

## **CAPÍTULO 4**

### **FLUIDIZACIÓN EMPLEANDO VAPOR SOBRECALENTADO**

En este proyecto se empleará vapor sobrecalentado para el secado de partículas de arroz con cáscara. En este capítulo se analizará dicho fluido para conocer las razones, de porqué se ha seleccionado.

#### **4.1 Generación de Vapor de Agua**

Cuando al agua se le comunica energía calorífica, varía su entalpía y su estado físico. A medida que tiene lugar el calentamiento, la temperatura del fluido aumenta y por lo regular su densidad disminuye. La rapidez de la vaporización depende de la velocidad con la cual se transmite el calor al agua y de su movimiento en el recipiente en donde está confinado. El vapor así formado, si bien se halla en el estado gaseoso, no sigue enteramente las leyes de los gases perfectos. La temperatura a la cual se produce la ebullición depende de la pureza del agua y de la presión absoluta ejercida sobre ella. Para el agua pura la temperatura de ebullición tiene un valor determinado para cada presión y es menor a bajas que a altas presiones. [34]

#### **4.2 Proceso de Cambio de Fase del Agua**

Existen muchas situaciones prácticas donde dos fases de una sustancia pura coexisten en equilibrio. El agua existe como una mezcla de líquido y vapor en el

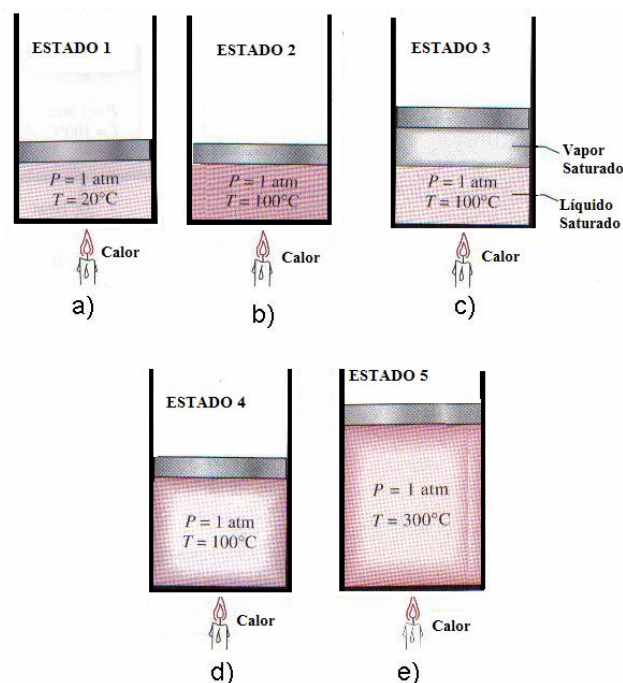
calentador y el condensador de una planta de potencia. El refrigerante se transforma de líquido a vapor en el congelador de un refrigerador.

Se considera un pistón, que contiene agua líquida a  $20^{\circ}\text{C}$  y una atmósfera de presión (Figura 4.1a). Bajo estas condiciones, el agua existe en fase líquida, y se le llama líquido comprimido, lo que quiere decir que no está a punto de vaporizar. Entonces se le transfiere calor, hasta que la temperatura se eleve a  $40^{\circ}\text{C}$ . Como la temperatura se eleva, el agua líquida se expande ligeramente, al igual que el volumen específico. Para albergar esta expansión, el pistón se moverá hacia arriba ligeramente. La presión en el cilindro permanece constante en 1 atmósfera durante este proceso, ya que depende de la presión barométrica externa y el peso del pistón, los cuales permanecen constantes. El agua todavía es un líquido comprimido en este estado, y que todavía no vaporiza. Mientras se transmite más calor, la temperatura seguirá subiendo hasta que llegue a  $100^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.1b). En este punto el agua todavía se encuentra en fase líquida, pero cualquier adición de calor causará que parte del líquido se vaporice. El cambio de fase de líquido a vapor está a punto de suceder. Un líquido que está a punto de vaporizar se le conoce como líquido saturado.

