



TESIS DE MAESTRIA TITULADA:

**“CARACTERIZACION DINAMICA Y CONTROL DE UN
SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO POR LOTES”**

TESIS QUE PRESENTA:

I.Q. OSCAR VELAZQUEZ CAMILO

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

ASESORES:

**M.C. CARLOS MARTINEZ VERA
Dr. JOSE DE JESUS ALVAREZ RAMIREZ**

**Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica
División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa
Av. Michoacán y Purísima s/n, Col. Vicentina, C.P. 09340
Cd. México, D.F., México**

2006

**Caracterización Dinámica y Control
de un Secador de Lecho Fluidizado
por Lotes**

T E S I S

Que para obtener el grado de
**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERIA QUIMICA**

Presenta

I.Q. Oscar Velázquez Camilo

Agradecimientos.

A aquel que ha de venir en breve y según algunos la tienen por tardanza porque siempre ha estado conmigo para guiarme con su amor y sabiduría, gracias eternamente mi grande y fiel amigo.

A mis dos preciosas Alondra M. Rosas Díaz y Stephanie Velázquez Rosas porque son parte de la fuerza que me hace seguir adelante en la vida y encontrarle un dulce sabor.

A mis padres C. Oscar Velázquez Rincón y Zoila E. Camilo Reyes porque siempre me han apoyado en las buenas y en las malas.

A mis asesores M. C. Carlos Martínez Vera y Dr. José de Jesús Álvarez Ramírez por la dirección en el presente trabajo y porque muchas veces más que asesores fueron amigos.

Al Dr. Mario Gonzalo Vizcarra Mendoza por su interés y comentarios muy buenos para el desarrollo del presente trabajo y también porque además de ser mi sinodal es una persona amiga.

Al Dr. Francisco Vidal Caballero Domínguez por sus comentarios y sugerencias realizadas al documento de la tesis para presentar un trabajo de calidad y por aceptar ser mi sinodal.

A mis amigos de la maestría con los cuales he convivido gran parte de esta etapa de mi vida los cuales he disfrutado mucho. Sería difícil mencionar a todos por lo que omitiré nombres, sabiendo de antemano que mis verdaderos amigos han de sentirse aludidos.

A la UAM-Iztapalapa y a sus profesores que me han apoyado en la formación de esta etapa de mi vida como un futuro investigador en el área de la ingeniería química, reconociendo que aún me falta mucho por recorrer.

Al CONACYT por su apoyo económico que hizo posible la realización de este trabajo de investigación y culminación de los estudios de maestría.

Resumen

En el proceso de secado de materiales orgánicos en lechos fluidizados se presentan fenómenos simultáneos de transferencia de calor y masa; la eficiencia de este proceso de secado con respecto a otros es mejor debido a la gran área de contacto existente entre el fluido secante y el sólido y a altos coeficientes de transferencia de masa y calor. El principal objetivo en este proceso es llevar el producto al contenido de humedad deseado en el menor tiempo posible y sin dañarlo. En el caso de que existan variaciones en las variables del proceso es necesario introducir un sistema de control para mantener la humedad del producto cerca de los valores deseados. El sistema de control también se puede utilizar para optimizar el tiempo de secado y/o el consumo de energía. En este trabajo se simuló, caracterizó y controló un secador de lecho fluidizado por lotes mediante un modelo simplificado del proceso. Como primer punto, se identificaron las variables del proceso, posteriormente se realizó un análisis de sensibilidad perturbando las variables manipulables para determinar cuál o cuáles son las que más influyen sobre la respuesta del proceso. Se implementó un esquema de control retroalimentado para dos tipos de controladores P y PI, manipulando la temperatura del aire a la entrada. Los mejores resultados se obtuvieron con el controlador PI ya que el tiempo en alcanzarse la humedad final deseada en el sólido fue un 50% menor del tiempo del proceso a lazo abierto, manteniendo la temperatura por debajo de los valores que producen daños térmicos al producto.

