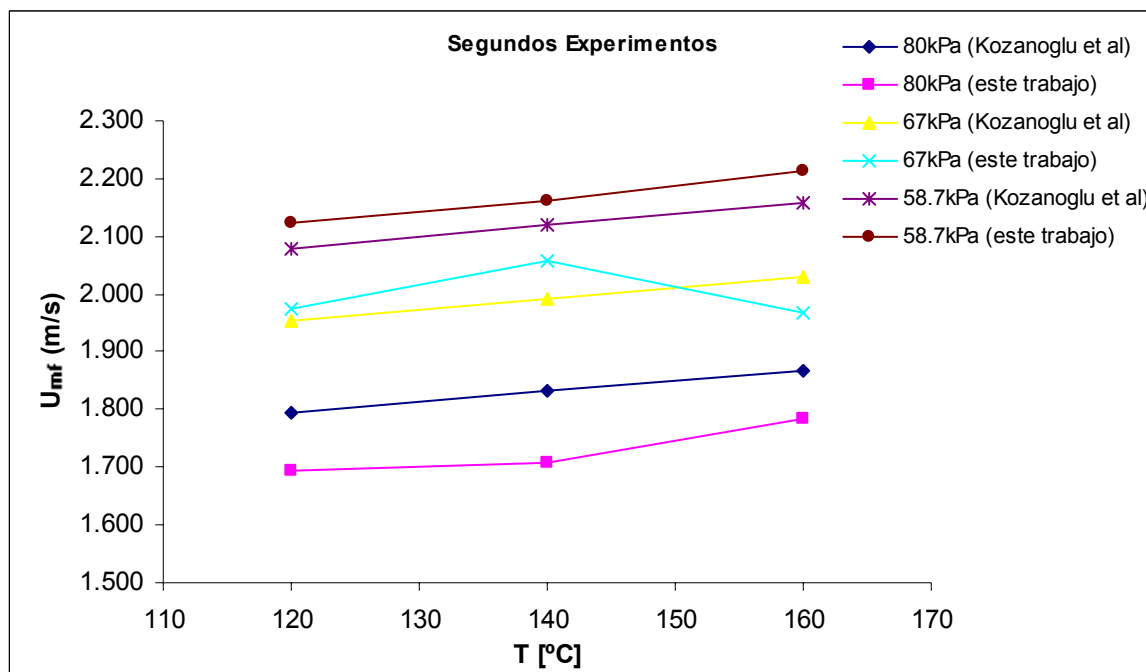


Figura 7.8 Comparación de los segundos experimentos con valores de Kozanoglu et al [12]

Se puede observar que existe mucha similitud entre los resultados experimentales y los teóricos para ambas ecuaciones. En algunos casos existe mucha similitud con la ecuación de Chen [1] y en otros con la ecuación de Kozanoglu et al [12]. Sin embargo, es posible observar que los valores de la ecuación 2.22 son mayores a los valores de la ecuación 2.8. Para que exista mayor seguridad para la fluidización de determinada partícula, siempre será preferible utilizar los valores teóricos más altos, es decir, la ecuación 2.22 nos brindará mayor seguridad que la ecuación 2.8 al encontrar la velocidad mínima de fluidización de determinada partícula.

Uno de los objetivos de este trabajo es el de realizar una modelación de la fluidinámica en base a los números adimensionales de Reynolds y Arquímedes. Esta modelación consistió en la obtención de una ecuación empírica para predecir la velocidad mínima de fluidización de determinadas partículas. Para la realización de este modelo se usaron los resultados tanto

del primer como del segundo experimento. Con ayuda del software Excel, fue posible desarrollar la siguiente expresión paramétrica:

$$Re_{mf} = 0.04271Ar^{0.60405} \quad (7.1)$$

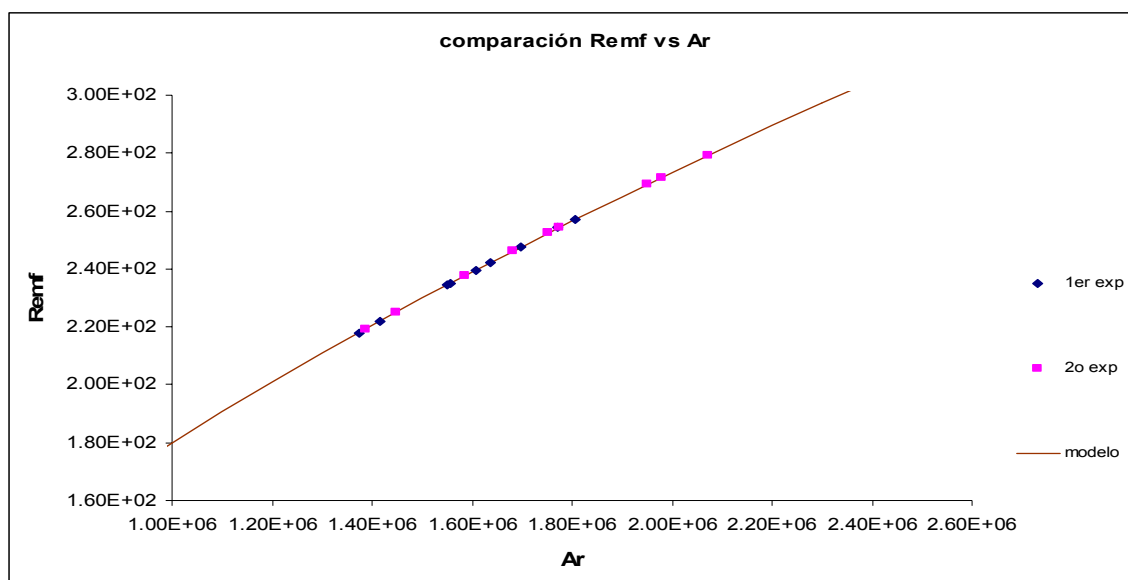


Figura 7.9: Gráfica de Reynolds mínimo de fluidización con respecto al número de Arquímedes. Se muestra también el modelo desarrollado en este trabajo.

Tabla 7.4 Valores de los primeros experimentos para realizar la gráfica de la figura 7.5

Presión [kPa]	Temp [°C]	ξ	Kn_p	U_{mf} (1os exp)[m/s]	Visc	ρ_{gas}	Re_{mf}	Ar
80	120°	8.66E-08	1.79E-05	1.553	1.304E-05	0.444859	255.853876	1791994.5
80	140°	9.41E-08	1.95E-05	1.399	1.381E-05	0.42251	206.739545	1261982.6
80	160°	1.02E-07	2.11E-05	1.771	1.459E-05	0.402438	235.921032	1566146.15
67	120°	1.04E-07	2.14E-05	1.812	1.305E-05	0.37199	249.45802	1717845.71
67	140°	1.13E-07	2.33E-05	1.909	1.382E-05	0.353419	235.85237	1565316.41
67	160°	1.22E-07	2.52E-05	2.01	1.46E-05	0.33671	223.936902	1437300.9
58.7	120°	1.18E-07	2.45E-05	1.952	1.306E-05	0.325587	235.109162	1557141.19
58.7	140°	1.29E-07	2.66E-05	1.889	1.382E-05	0.309397	204.243858	1237195.62
58.7	160°	1.39E-07	2.88E-05	1.878	1.46E-05	0.294814	183.149068	1038595.43

Tabla 7.5 Valores de los segundos experimentos para realizar la gráfica de la figura 7.5

Presión [kPa]	Temp [°C]	ρ	Kn_p	Umf (2os exp) [m/s]	visc	dens gas	Re_{mf}	Ar
80	120°	8.66E-08	1.79E-05	1.682	1.304E-05	0.444859	277.106387	2048707.51
80	140°	9.41E-08	1.95E-05	1.717	1.381E-05	0.42251	253.732522	1767219.63
80	160°	1.02E-07	2.11E-05	1.754	1.459E-05	0.402438	233.656403	1541421.27
67	120°	1.04E-07	2.14E-05	1.871	1.305E-05	0.37199	257.58055	1812098.77
67	140°	1.13E-07	2.33E-05	2.03	1.382E-05	0.353419	250.80163	1733200.85
67	160°	1.22E-07	2.52E-05	1.889	1.46E-05	0.33671	210.456123	1298815.05
58.7	120°	1.18E-07	2.45E-05	1.847	1.306E-05	0.325587	222.462409	1421853.07
58.7	140°	1.29E-07	2.66E-05	1.923	1.382E-05	0.309397	207.920031	1273462.92
58.7	160°	1.39E-07	2.88E-05	1.953	1.46E-05	0.294814	190.463328	1105587.5

Haciendo una comparación con la siguiente ecuación desarrollada por Patiño [5]:

$$Re_{mf} = 0.6587 Ar^{0.4067} \quad (7.2)$$

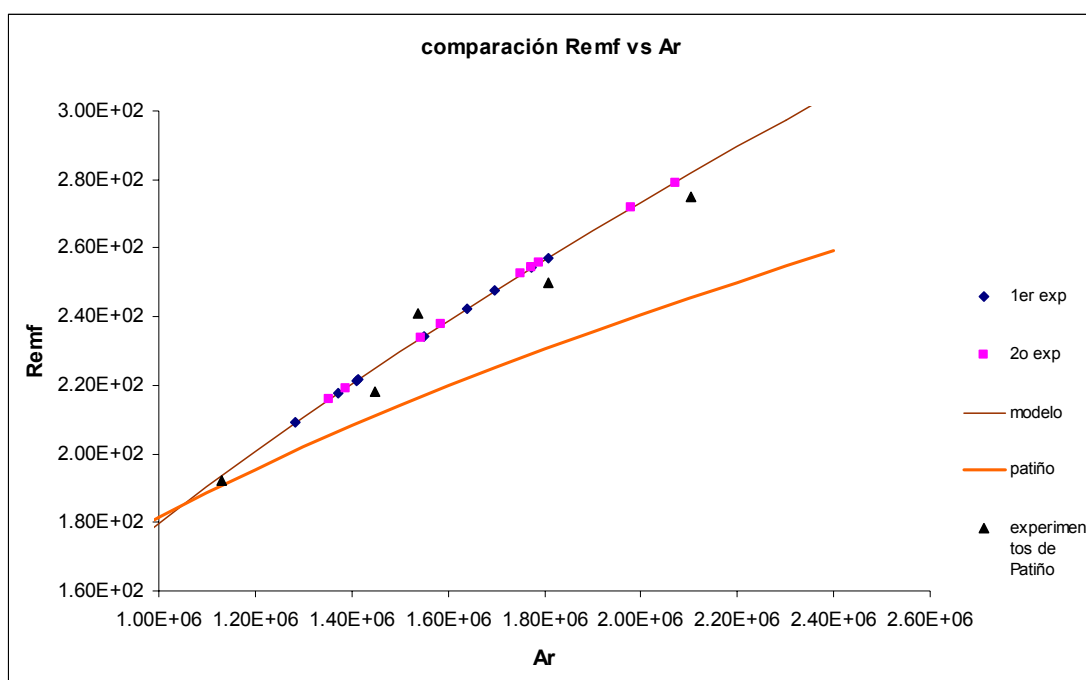


Figura 7.10 Comparación de la expresión desarrollada en este trabajo con la expresión de Patiño [5]

Cabe mencionar que en este trabajo solamente se experimento con pimienta chica, por lo tanto, la expresión (7.1) solamente sería aplicable a partículas con características físicas

muy similares a las de la pimienta chica. Patiño [5] experimentó con muchas más partículas de diferentes propiedades físicas, por lo tanto la expresión (7.2) tendrá un mayor grado de confiabilidad que la expresión (7.1) al calcular las velocidades mínimas de fluidización de distintas partículas.

7.2 Análisis de los experimentos de secado

A continuación se presentará un análisis de los resultados de experimentos de secado de pimienta chica variando la presión de operación, la temperatura y finalmente la velocidad de fluidización. Como se mencionó en el capítulo anterior, se realizaron dos rondas de experimentos de secado, donde la segundo se realizó bajo aproximadamente las mismas condiciones de presión y temperatura pero con una velocidad de fluidización mayor. Primeramente se presenta la variación del proceso de secado con respecto a la presión de operación de la primera ronda de experimentos.

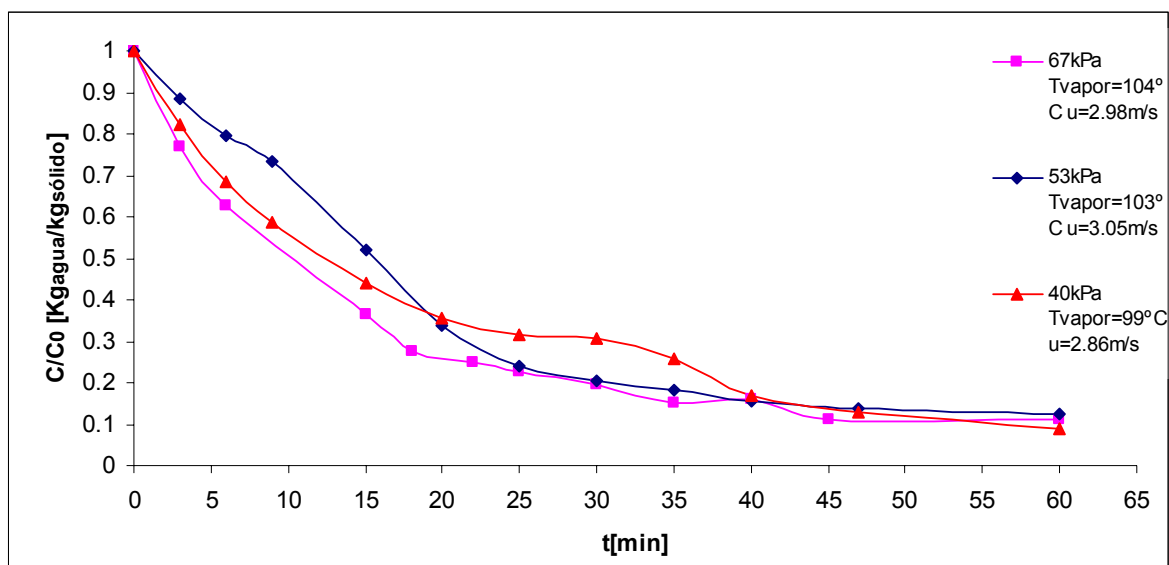


Figura 7.11 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes presiones con una temperatura del vapor de aproximadamente 103°C.