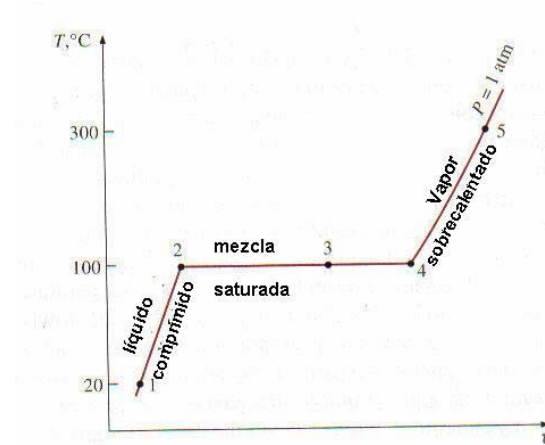
Una vez que hierve, la temperatura dejará de subir hasta que el líquido se vaporice por completo. Esto significa que la temperatura permanecerá constante durante el cambio de fase si la presión permanece constante. A la mitad del proceso de vaporización (Figura 4.1c), el cilindro contiene iguales cantidades de vapor y líquido. Mientras se continúa transfiriendo calor, el proceso de vaporización continuará hasta que la última gota de líquido se vaporice (Figura 4.1d). En este punto el cilindro está completamente lleno de

vapor que se encuentra en el límite de la fase líquida. Cualquier pérdida de calor, causará que cierto vapor se condense. Un vapor que este a punto de condensar se le llama vapor saturado. Una sustancia que se encuentre entre los estados de las figuras 4.1 b, c y d se le conoce como mezcla de líquido y vapor saturado, ya que las fases líquido y vapor coexisten en equilibrio en esos estados.

Una vez que el cambio de fase se ha completado, tenemos una sola fase (vapor), y si se sigue aumentando la transferencia de calor, el resultado será un incremento en la temperatura y en el volumen específico (Figura 4.1e). En este estado, la temperatura podría ser por ejemplo  $300^{\circ}\text{C}$ , y si se transfiere cierto calor del vapor, la temperatura caerá, pero no ocurrirá una condensación, ya que la temperatura se mantendrá arriba de  $100^{\circ}\text{C}$  (para una presión =1 atm). Un vapor que no está a punto de condensarse, se le conoce como vapor sobre calentado. Este proceso de cambio de fase a presión constante es ilustrado en un diagrama T-v en la figura 4.2.