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Control automático en secadores de lechos fluidizados por lotes (SLFL)	1
1.2 Justificación	2
1.3 Alcance del proyecto	2
1.4 Antecedentes bibliográficos	3
Capítulo 2. Métodos teóricos	7
2.1 Introducción al control de procesos	7
2.1.1 Operaciones básicas en todo sistema de control	7
2.2 Introducción a los modelos matemáticos de sistemas dinámicos	8
2.3 Tiempo muerto	11
2.4 Concepto de control retroalimentado	11
2.5 Tipos de controladores	12
2.5.1 Controlador proporcional (P)	13
2.5.2 Controlador proporcional – integral (PI)	14
2.5.3 Controlador proporcional –integral – derivativo (PID)	16
2.6 Métodos de sintonización de controladores	16
Capítulo 3. Modelos de secadores de lecho fluidizado: una fase y dos fases	18
3.1 Características de los secadores de lechos fluidizados	21
3.1.1 Densidad de la partícula	21
3.1.2 Velocidad mínima de fluidización	22
3.2 Planteamiento del modelo matemático para el modelo homogéneo	23
3.3 Método de solución del modelo homogéneo	27
Capítulo 4. Análisis de las simulaciones a lazo abierto y cerrado en el estudio del secado de trigo en un SLFL	31
4.1 Identificación de las variables del proceso	31
4.2 Sistema a lazo abierto con perturbaciones en las variables de temperatura y flujo de aire a la entrada	32
4.2.1 Sistema a lazo abierto con perturbaciones en la temperatura del aire a la entrada del SLFL	32
4.2.2 Sistema a lazo abierto con perturbaciones en el flujo de aire a la entrada del SLFL	34
4.3 Sistema a lazo abierto con perturbaciones tipo escalón y rampa en las variables de temperatura y flujo de aire a la entrada del SLFL	36
4.3.1 Sistema a lazo abierto con perturbaciones tipo escalón en las variables de temperatura y flujo de aire a la entrada transcurridos 50 minutos del proceso	36
4.3.2 Sistema a lazo abierto con perturbaciones tipo escalón en las variables de temperatura y flujo de aire a la entrada transcurridos 100 minutos del proceso	37
4.3.3 Sistema a lazo abierto con perturbaciones sucesivas tipo escalón en las variables de temperatura y flujo de aire a la entrada del SLFL	39
4.3.4 Sistema a lazo abierto con perturbaciones tipo rampa en la temperatura del aire a la entrada del SLFL	40

4.3.5	Sistema a lazo abierto con perturbaciones tipo rampa en el flujo de aire a la entrada del SLFL	42
4.4	Sistema a lazo abierto para diferentes valores en la variable de perturbación potencial (humedad del aire a la entrada del SLFL)	43
4.5	Sistema a lazo cerrado con control proporcional (P)	46
4.5.1	Implementación del control proporcional (P)	46
4.5.2	Respuesta del proceso a lazo cerrado para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos	47
4.5.3	Respuesta del proceso a lazo cerrado para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 10 minutos	50
4.6	Sistema a lazo cerrado con control proporcional-integral (PI)	55
4.6.1	Implementación del control proporcional - integral (PI)	55
4.6.2	Respuesta del proceso a lazo cerrado para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 5 minutos	55
4.6.3	Respuesta del proceso a lazo cerrado para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos	59
Capítulo 5. Análisis de las simulaciones a lazo cerrado del secado de trigo en un SLFL para obtener un 10% de humedad final en la partícula		65
5.1	Especificaciones comerciales en el secado de granos	65
5.2	Sistema a lazo cerrado con control proporcional (P) en la obtención de un producto con 10% de humedad final	66
5.2.1	Respuesta del proceso a lazo cerrado para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos en la obtención de un producto con 10% de humedad final	66
5.3	Sistema a lazo cerrado con control proporcional - integral (PI) en la obtención de un producto con 10% de humedad final	72
5.3.1	Respuesta del proceso a lazo cerrado para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos en la obtención de un producto con 10% de humedad final	72
Capítulo 6. Conclusiones		78
Apéndice A.		80
A.1	Difusividad efectiva del trigo duro	80
A.2	Constantes de isotermas de desorción para la ecuación de Henderson	80
A.3	Propiedades físicas del grano de trigo duro utilizado en la simulación	80
A.4	Cálculo de la velocidad mínima de fluidización	81
Apéndice B.		83
B.1	Distribución de humedad en la partícula	83
Apéndice C. Nomenclatura		84
Bibliografía.		86