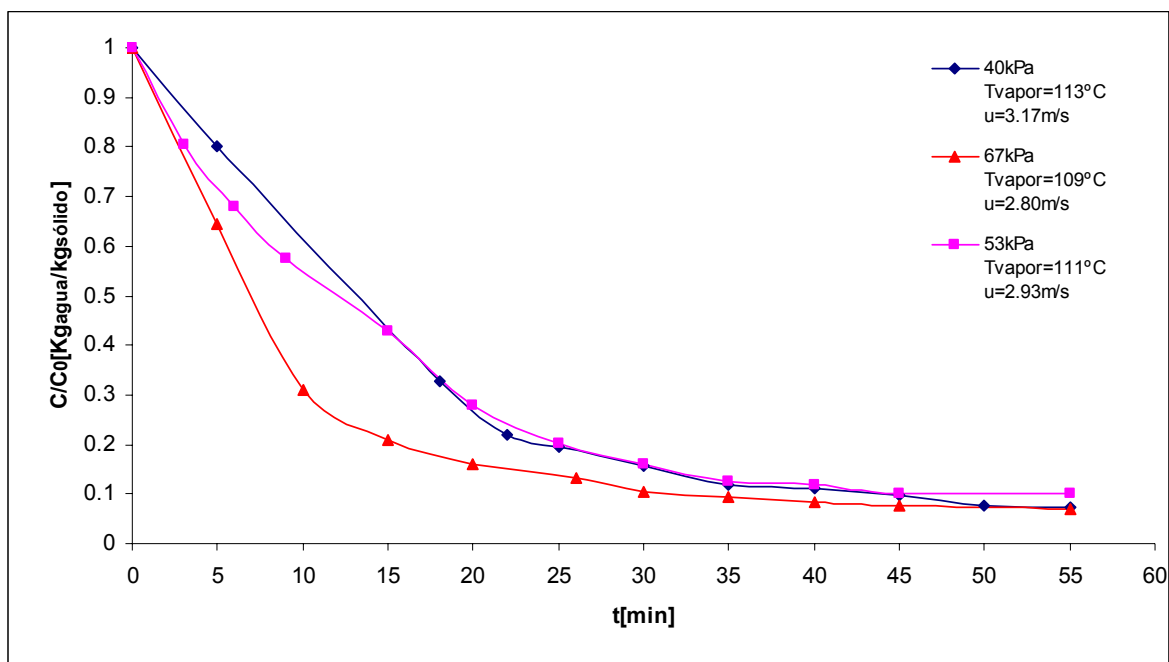


Figura 7.12 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes presiones con una temperatura del vapor de aproximadamente 110°C.

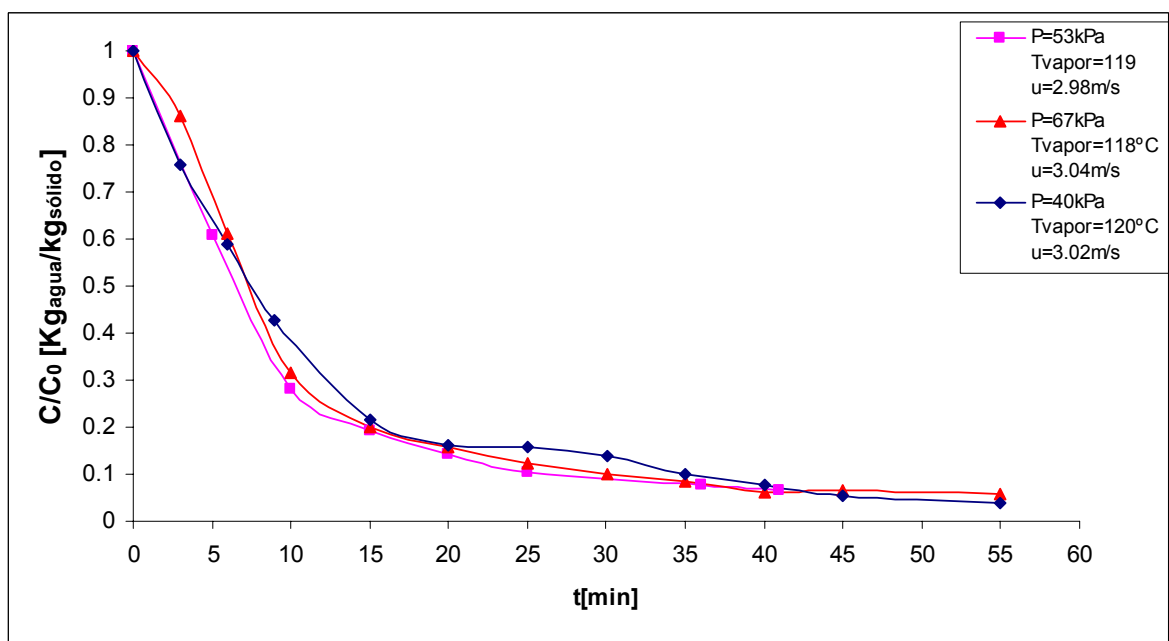


Figura 7.13 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes presiones con una temperatura del vapor de aproximadamente 120°C.

En la primera ronda de experimentos se observa poca influencia de la presión de operación sobre el proceso de secado, ya que la tendencia de secado es casi la misma en todas las curvas y la humedad final es igualmente o aproximadamente la misma para todas las presiones en cada temperatura. Ahora analizaremos nuevamente la influencia de la presión en la segunda ronda de experimentos, los cuales fueron desarrollados a una velocidad de fluidización mayor a los anteriores.

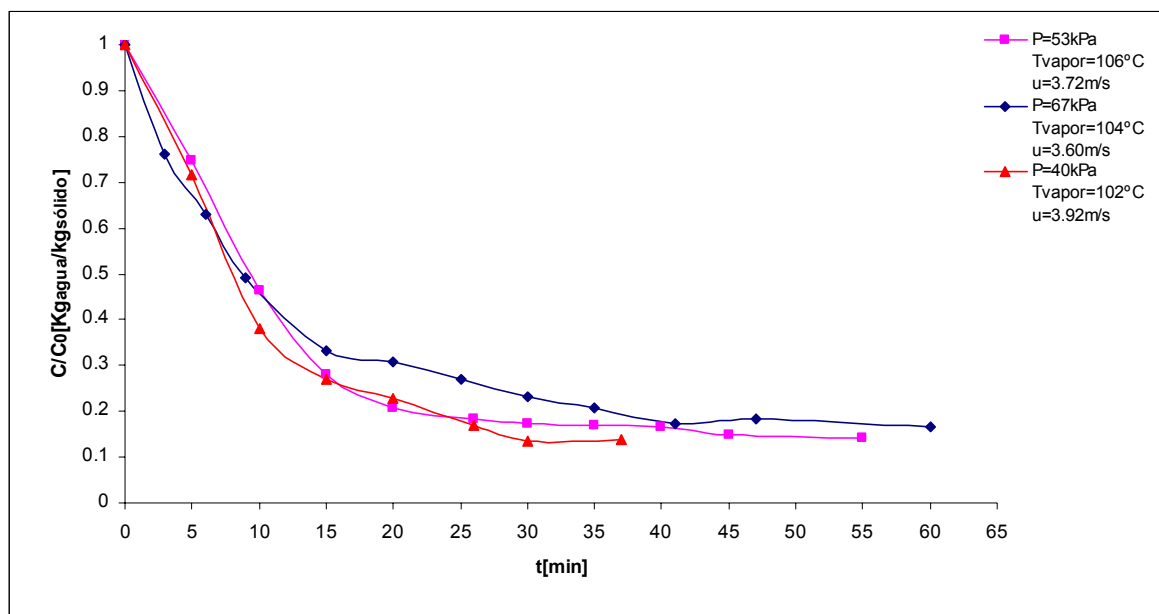


Figura 7.14 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes presiones con una temperatura del vapor de aproximadamente 103°C .

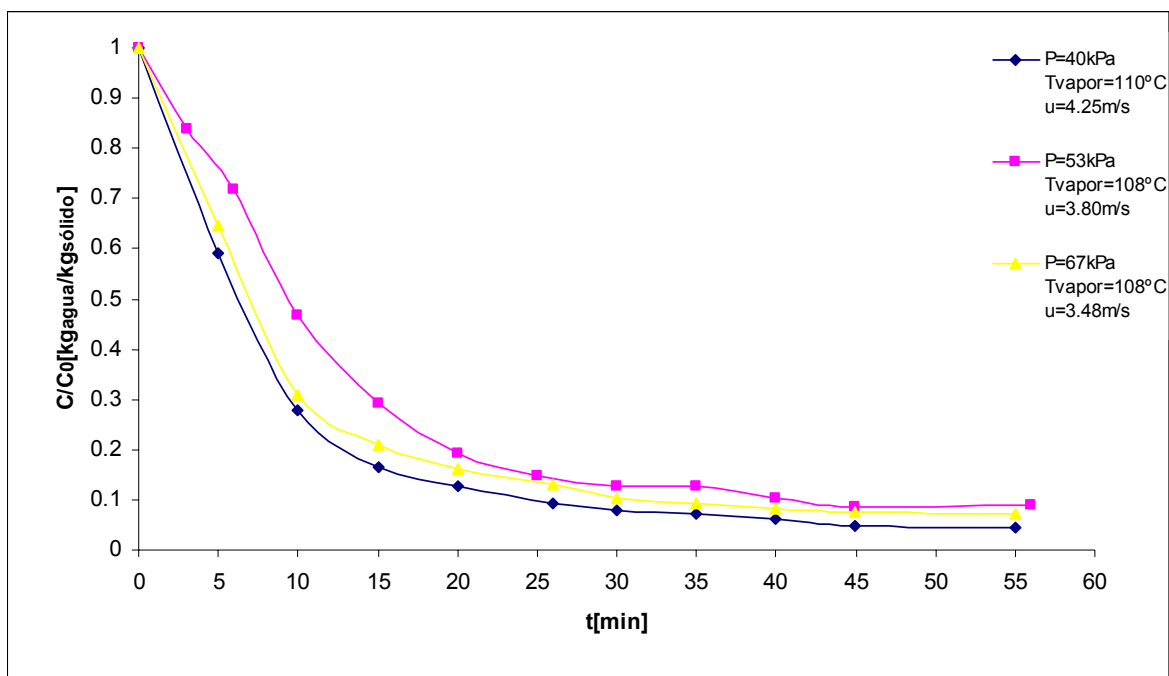


Figura 7.15 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes presiones con una temperatura del vapor de aproximadamente 110°C.

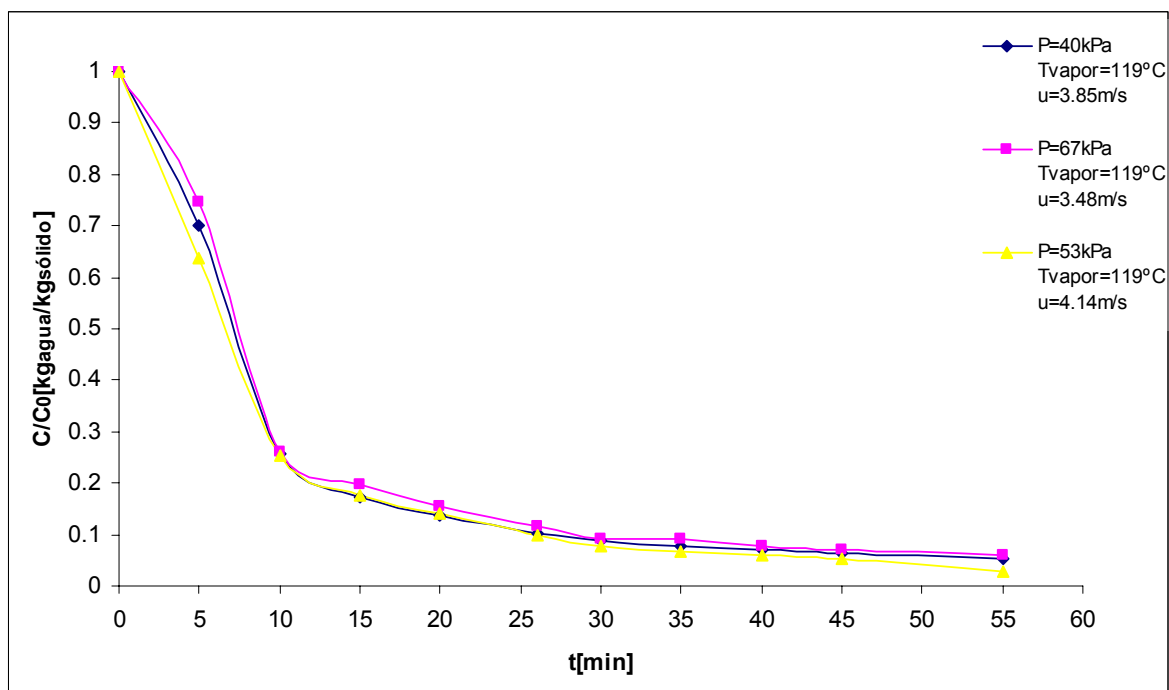


Figura 7.16 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes presiones con una temperatura del vapor de aproximadamente 120°C.

Puede observarse en esta segunda ronda de experimentos que la presión de operación, al igual que en la primera ronda de experimentos, ejerce poca influencia en el proceso de secado.

A continuación se estudiará la influencia de la temperatura de operación en el proceso de secado mediante las siguientes gráficas.

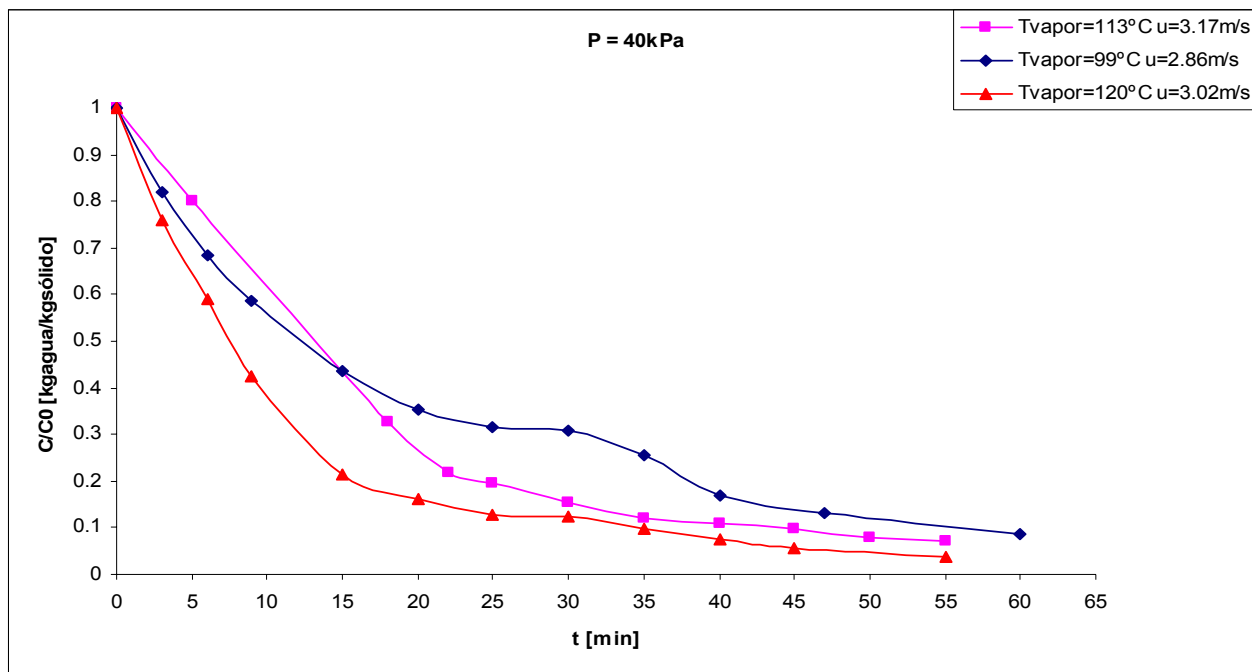


Figura 7.17 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes temperaturas de operación a 40kPa