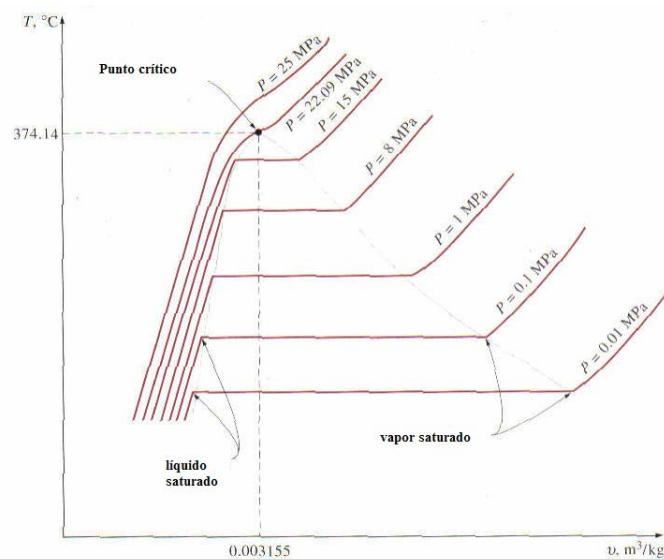


**Figura 4.1** Estados que se presentan en el cambio de fase líquido-vapor. [35]

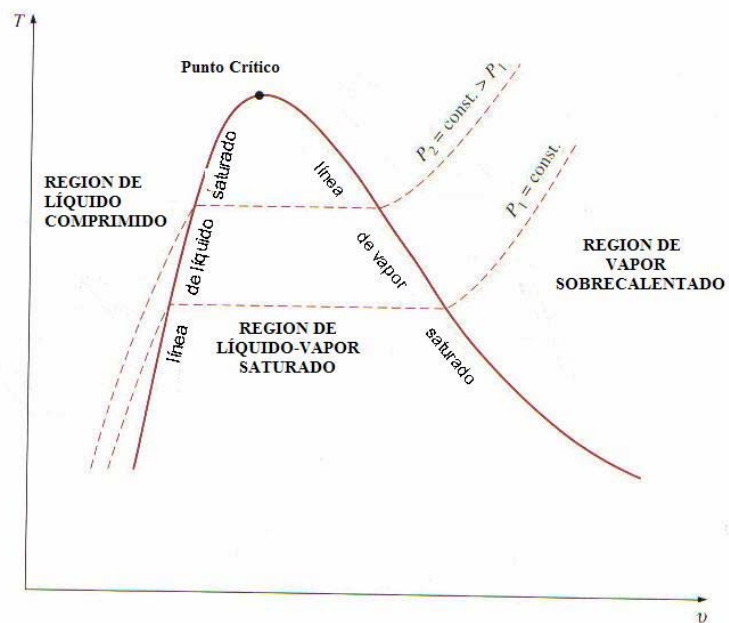


**Figura 4.2** Diagrama T-v para el proceso de calentamiento de agua a presión constante. [35]

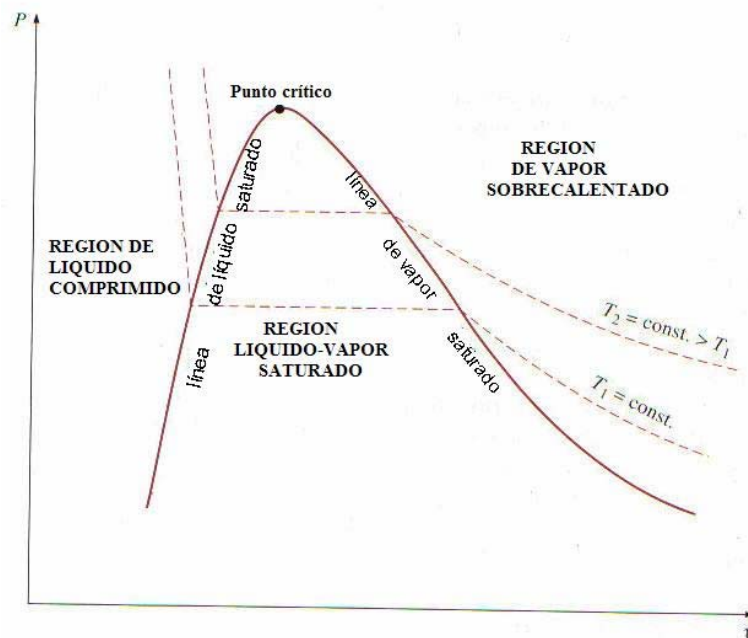
Todos los estados de vapor sobrecalentado se encuentran localizados a la derecha de la línea de vapor saturado, y a esa zona se le llama región de vapor sobrecalentado.