Índice de Figuras

2.1 Aplicaciones más importantes en la construcción de un modelo antes de su aplicación	10
2.2 Proceso con perturbación de carga en el proceso	11
2.3 Lazo de control retroalimentado	12
2.4 Respuesta de un controlador PI con un error de cambio escalón	15
3.1 Representación física de los dos modelos: A) Modelo homogéneo y B) heterogéneo	18
3.2 Curva característica para la obtención de la velocidad mínima de fluidización	22
3.3 Discretización del dominio espacial en la partícula esférica	28
4.1 Variables del proceso de un SLFL	31
4.2 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para un flujo de aire constante ($\dot{Q}_a = 13690 \text{ g/g}$) y perturbaciones en la temperatura del aire a la entrada	33
4.3 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para una temperatura del aire constante ($T_1 = 70 \text{ °C}$) con perturbaciones en el flujo de aire a la entrada	34
4.4-a Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida con perturbaciones tipo escalón en la temperatura y flujo de aire a la entrada transcurridos 50 minutos del proceso	36
4.4-b Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida con perturbaciones tipo escalón en la temperatura y flujo de aire a la entrada transcurridos 100 minutos del proceso	38
4.4-c Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida con perturbaciones sucesivas tipo escalón en la temperatura y flujo de aire a la entrada a diferentes tiempos programados	39
4.5-a Perturbaciones tipo rampa en la temperatura del aire a la entrada del SLFL	40
4.5-b Dinámica de la temperatura y contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida con perturbaciones tipo rampa en la temperatura del aire a la entrada	41
4.6-a Perturbaciones tipo rampa en el flujo de aire a la entrada del SLFL	42
4.6-b Dinámica de la temperatura y contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida con perturbaciones tipo rampa en el flujo de aire a la entrada	43
4.7 Dinámica de la temperatura y contenido de humedad promedio en la partícula para diferentes concentraciones de humedad en el aire de entrada al SLFL	44
4.8 Dinámica de la humedad del aire a la salida del SLFL para diferentes concentraciones de humedad en el aire de entrada	45
4.9 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos	47
4.10 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos	49

4.11 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales	49
4.12 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 10 minutos	50
4.13 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 10 minutos	51
4.14 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales	52
4.15 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 5 minutos	56
4.16 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 5 minutos	58
4.17 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales	58
4.18 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos	59
4.19 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos	60
4.20 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos	61
5.1 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos para la obtención de un producto con el 10% de humedad final	67
5.2 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos para la obtención de un producto con el 10% de humedad final	68
5.3 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales para la obtención de un producto con el 10% de humedad final	69
5.4 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos en la obtención del 10% de humedad final en la partícula	73
5.5 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos en la obtención del 10% de humedad final en la partícula	74
5.6 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales en la obtención del 10% de humedad final en la partícula	75
B.1 Perfil de concentración en la partícula	83

Capítulo 1

Introducción

1.1 Control Automático de Secadores de Lecho Fluidizado por Lotes (SLFL)

El control automático de los procesos ha significado una función vital en el desempeño de la ingeniería y la ciencia, convirtiéndose en una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura, controlando las variables industriales tales como la presión, temperatura, agitación, humedad y flujo entre otras de las industrias de procesos (Ogata, 1998).