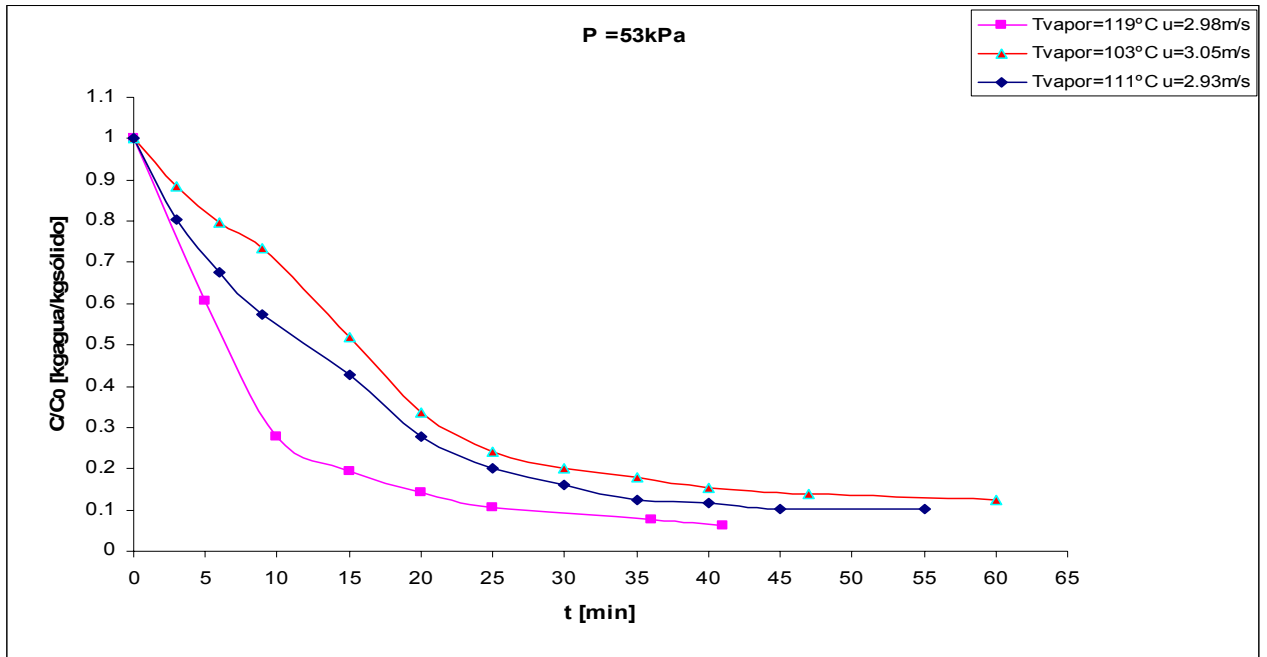


Figura 7.18 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes temperaturas de operación e igual presión a 53kPa

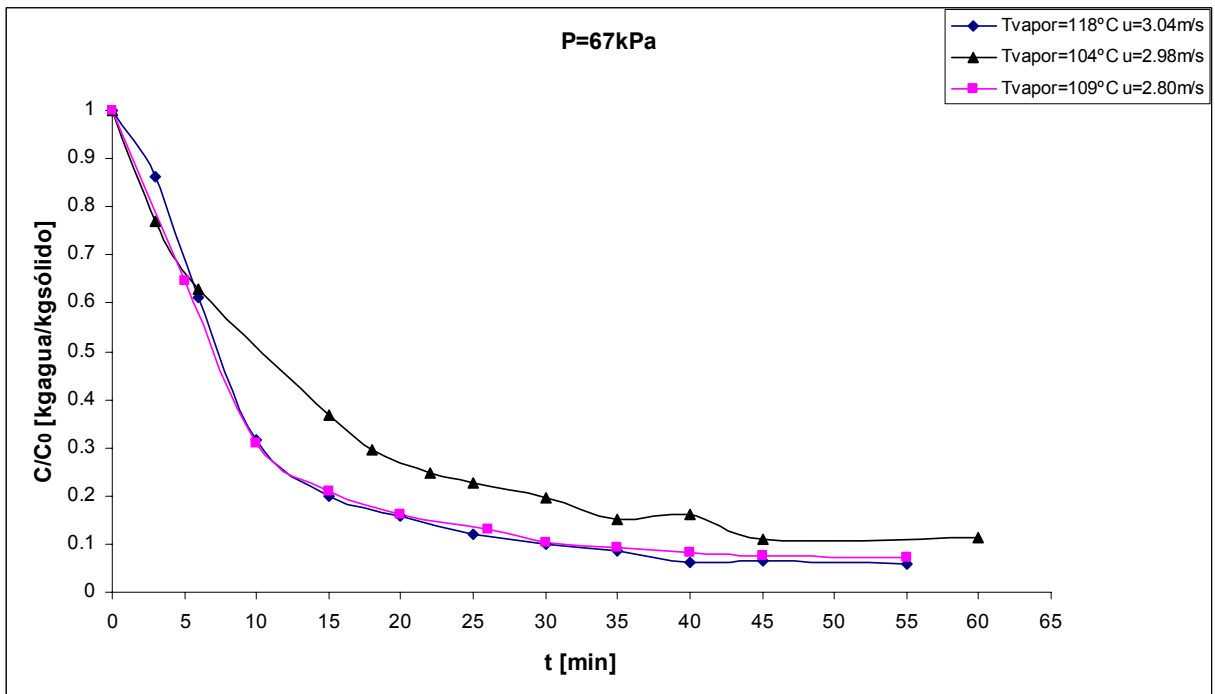


Figura 7.19 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes temperaturas de operación e igual presión a 67kPa

Contrario a la presión, la temperatura de operación influye notablemente en el proceso de secado. En esta primera ronda de experimentos se puede observar que, al aumentar la temperatura de operación, también aumenta la velocidad de secado y la remoción de humedad final, ya que al aumentar la temperatura se alcanza la humedad final más rápidamente y la eliminación de la humedad es mayor que a temperaturas menores. A continuación se analizará la influencia de la temperatura en la segunda ronda de experimentos a mayor velocidad de fluidización.

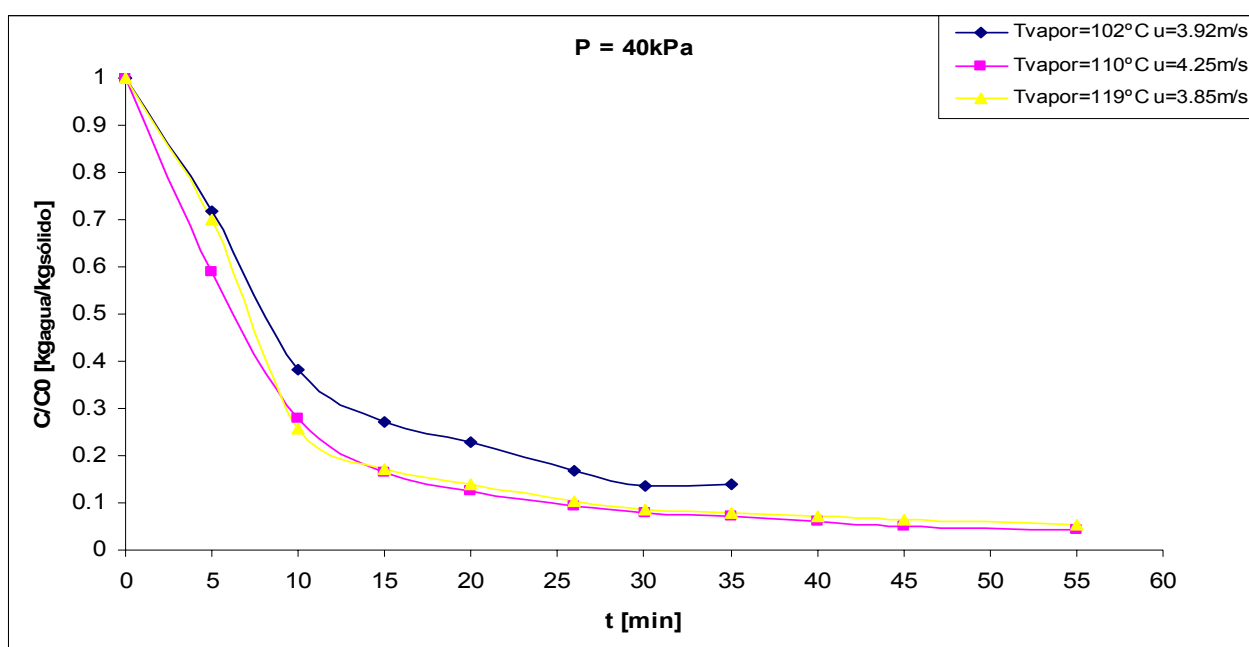


Figura 7.20 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes temperaturas de operación e igual presión a 40kPa

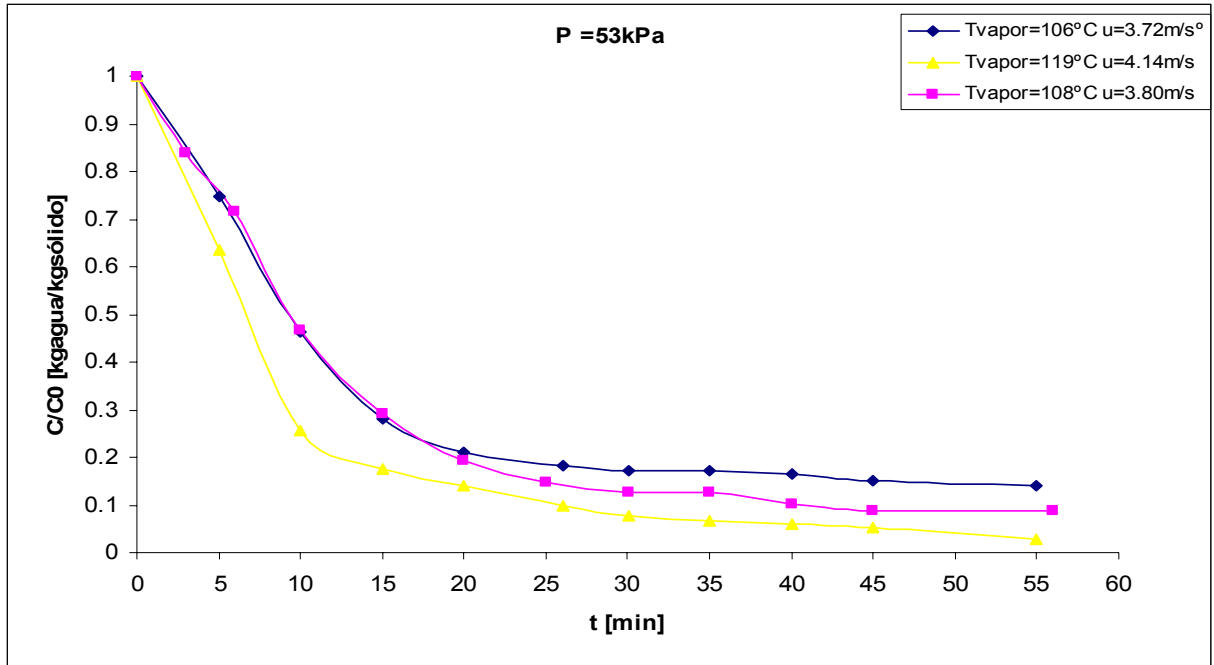


Figura 7.21 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes temperaturas de operación e igual presión a 53kPa

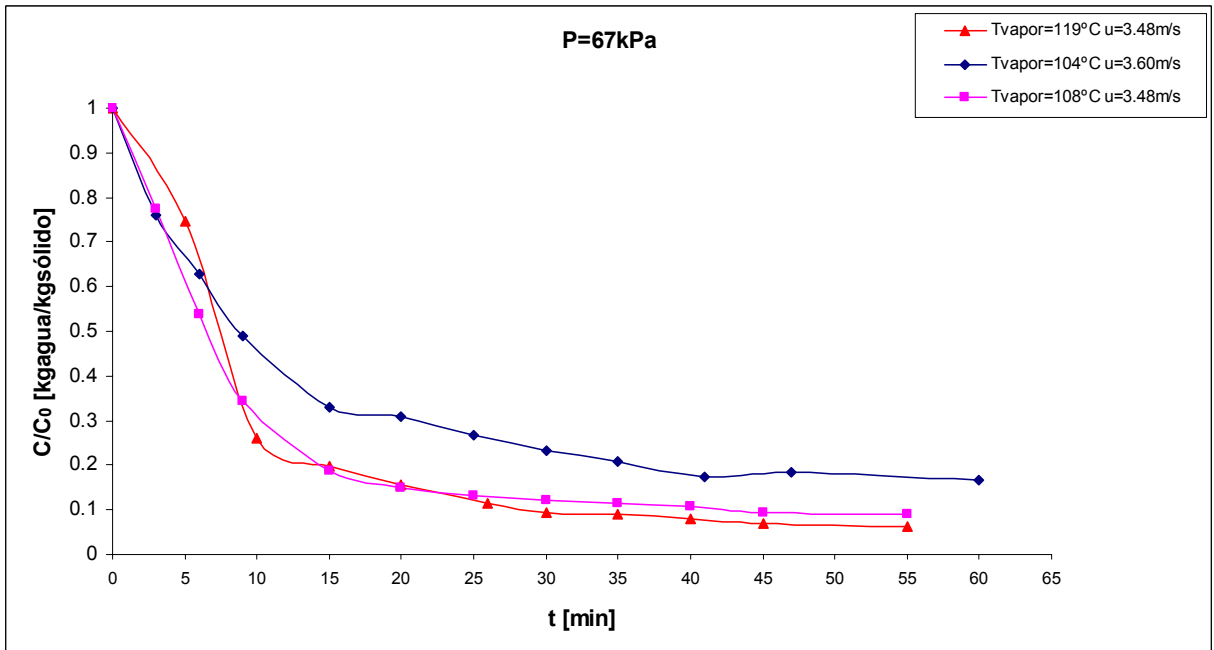


Figura 7.22 Comparación de las curvas de secado de procesos a diferentes temperaturas de operación e igual presión a 67kPa

En esta segunda ronda de experimentos se observa un comportamiento similar al de la primera ronda, ya que la velocidad de secado y el porcentaje de humedad final removida aumentan al incrementar la temperatura de operación.

Las tendencias encontradas en los experimentos de secado anteriores son similares a las encontradas por Cabrera [14]. Por lo tanto, podemos concluir de estos experimentos que, contrario al estudio de fluidinámica, la temperatura en el proceso de secado influye notablemente en la remoción de humedad y la presión en estos mismos procesos no influye notablemente o su influencia es nula al remover humedad de las partículas. El uso de presiones bajas en el secado con vapor sobrecalentado solamente es útil para alcanzar temperaturas bajas del vapor y de esta manera, trabajar en forma segura al realizarse secados de materiales inflamables o térmicamente degradables.