**Figura 4.3** Diagrama T-v de presión constante de un proceso de cambio de fase de una sustancia pura a varias temperaturas (valores numéricos para agua). [35]



**Figura 4.4** Diagrama T-v de una sustancia pura. [35]



**Figura 4.5** Diagrama P-v de una sustancia pura. [35]

### 4.3 Propiedades y características del vapor sobrecalentado

Ya que en la región de vapor sobrecalentado sólo existe una fase (vapor), la presión y la temperatura no son propiedades dependientes y se pueden usar convenientemente como dos propiedades independientes en las tablas. En estas tablas las propiedades se listan en función de la temperatura para presiones seleccionadas, empezando con el valor de vapor saturado. Algunas de las características del vapor sobrecalentado son:

- Bajas presiones ( $P < P_{\text{sat}}$  a una Temperatura dada)
- Altas temperaturas ( $T > T_{\text{sat}}$  a una Presión dada)
- Altos volúmenes específicos ( $v > v_g$  a presiones o temperaturas dadas)
- Altas energías internas ( $u > u_g$  a presiones o temperaturas dadas)
- Altas entalpías ( $h > h_g$  a presiones o temperaturas dadas). [35]

Frecuentemente, las variables conocidas en la región de vapor sobrecalentado no son presión y temperatura, sino presión y entalpía o presión y entropía. La aproximación básica de la temperatura para estos casos, se realiza usando la presión dada y la entalpía (o entropía) conocida. [36]

La siguiente tabla nos muestra las temperaturas de saturación a distintas presiones tanto manométricas como de vacío del vapor para poder determina cuándo se alcanza el estado sobrecalentado del vapor. [37]

**Tabla 4.1** Temperaturas de saturación del vapor para distintas presiones [11]

<b>Presión manométrica [kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Presión de vacío [cmHg]</b>	<b>Presión de Vacío o manométrica en Pa</b>	<b>Presión absoluta [Pa]</b>	<b>Temperatura de saturación [°C]</b>
0.30		29419.95	109409.95	102.14
0.25		24516.63	104506.63	100.84
0.20		19613.30	99603.30	99.49
0.15		14709.98	94699.98	98.09
0.10		9806.65	89796.65	96.62
0.05		4903.33	84893.33	95.09
		0.00	79990.00	93.48
	5	-6666.10	73323.90	91.16
	10	-13332.20	66657.80	88.65
	15	-19998.30	59991.70	85.92
	20	-26664.40	53325.60	82.93
	25	-33330.50	46659.50	79.60
	30	-39996.60	39993.40	75.85
	35	-46662.70	33327.30	71.53
	40	-53328.80	26661.20	66.41
	45	-59994.90	19995.10	60.05
	50	-66661	13329	51.54

#### **4.4 Ventajas del uso de vapor sobrecalentado en un proceso de secado**

El proceso de secado es una de las operaciones más importantes en la industria química y alimenticia, en las cuales se usa vapor sobrecalentado o aire [10]. Pero, comparando el proceso de secado con aire caliente contra el de vapor sobrecalentado, este último proporciona numerosas ventajas [38, 39, 40]:

1) La circulación de vapor sobre calentado en el secado con sistemas cerrados reduce las pérdidas de energía que ocurren en el secado con aire caliente. También la energía en forma de calor en la descarga de vapor resulta de la evaporación de la humedad del secado del material que puede ser recuperada o usada en otros procesos.

2) El alto coeficiente de transferencia de energía del secado con vapor sobrecalentado da como resultado un incremento en la velocidad de secado bajo ciertas condiciones, mejorando la eficiencia, y consecuentemente se reduce el equipo y el costo de capital.

3) En el secado con vapor sobrecalentado no hay oxidación, debido a que el oxígeno se libera al medio ambiente, y así se pueden eliminar los riesgos de fuego o explosión.

4) Sólo una cantidad pequeña del vapor generado es liberada del sistema cerrado hacia la atmósfera. El gas del vapor puede ser condensado y el polvo en el vapor ser separado fácilmente.

5) Algunos de los componentes orgánicos volátiles generados por el secado del material pueden ser recuperados y separados por un condensador.

6) Los secadores que operan con vapor sobrecalentado requieren un sistema cerrado, y por lo tanto no hay emisión de partículas finas a la atmósfera que cree contaminación.