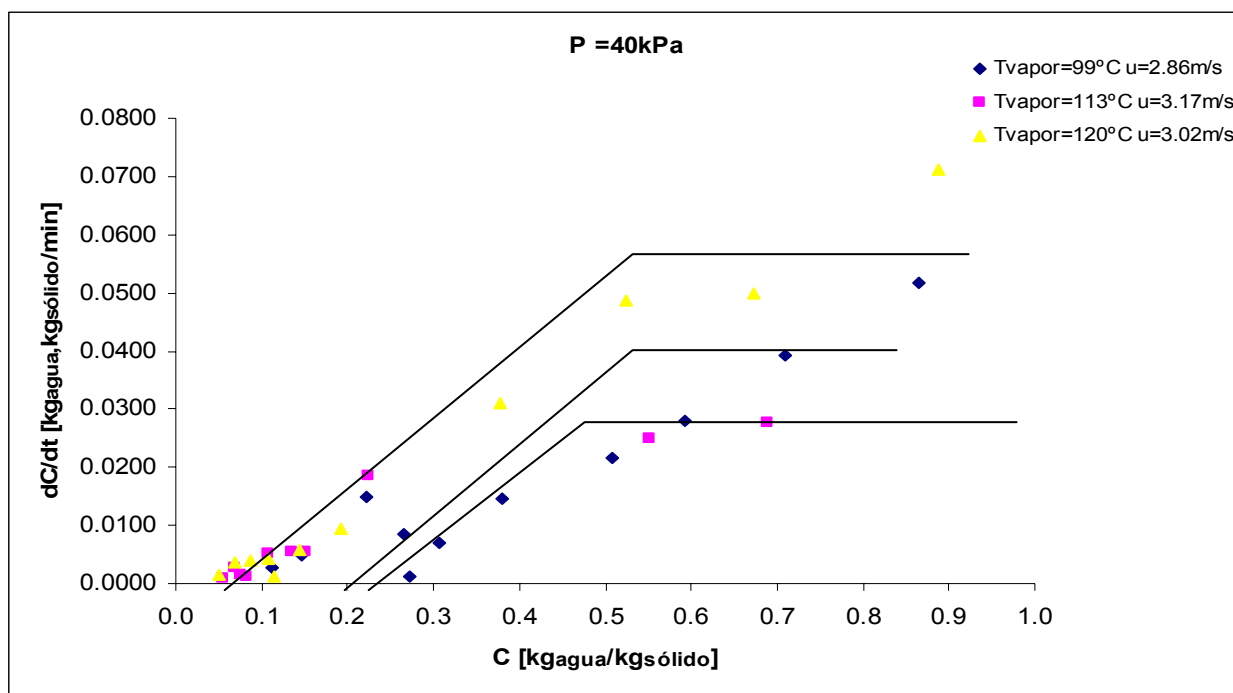


Figura 7.23 Gráfica de velocidad de secado para 3 distintas temperaturas a 40kPa

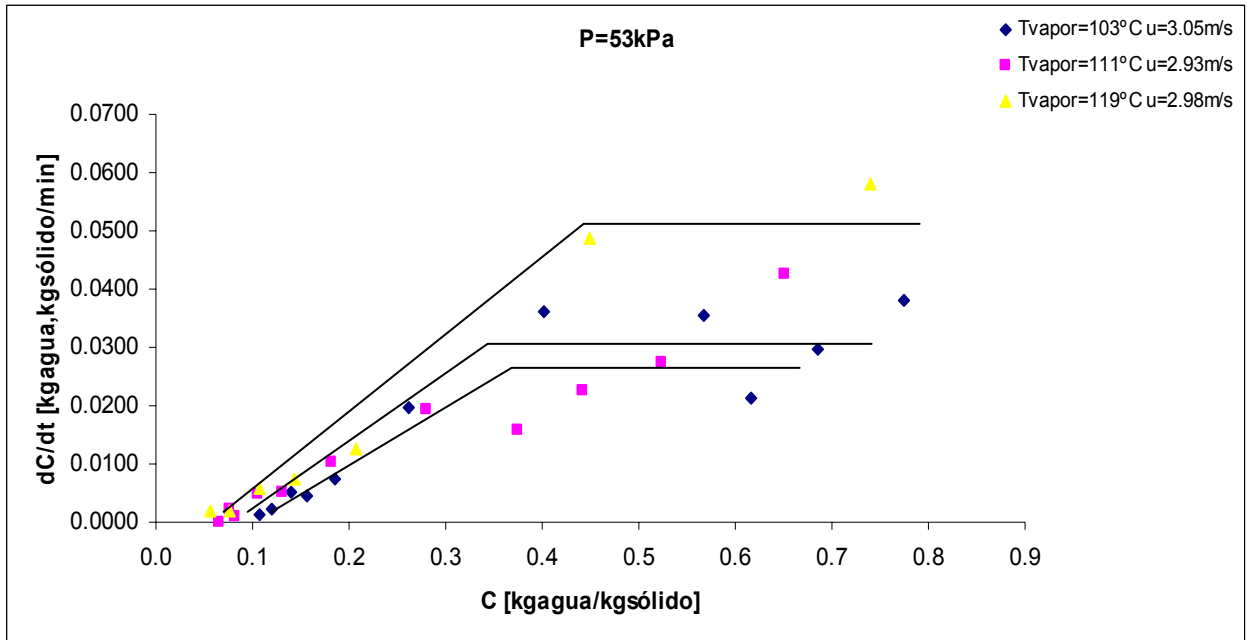


Figura 7.24 Gráfica de velocidad de secado para 3 distintas temperaturas a 53kPa

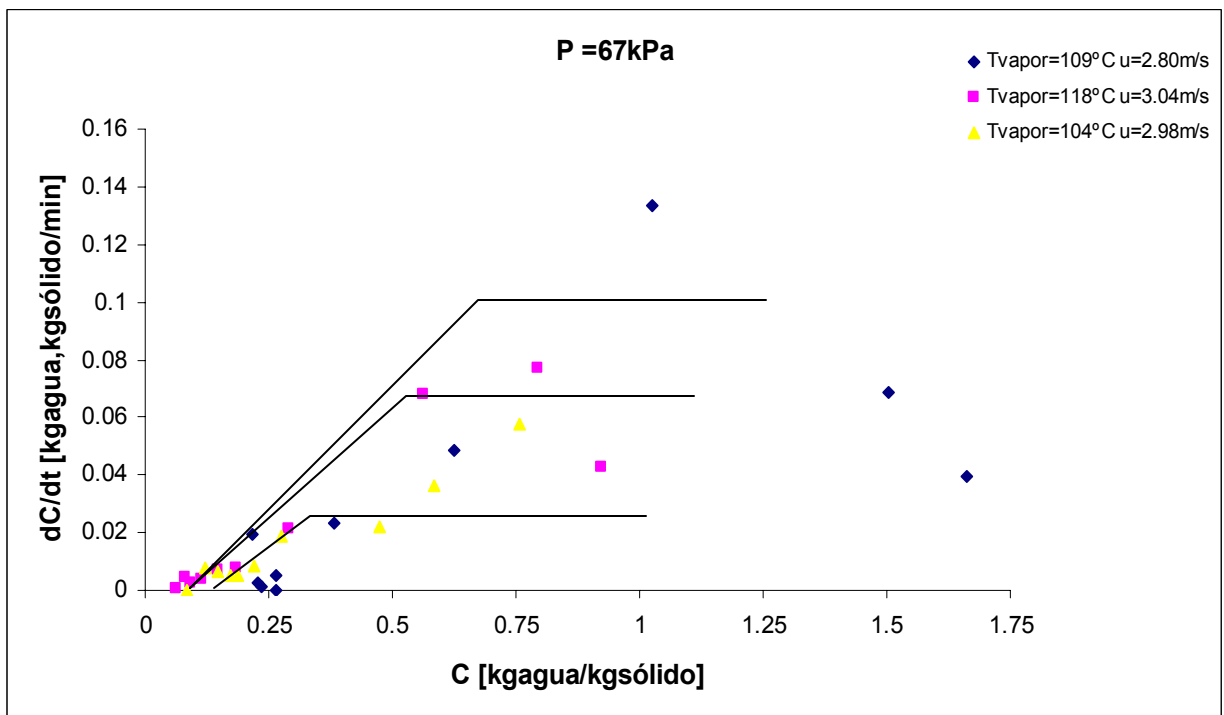


Figura 7.25 Gráfica de velocidad de secado para 3 distintas temperaturas a 67kPa

Es posible observar como se alcanza una mayor velocidad de secado en el periodo constante de secado a temperaturas altas.

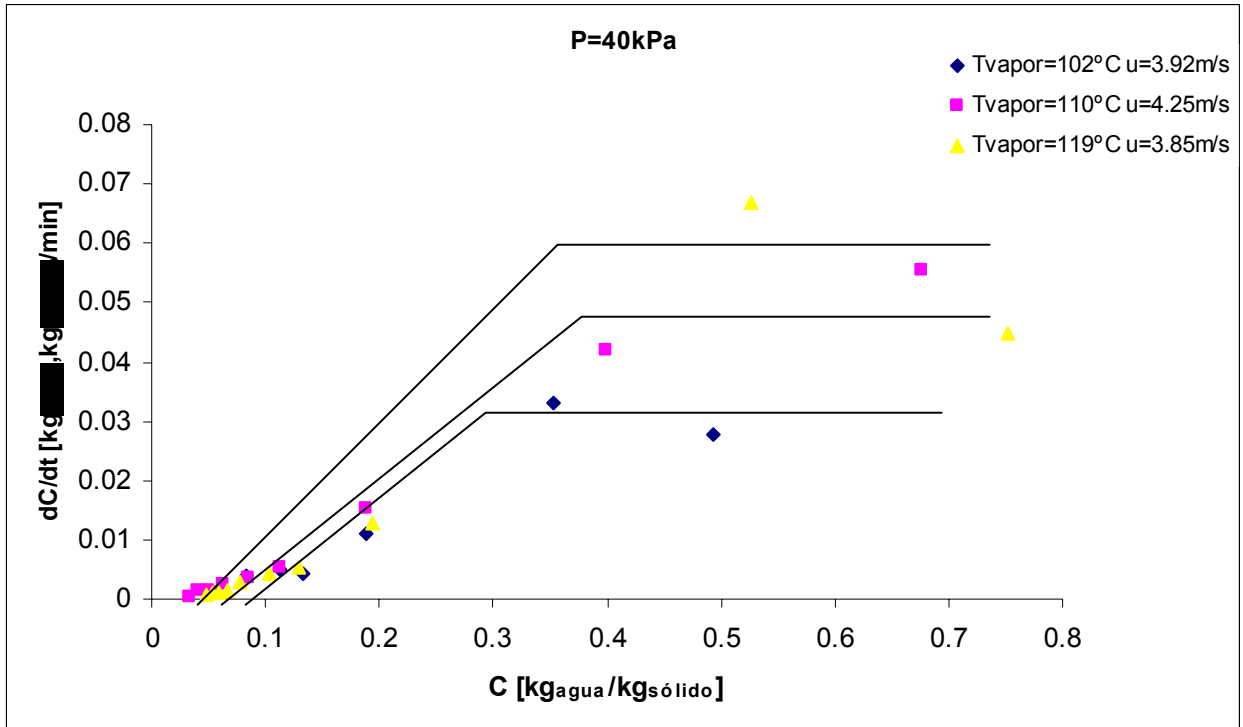


Figura 7.26 Gráfica de velocidade de secado para 3 distintas temperaturas a 40kPa

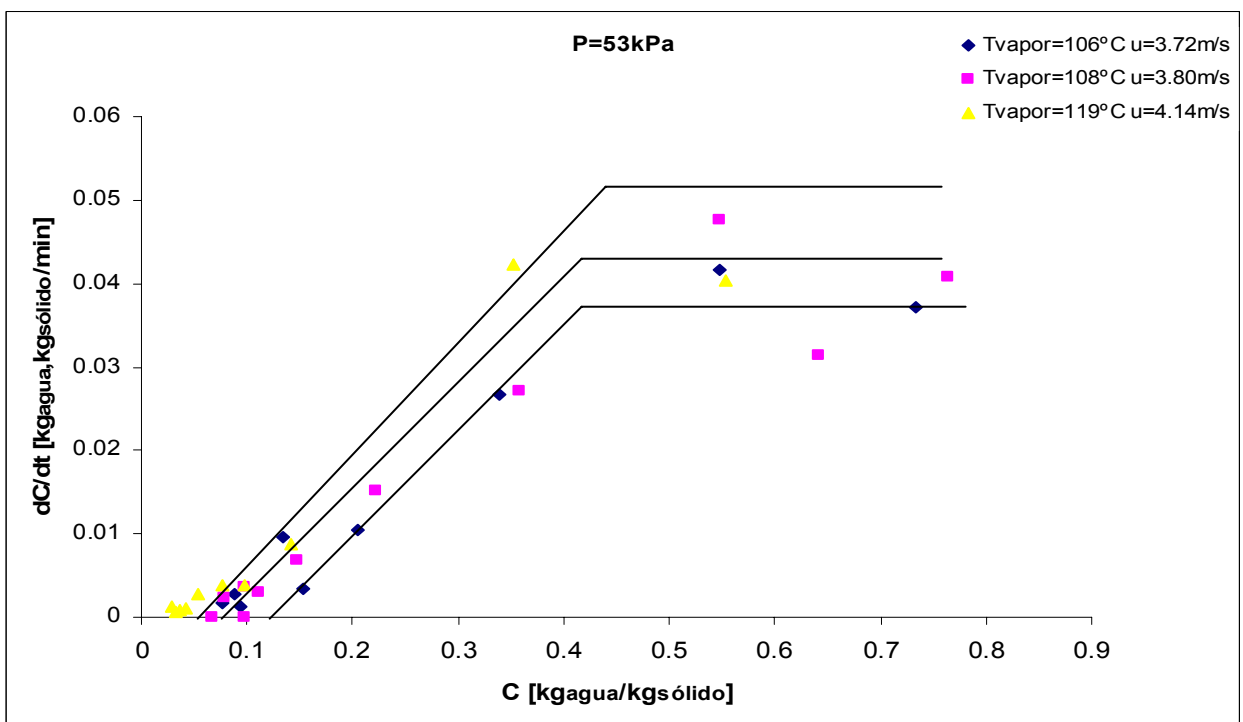


Figura 7.27 Gráfica de velocidade de secado para 3 distintas temperaturas a 53kPa

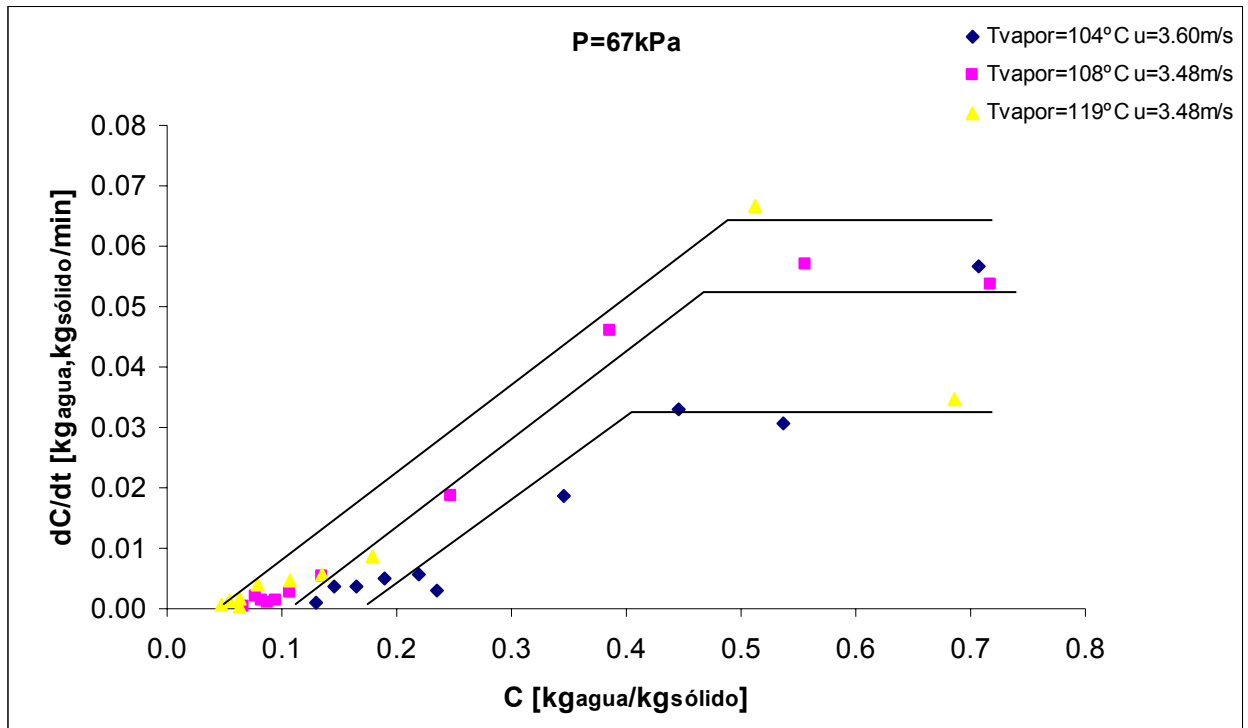


Figura 7.28 Gráfica de velocidad de secado para 3 distintas temperaturas a 67kPa

Las tres figuras previas muestran la velocidad de secado con respecto a la humedad de la segunda ronda de experimentos. Estos resultados muestran la misma tendencia que los resultados de la primera ronda de experimentos. Es posible alcanzar una mayor velocidad durante el periodo constante de secado cuando la temperatura de operación

aumenta.