7) Calidad del producto: Cuando se lleva a cabo el secado con vapor no hay posibilidad de que se contamine el producto por humo de gas u oxidación. En muchos casos este da una mejor calidad en el secado. Muchos alimentos para animales contienen fibras, proteínas y almidones. Entonces, en estos productos se ha encontrado, al ser secados con vapor sobrecalentado que son más fáciles de digerir y en muchos casos tienen un valor nutritivo más alto. [10]

8) No existe resistencia del gas alrededor de la superficie del sólido, incrementando la transferencia de masa. [11], [12]

9) Recuperada y usada en otras secciones, se puede eliminar la contaminación ambiental. Estudios recientes han determinado también otras ventajas del vapor sobrecalentado en los procesos de secado, como las altas velocidades de secado y la desodorización de los productos al realizarse en una cámara cerrada sin aire. [13]

#### **4.5 Limitaciones del secado con vapor sobrecalentado**

Las principales limitaciones del secado con vapor sobrecalentado son las siguientes [39, 41, 42]: altas temperaturas del producto le causan problemas a los materiales sensibles a las altas temperaturas y se necesitan sistemas más complejos de secado en comparación con el secado con aire caliente. Algunos investigadores han hecho investigaciones en aspectos teóricos y experimentales de secado con vapor sobrecalentado. En el secado sobre el periodo de velocidad constante hay una inversión

de temperatura, arriba de la cual la velocidad de secado es mucho más grande en el secado con vapor sobrecalentado que con aire caliente, sin embargo debajo de esa temperatura, la situación es inversa. [43, 44]

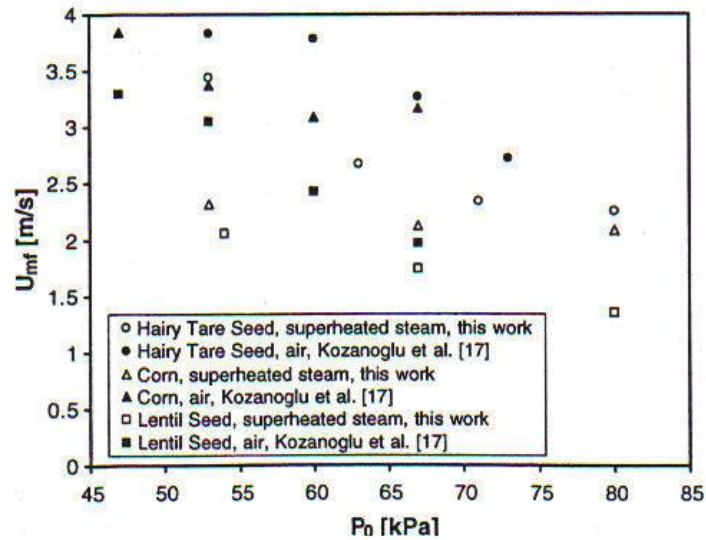
El contenido crítico de humedad es más bajo en el secado con vapor sobrecalentado que en el secado con aire caliente [42]. Por lo tanto la velocidad de secado total se espera que sea más grande en el secado con vapor sobre calentado que en el secado con aire caliente.

#### **4.6 Vapor sobre calentado como elemento de secado en lechos fluidizados**

Debido a las ventajas antes mencionadas, que presenta el vapor sobre calentado sobre el aire caliente, se han llevado a cabo diferentes experimentos con vapor sobrecalentado, en torres de secado de lechos fluidizados, para observar el comportamiento de este fluido como elemento de secado, y poder aprovecharlo al máximo. Así que se tratará de explicar algunas propiedades del vapor sobrecalentado en lechos fluidizados y los efectos que provoca al variarle ciertos parámetros.

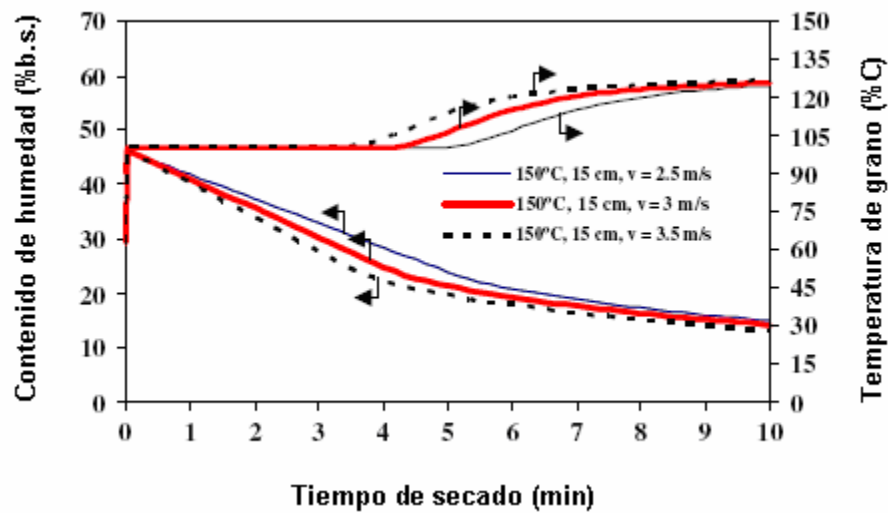
La figura 4.6 presenta una comparación de velocidades mínimas de fluidización empleando vapor sobrecalentado y aire caliente. Se debe mencionar que los datos presentados en esta figura no son tomados a la misma temperatura. Sin embargo, considerando que la velocidad mínima de fluidización es una función muy débil de la temperatura operacional, la comparación es muy interesante. Para todas las partículas

presentadas en la figura, el aire necesita velocidades más altas que el vapor, para empezar la fluidización. [8]



**Figura 4.6** Comparación de velocidades mínimas de fluidización empleando vapor sobre calentado y aire. [8]

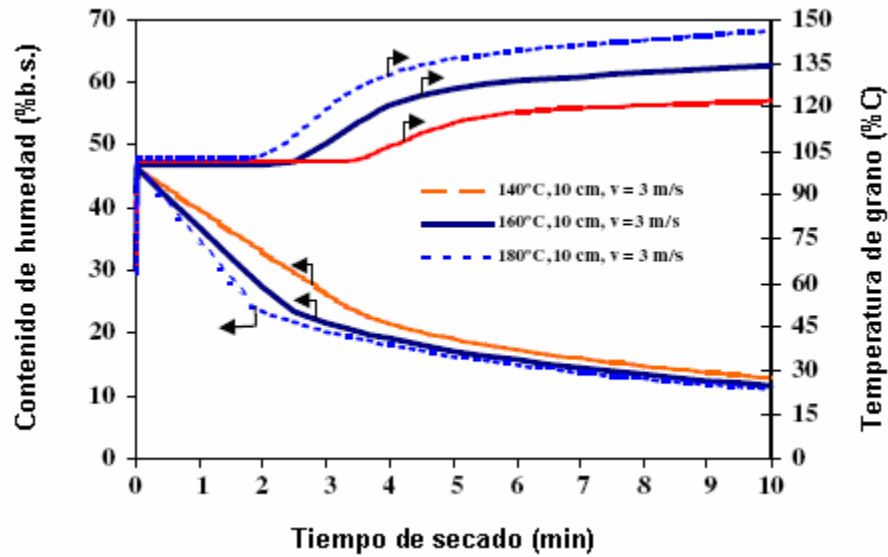
La figura 4.7 muestra el efecto de la velocidad superficial en los cambios de contenido de humedad y temperatura de grano en una profundidad de lecho de 15 cm y temperatura de sobrecalentamiento de 150° C. La velocidad de remoción de humedad es acelerada incrementando la velocidad superficial. En este caso, la relación de transferencia de humedad es liderada por las características de transferencia de calor entre la superficie sólida y el vapor. La velocidad del vapor también influencia la temperatura de grano, con una elevación en la temperatura de grano, mayor en relación a velocidades de vapor más altas.