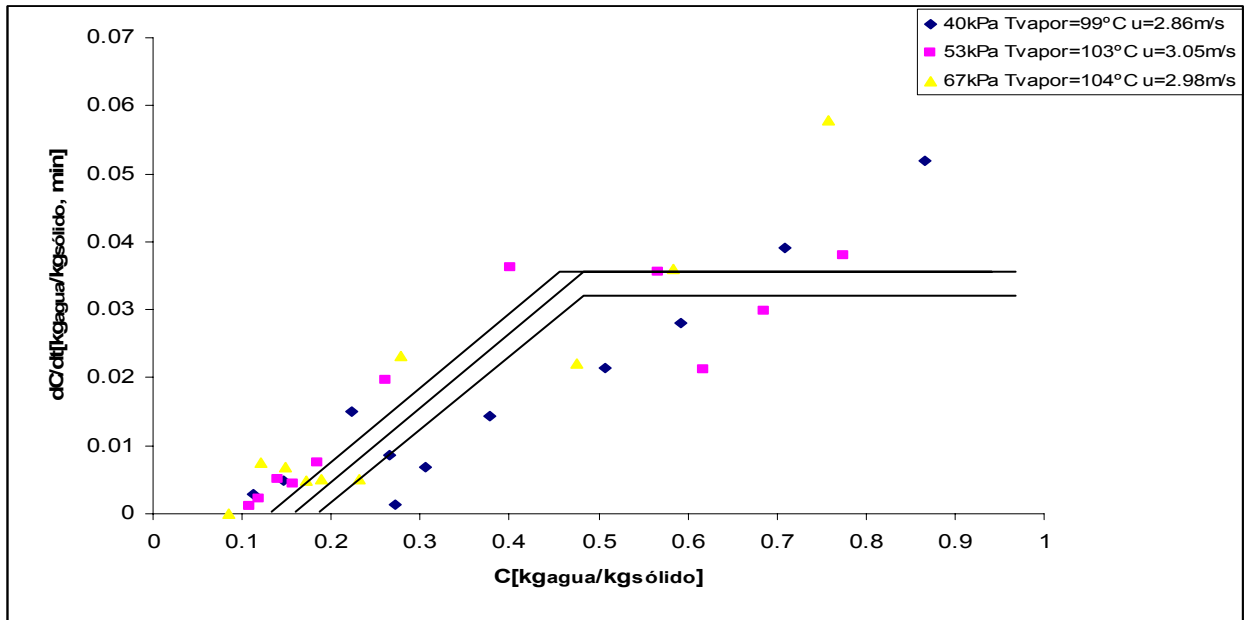


Figura 7.29 Gráfica de velocidad de secado a tres distintas presiones de operación

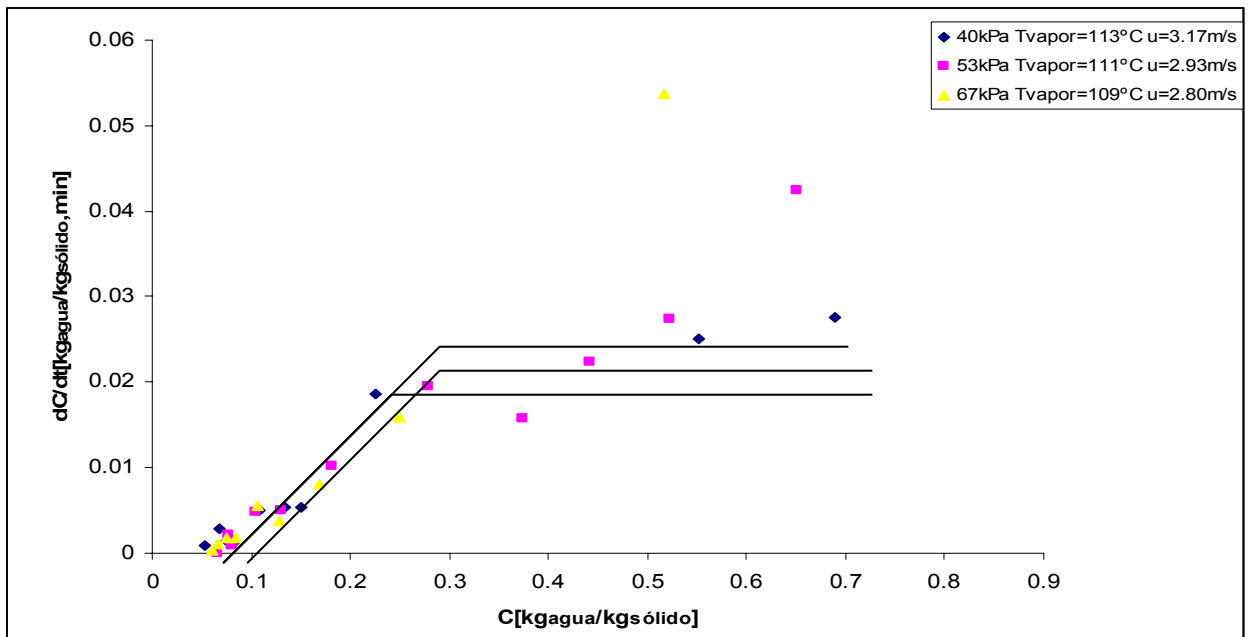


Figura 7.30 Gráfica de velocidad de secado a tres distintas presiones de operación

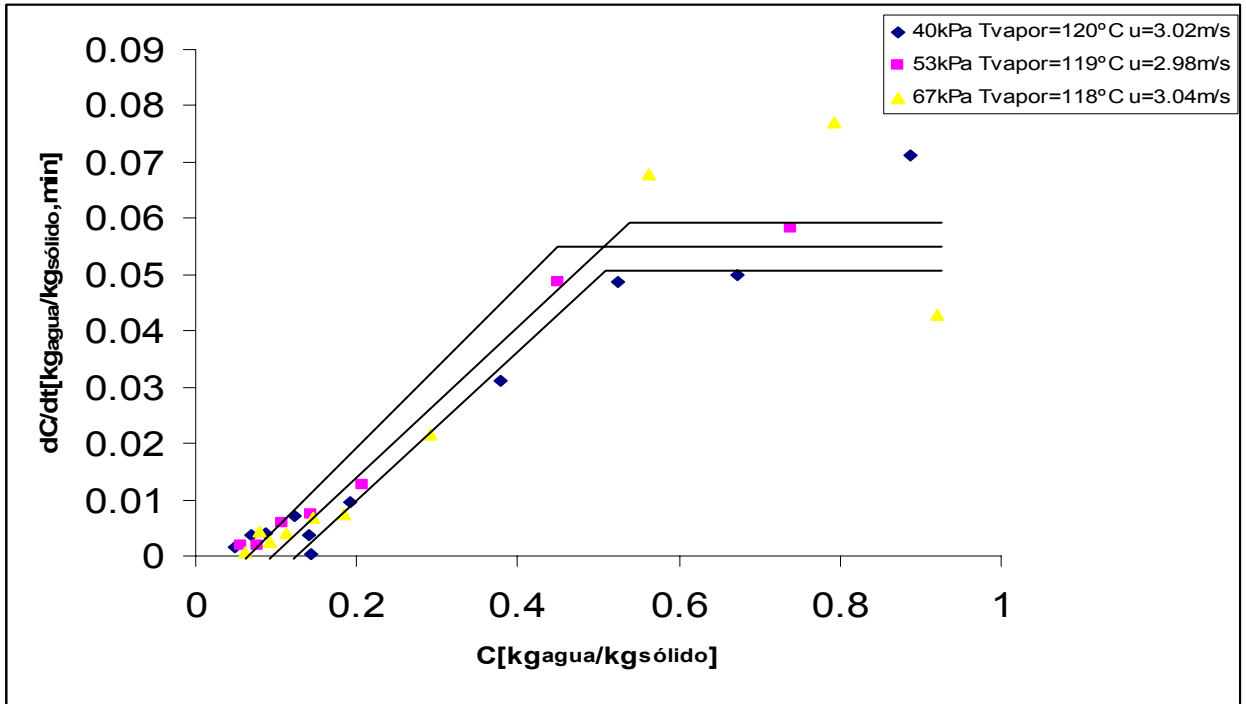


Figura 7.31 Gráfica de velocidad de secado a tres distintas presiones de operación

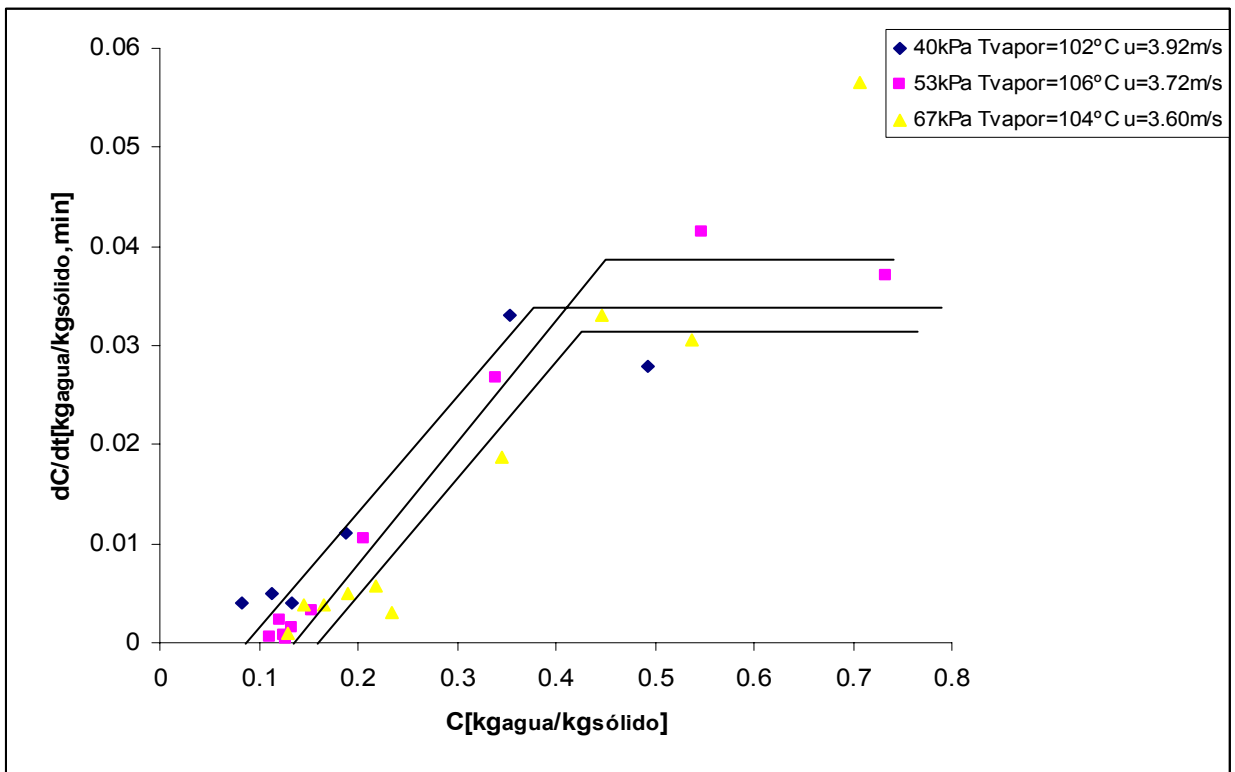


Figura 7.32 Gráfica de velocidad de secado a tres distintas presiones de operación

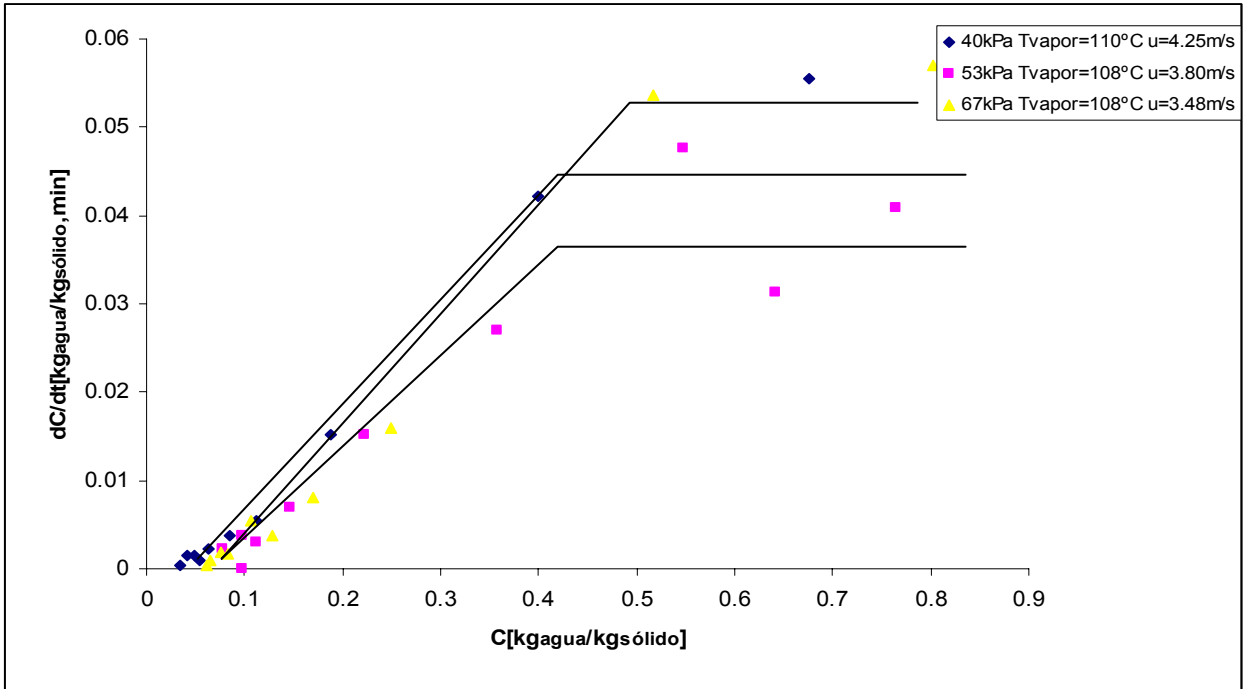


Figura 7.33 Gráfica de velocidad de secado a tres distintas presiones de operación