**Figura 4.7** Resultados simulados del efecto de la velocidad superficial del vapor sobrecalentado en el contenido de humedad y temperatura de grano

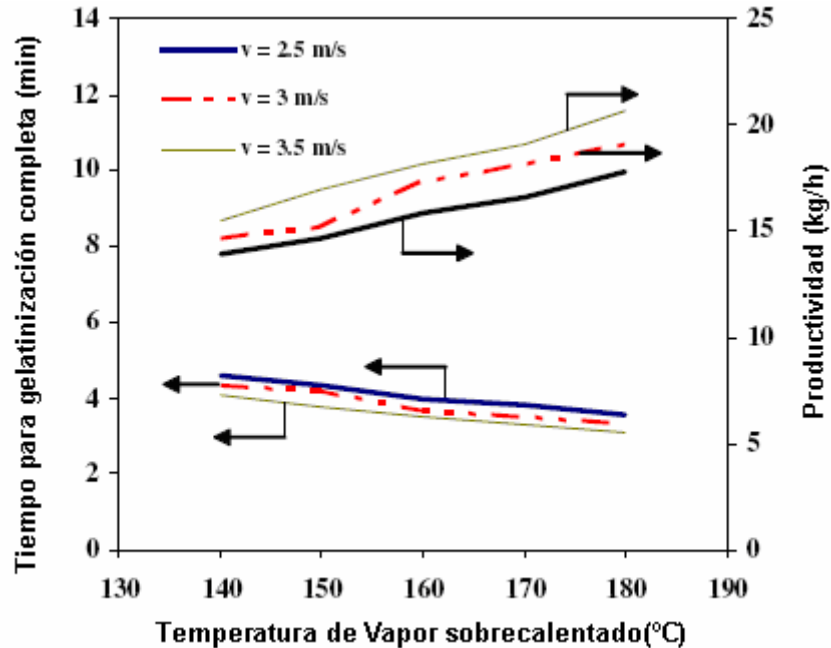
(humedad inicial 42% base seca). [45]

Como se muestra en la figura 4.8, cuando la temperatura del vapor sobrecalentado cambia de 140 a 180 °C, la reducción de humedad junto con la progresión de temperatura de grano, es incrementada con el incremento de la temperatura del vapor, debido a una diferencia más grande de temperatura entre el grano y el vapor sobrecalentado. Reduciendo el contenido de humedad de un 42% base seca a aproximadamente 19% base seca, requiere tiempos de secado de 3.7, 4.5 y 5 minutos para las temperaturas de vapor de 180, 160 y 150° C, respectivamente. Estos tiempos de secado calculados incluyen el periodo de condensación inicial.



**Figura 4.8** Resultados simulados del efecto de la temperatura del vapor sobrecalentado en el contenido de humedad y temperatura de grano (contenido de humedad inicial 42% base seca). [45]

La figura 4.9 muestra el tiempo de completa gelatinización como es afectada por la velocidad superficial del vapor sobrecalentado. A una temperatura dada incrementar la velocidad superficial lleva a tiempos más cortos para completar la gelatinización por transferencias de calor convectivas más altas, del medio caliente hacia el grano. Sin embargo el efecto de la velocidad superficial del vapor sobrecalentado en el tiempo de reacción es relativamente menos importante que el efecto de la profundidad del lecho y la temperatura. De acuerdo con estos resultados simulados, se sugiere que una manera efectiva de mejorar la productividad puede ser incrementar el grueso y temperatura del lecho. [45]

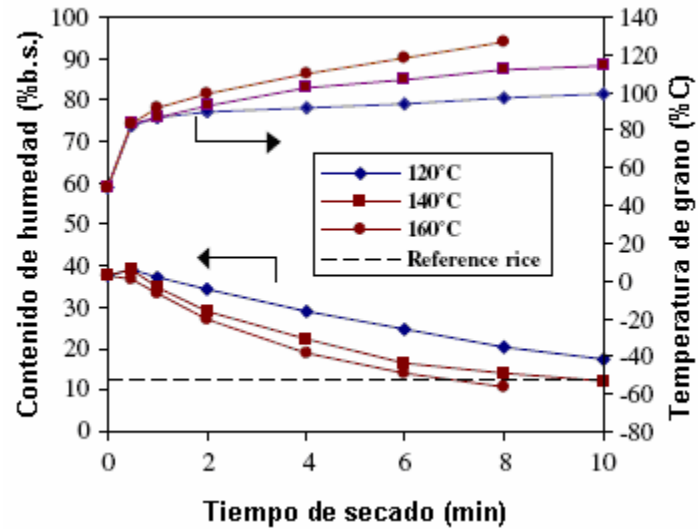


**Figura 4.9** Resultados simulados del efecto de la velocidad superficial de vapor sobrecalentado contra el tiempo de gelatinización y productividad. [45]

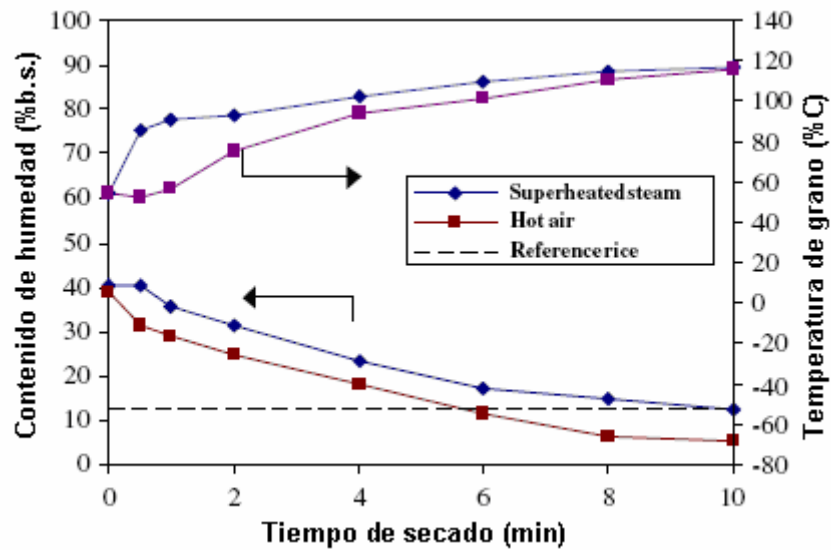
La figura 4.10 muestra la relación entre el contenido de humedad del grano de arroz y la temperatura, y el tiempo de secado. Durante la etapa inicial del secado, el vapor de agua flotante se condensa debido al repentino contacto con el grano de arroz a baja temperatura. Esta rápida liberación de calor de vaporización por condensación resulta en un rápido incremento en la temperatura del grano.

La figura 4.11 indica que el contenido de humedad del secado de grano de arroz por aire caliente cae más rápidamente y se conserva más bajo a través del periodo de secado. En contraste, la temperatura del grano de arroz secado por vapor sobrecalentado durante los primeros minutos del secado aumenta más rápidamente que el secado por vapor sobrecalentado. [46] Este fenómeno se debe al calor latente de la condensación de

vapor añadida al grano de arroz durante las etapas iniciales del secado y a las propiedades superiores de transferencia de calor del vapor sobre calentado sobre el aire caliente. [47]



**Figura 4.10** Efecto de la temperatura del vapor sobrecalentado en el contenido de humedad y temperatura de grano con una profundidad de lecho de 10 cm. [46]



**Figura 4.11** Efecto de calentamiento del medio en el contenido de humedad y temperatura de grano a temperatura de secado de 140° C y profundidad de lecho de 10 cm. [46]