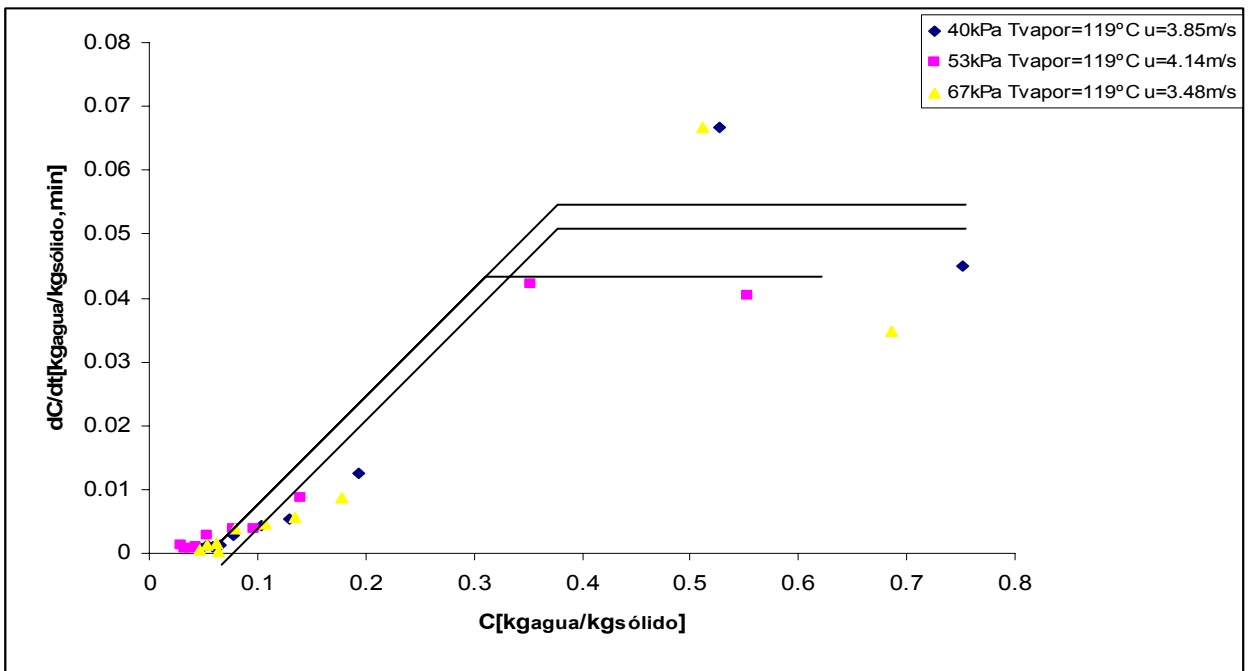


Figura 7.34 Gráfica de velocidad de secado a tres distintas presiones de operación

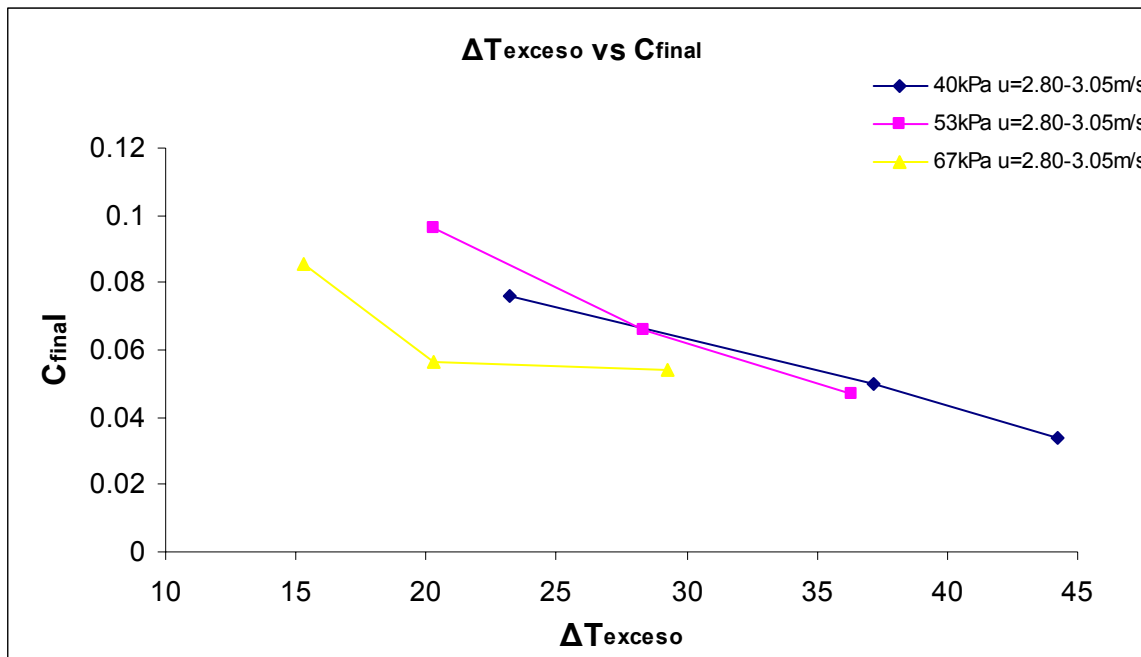


Figura 7.35 Variación de la humedad final con respecto a ΔT en los 1os experimentos

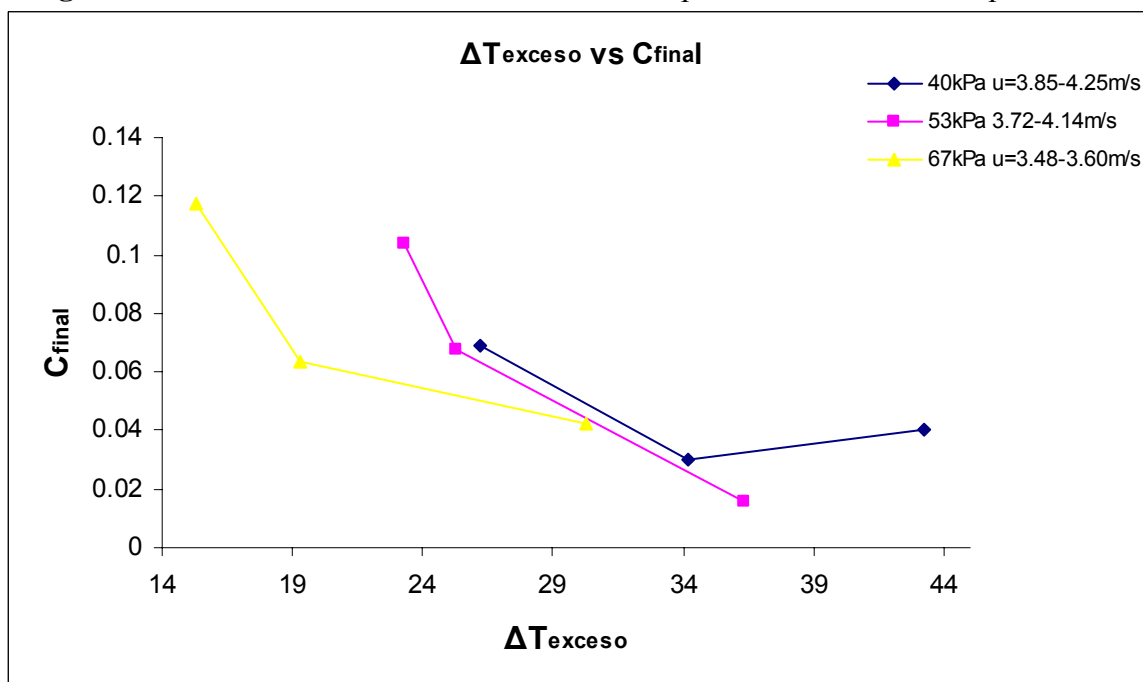


Figura 7.36 Variación de la humedad final con respecto a ΔT en los 2os experimentos

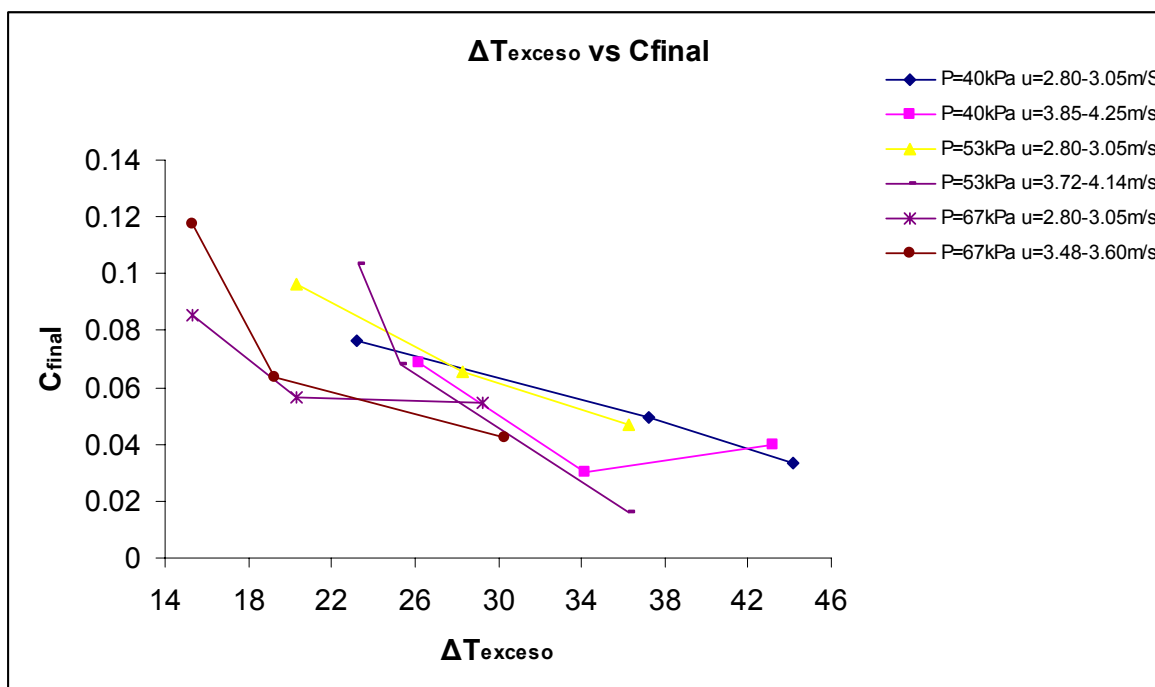


Figura 7.37 Variación de la humedad final con respecto a ΔT en ambos experimentos

En las figuras 7.35 y 7.36 es posible observar que bajo determinada presión de operación, la cantidad de humedad final disminuye al aumentar la diferencia entre la temperatura de operación y la temperatura de saturación del vapor (ΔT_{exceso}). Esto se debe a que la temperatura de operación es mucho mayor a la temperatura de saturación. Con esto es posible reafirmar que la cantidad final de humedad en el sólido depende de en gran medida de la temperatura a la que se está trabajando. También se puede observar que la humedad final en el producto depende muy poco a nada de la presión de operación, ya que la variación de la humedad final al igual que la velocidad de secado en cada presión no es muy significativa. La figura 7.12 muestra un resultado un poco incongruente en la presión de 67kPa, ya que la velocidad de secado fue mayor que en las otras dos gráficas. Esto pudo deberse a la dificultad de controlar la temperatura del vapor en el equipo durante esa condición. Ahora se presentan las gráficas de variación de humedad final con respecto a temperatura en exceso de los experimentos que fueron repetidos:

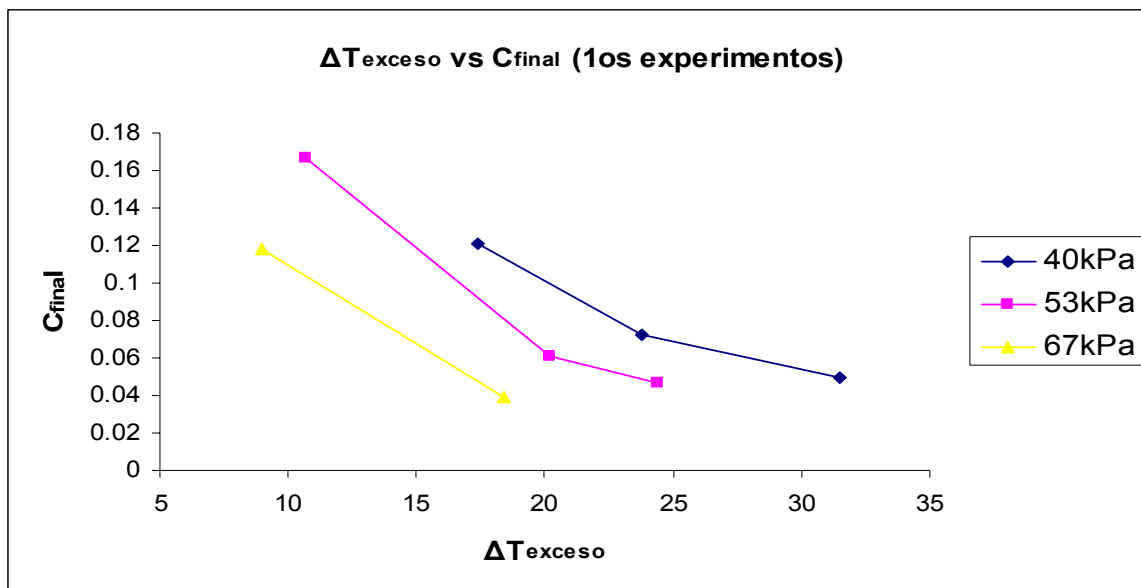


Figura 7.38

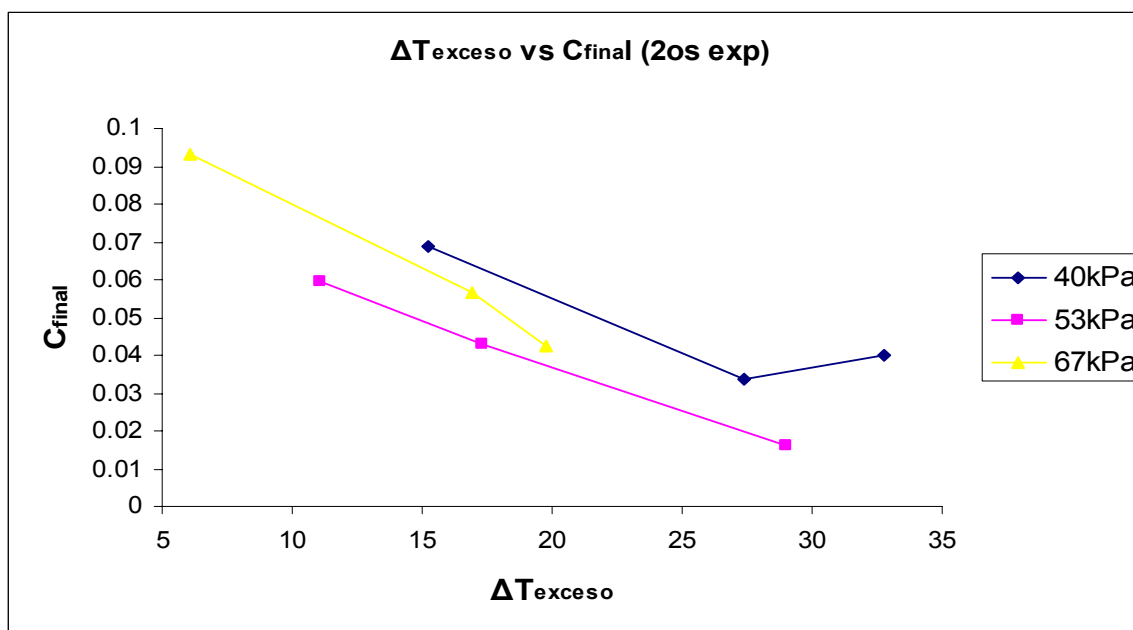


Figura 7.39

En estos experimentos se muestra la misma tendencia que en los anteriores. Finalmente estudiaremos el efecto que produce la velocidad de fluidización en el secado bajo condiciones similares en el proceso.

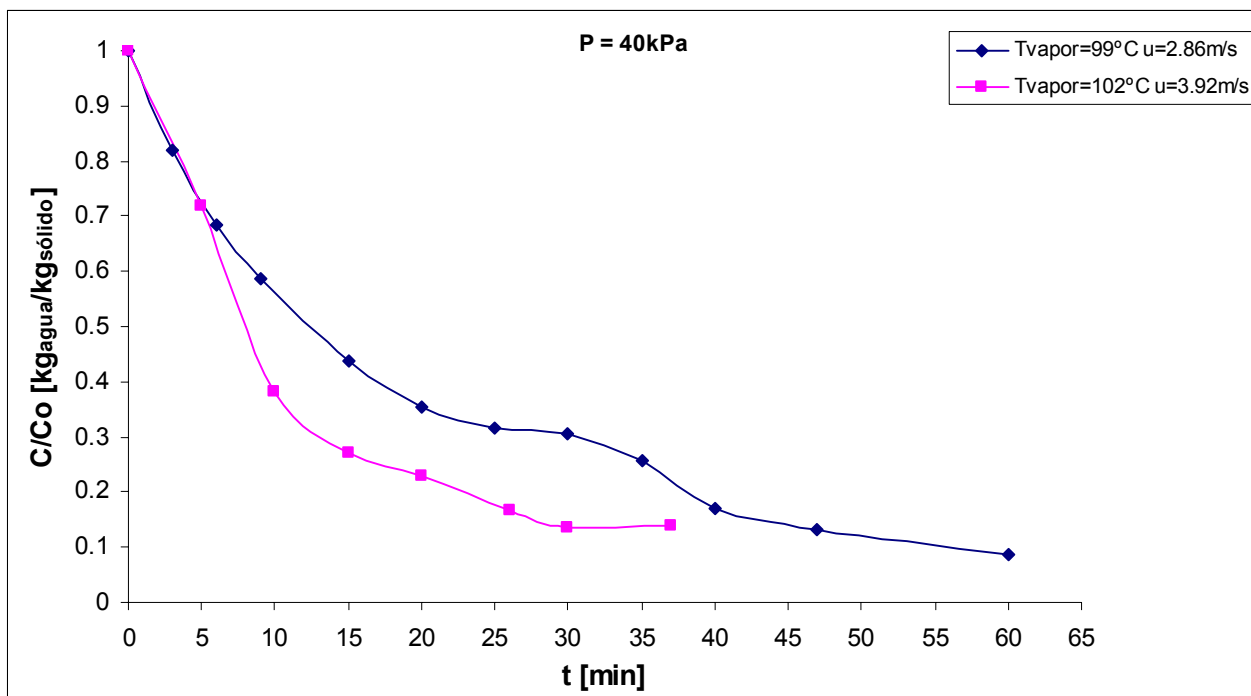


Figura 7.40 Efecto de la velocidad de fluidización sobre el proceso de secado

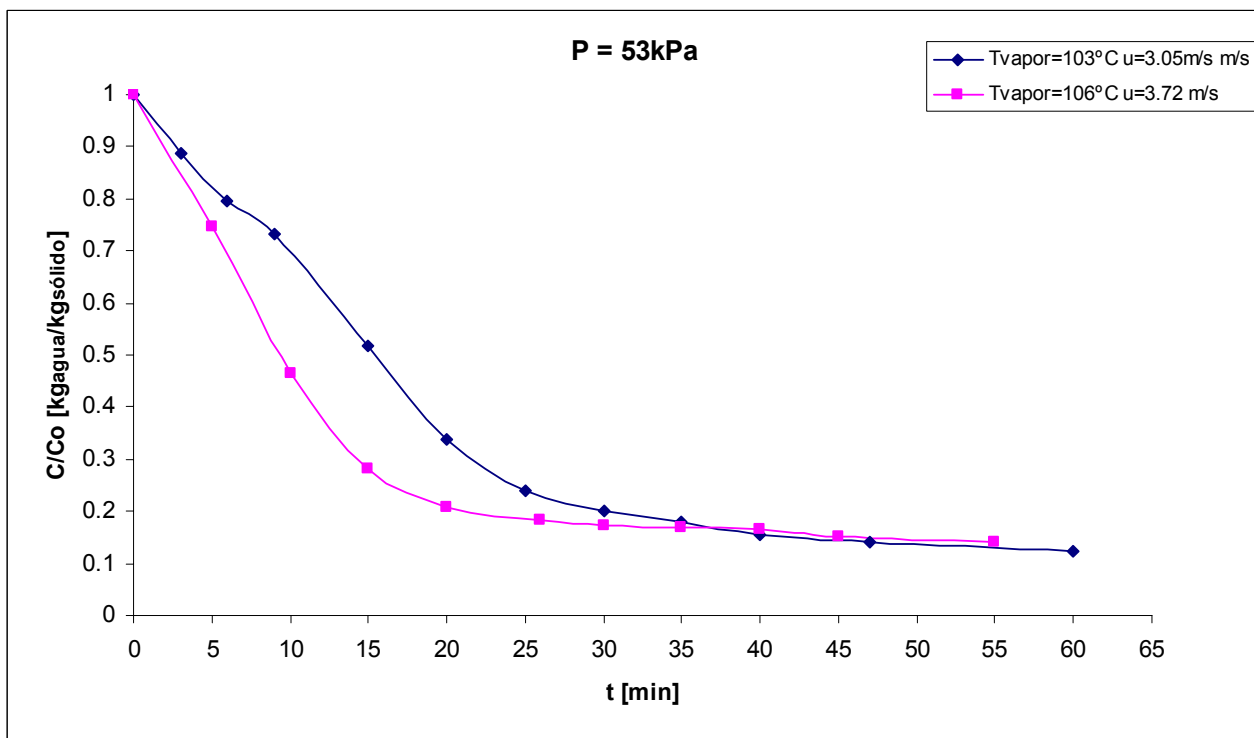


Figura 7.41 Efecto de la velocidad de fluidización sobre el proceso de secado

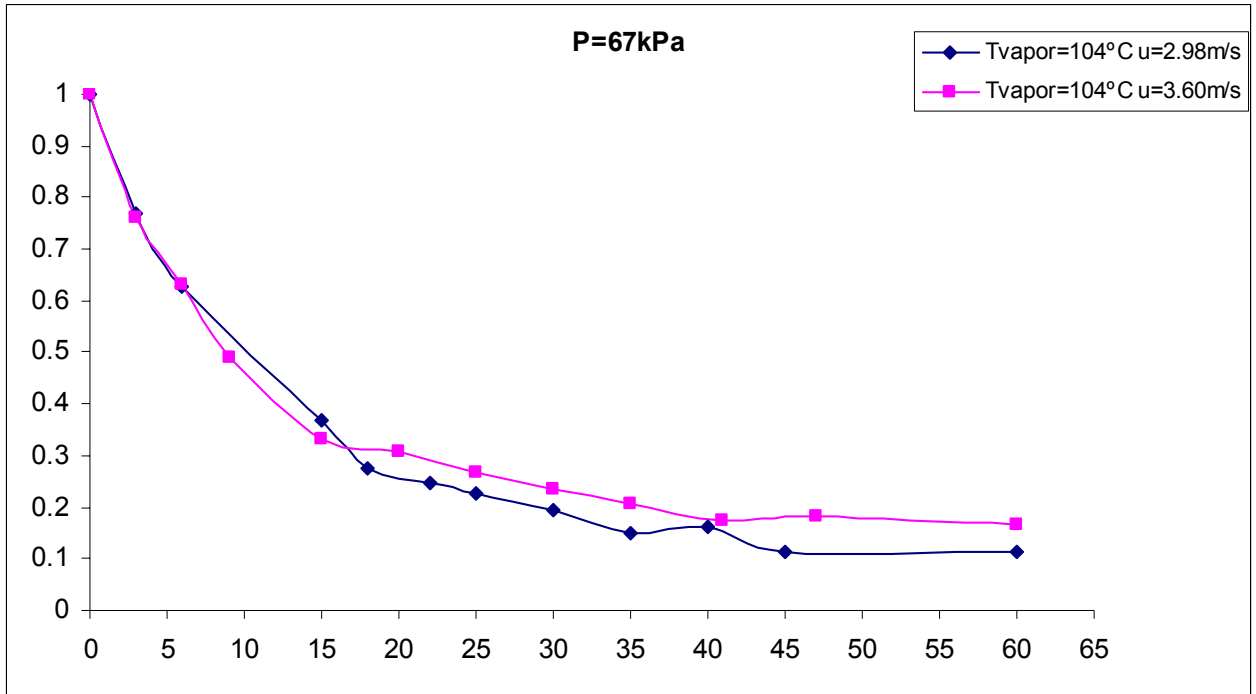


Figura 7.42 Efecto de la velocidad de fluidización sobre el proceso de secado

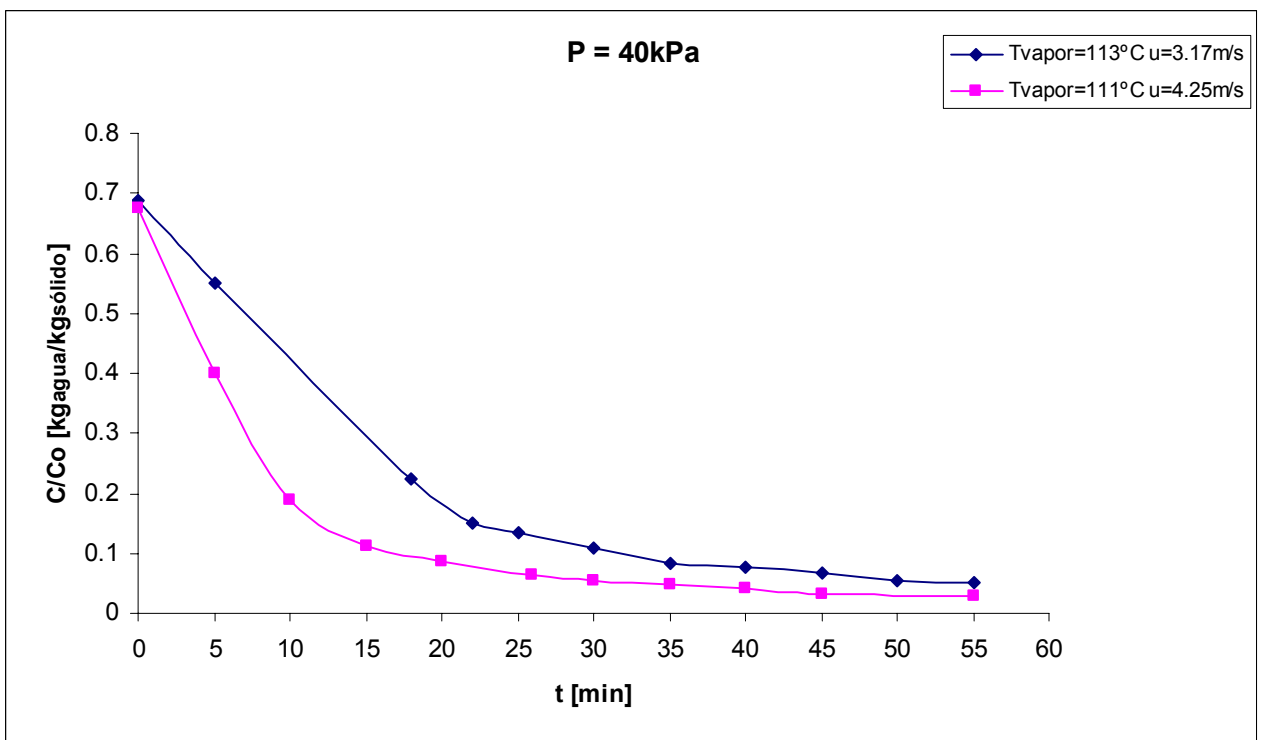


Figura 7.43 Efecto de la velocidad de fluidización sobre el proceso de secado

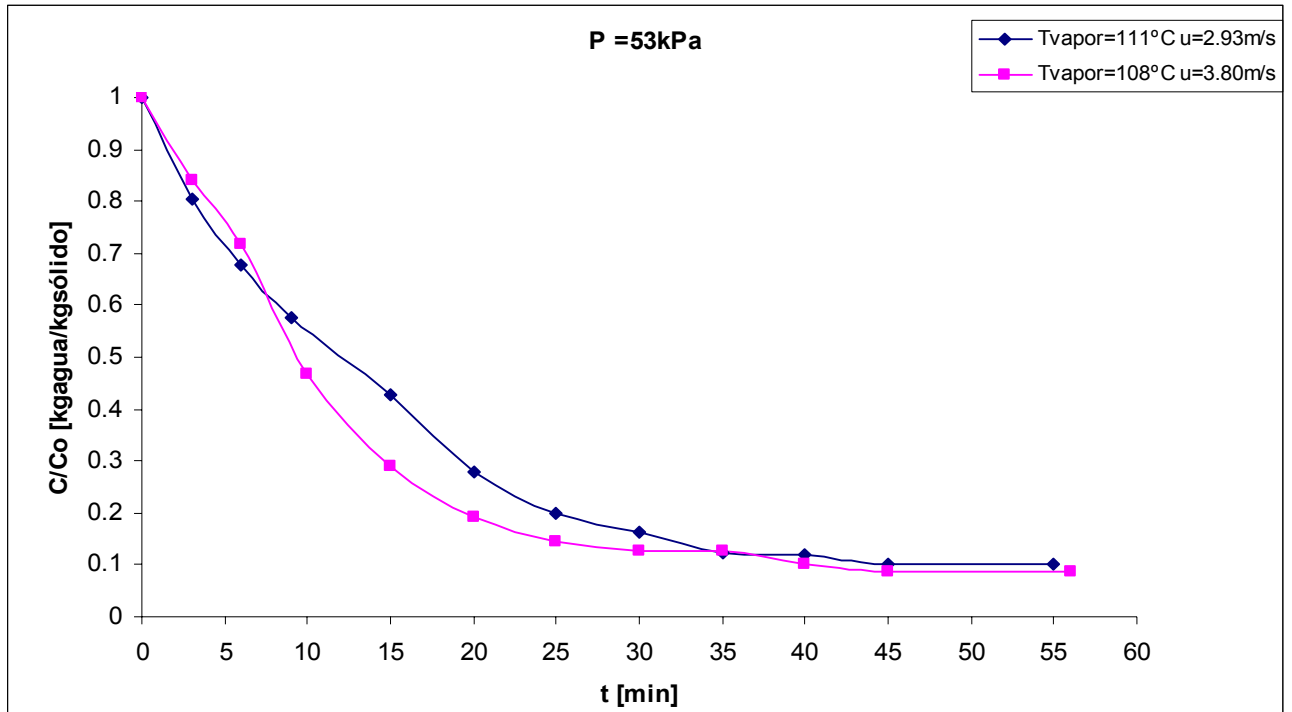


Figura 7.44 Efecto de la velocidad de fluidización sobre el proceso de secado

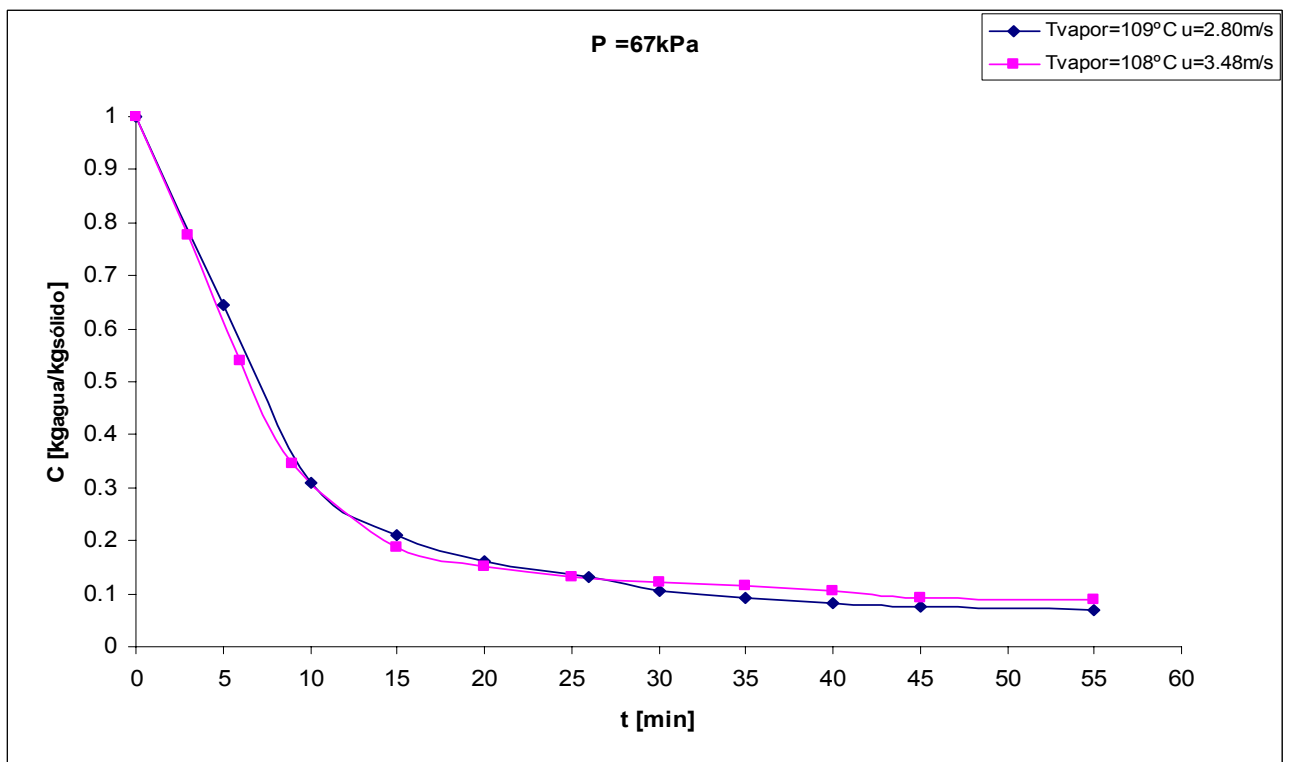


Figura 7.45 Efecto de la velocidad de fluidización sobre el proceso de secado

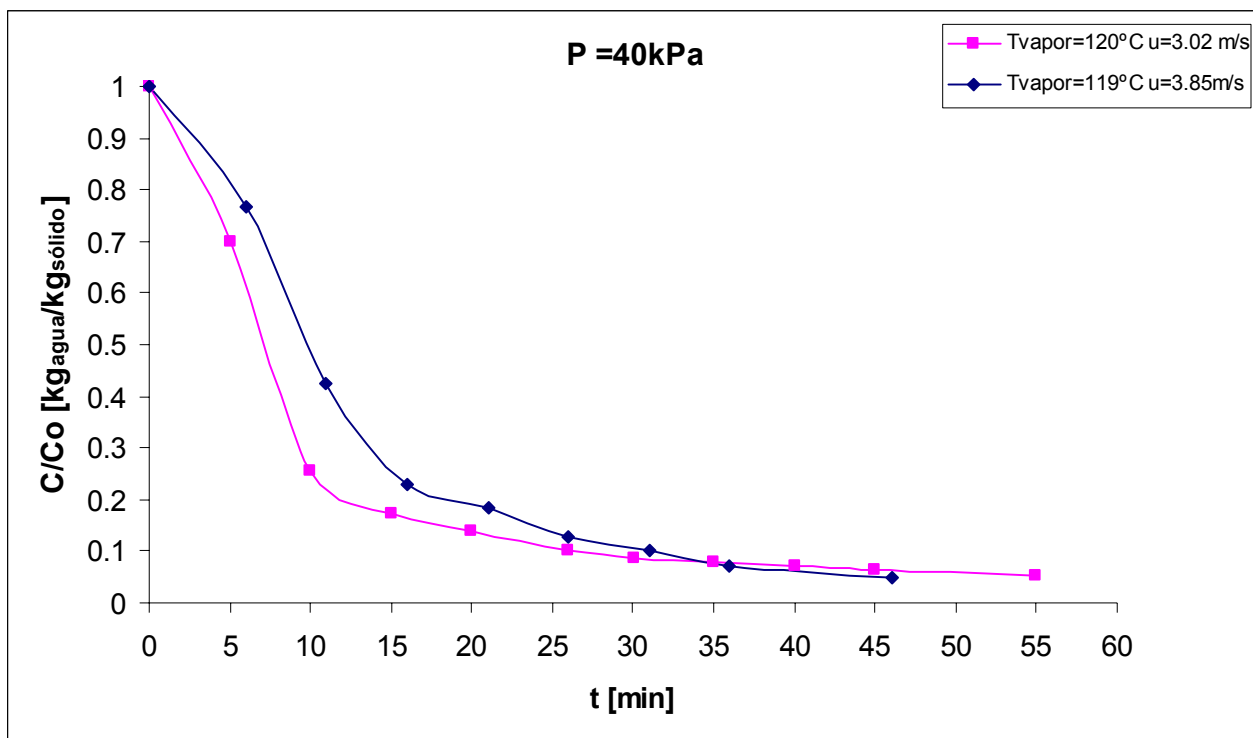


Figura 7.46 Efecto de la velocidad de fluidización sobre el proceso de secado

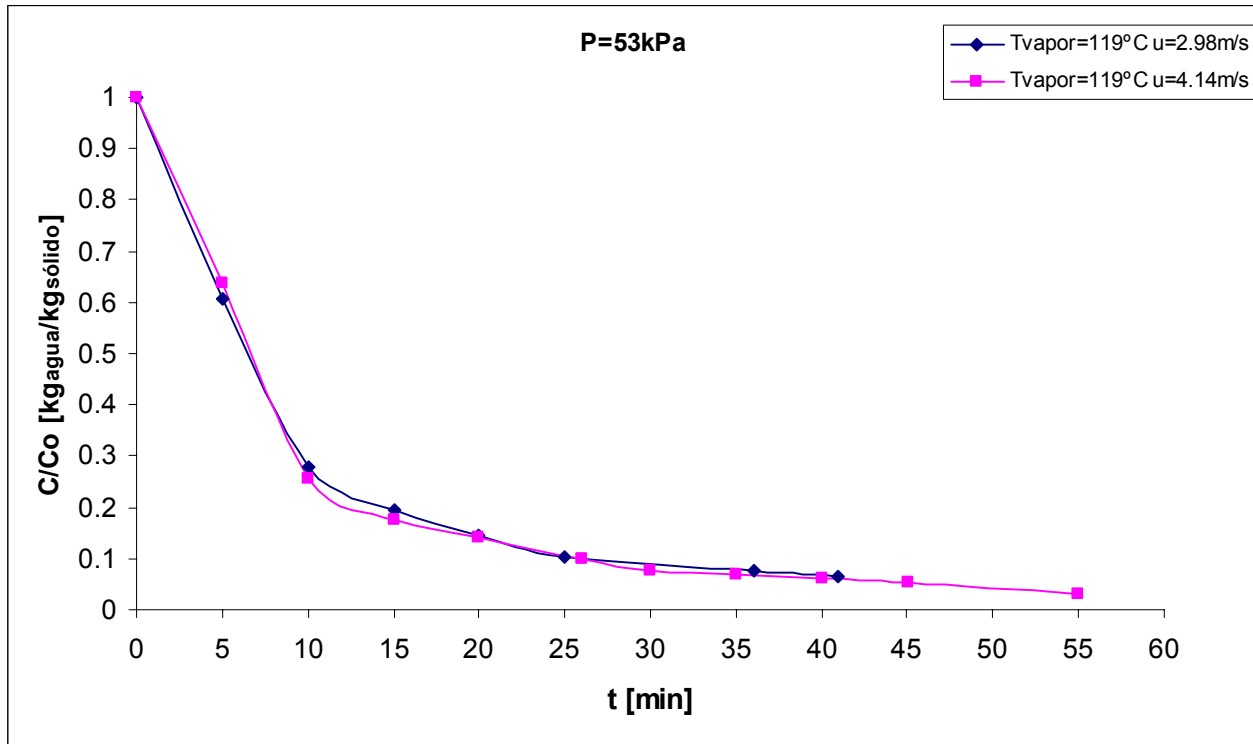


Figura 7.47 Efecto de la velocidad de fluidización sobre el proceso de secado

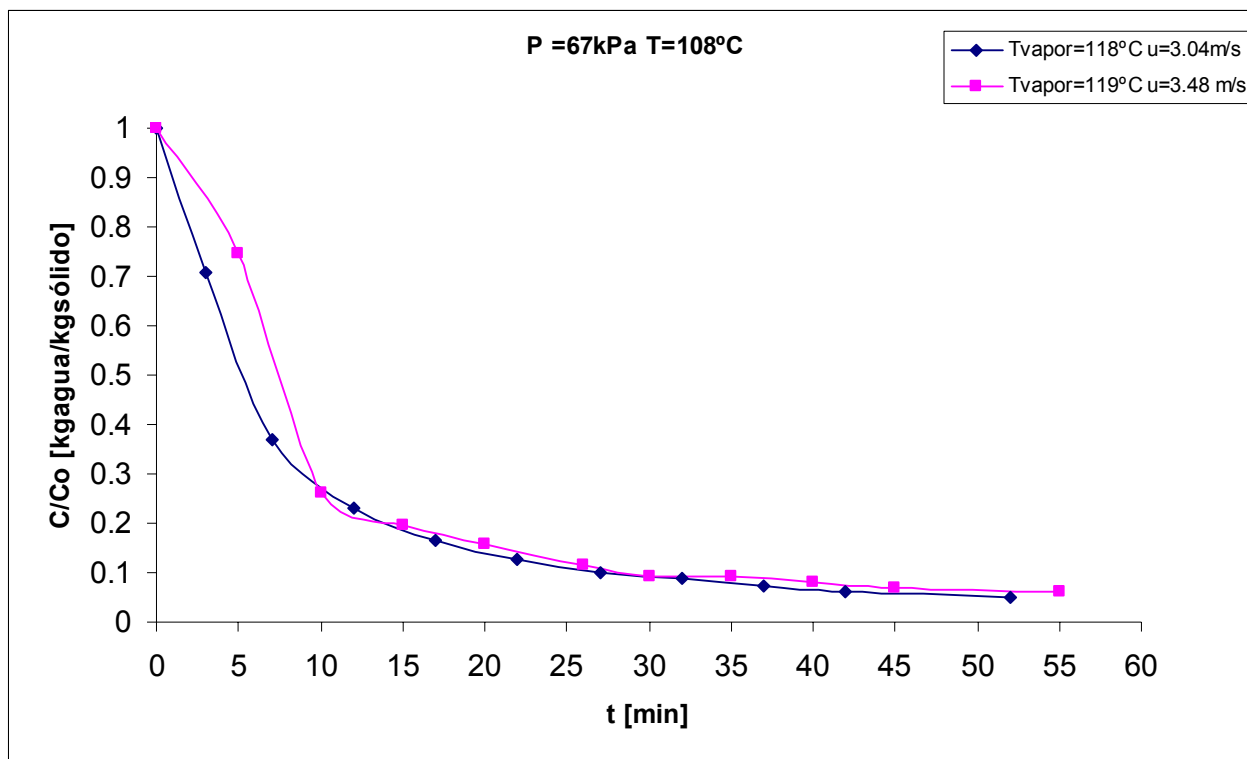


Figura 7.48 Efecto de la velocidad de fluidización sobre el proceso de secado

Como puede observarse en las gráficas de las figuras previamente presentadas, la velocidad de fluidización aumenta la velocidad de secado del producto. Sin embargo, no influye en la humedad final de las partículas, este parámetro es solamente función de la temperatura. Al igual que incrementando la temperatura en el proceso, al aumentar la velocidad de fluidización, la velocidad de secado también se incrementará. Este hecho es una buena alternativa para aumentar la eficiencia del proceso cuando no es posible trabajar con temperaturas altas. Podemos observar también que en algunos casos la humedad final fue menor al aumentar la velocidad de fluidización. Podemos encontrar en las curvas 7.40 a 7.48 que la velocidad de fluidización tienen un efecto muy notable en el periodo de secado constante, ya que en este periodo la velocidad de secado se ve afectada en forma considerable al variar la velocidad de fluidización. Sin embargo, en estos experimentos puede observarse poca influencia de la velocidad de fluidización sobre el periodo de

velocidad decreciente del secado, ya que en la mayoría de las figuras, las curvas de secado coincidían en este periodo. Con esto podemos concluir que los cambios en las condiciones externas del proceso tienen una influencia muy notable al inicio del secado, en el periodo de secado constante. Sin embargo, tienen poca influencia en el periodo de velocidad decreciente. Es decir, las resistencias a la transferencia de masa en la parte cercana a la superficie disminuyen al aumentar la velocidad de fluidización. Estas resistencias en la parte cercana a la superficie también influyen durante el periodo de secado decreciente. Este periodo es también afectado, pero en menor cantidad por la velocidad de fluidización, ya que en varios experimentos, hubo una disminución de humedad final al aumentar la velocidad de fluidización.