El proceso de secado se refiere de manera generalizada al estudio de la pérdida de humedad de una sustancia generalmente sólida, en el que se llevan a cabo fenómenos simultáneos muy complejos de transferencia de calor y materia. Existen muchos modelos matemáticos que predicen la cinética de secado en secadores de lecho fluidizado (SLF), algunos muy complejos debido a la cantidad de parámetros que se involucran y otros más simples. Dentro de los modelos más estudiados en la actualidad se encuentra el modelo homogéneo ó modelo de una fase (Zahed y Epstein, 1992) y el modelo heterogéneo ó modelo de dos fases (Zahed y Epstein, 1995); del análisis de estos dos modelos se optó por la simulación y control del modelo homogéneo ya que es menos complejo que el modelo heterogéneo y las predicciones de las cinéticas de secado con respecto a datos experimentales son razonablemente buenas. Para fines de control, solamente se necesita que el modelo presente una buena aproximación de la tendencia de la curva de secado obtenida de datos experimentales, por lo que no necesariamente tiene que ser exacta ya que un esquema de control retroalimentado puede corregir esas desviaciones.

Los secadores de lecho fluidizado por lotes se usan en la industria química y de secado para pequeños volúmenes con alto valor en el mercado. Una operación por lote ofrece procedimientos simples y flexibles para plantas con frecuentes cambios en sus equipos y líneas de productos. Los objetivos del secado por lotes son muy diferentes a los de secado en continuo, especialmente en el secado de materiales orgánicos, tales como los productos farmacéuticos, en los cuales el error en el contenido de humedad es muy importante.

1.2 Justificación

En la literatura se han publicado muchos trabajos sobre el modelado y control de secadores de lecho fluidizado, pero la gran mayoría enfocado mayormente a la operación en continuo y muy poco se ha estudiado el control de procesos en secadores de lecho fluidizado por lotes, los cuales podrían presentar ventajas significativas con respecto a la operación en continuo en la búsqueda por obtener productos de mayor calidad y humedad específica deseada. El fijar y controlar las variables del proceso tales como el flujo o la temperatura del aire de alimentación dependiendo de la humedad del sólido con que éste se encuentre en el lecho inicialmente, conducirán a obtener un producto de calidad en el menor tiempo posible.

1.3 Alcance del Proyecto

En el presente trabajo se caracterizará y simulará dinámicamente el modelo de una fase ó modelo homogéneo en el secado de trigo, para posteriormente una vez identificados los parámetros y variables de importancia a manipular y controlar, proponer un esquema de control retroalimentado para mantener los niveles de contenido de humedad del producto dentro de los rangos de valores deseados en el menor tiempo posible bajo cambios en las condiciones de operación del proceso; si se modifican los valores deseados de contenido de

humedad del producto, ajustar las variables de operación del proceso automáticamente mediante el controlador propuesto.

1.4 Antecedentes

Muchos modelos matemáticos para secadores en lechos fluidizados han sido descritos en la literatura, dentro de los cuales se encuentran los siguientes.

Viswanathan (1986), modeló el proceso de secado en lechos fluidizados tanto para la operación en continuo como discontinuo. Obtuvo expresiones analíticas para el tiempo requerido para alcanzar el estado estable, el contenido de humedad de la partícula, humedad del aire a la salida y la temperatura del lecho al estado estable.

Henneberg et al. (2003), presentaron un estudio que describe el proceso y mecanismo de secado en lechos fluidizados por lotes. La influencia de factores como el aire caliente de secado son examinados teórica y experimentalmente con el fin de presentar la relación entre temperatura y el perfil de humedad y otros parámetros para el secado. También se presenta un modelo físico con el objetivo de facilitar el cálculo del proceso de secado bajo las condiciones definidas.

Jumah et al. (1996), presentaron un modelo matemático basado en la difusión másica efectiva para un secador de lecho fluidizado rotatorio en operación discontinua. Relacionaron la suposición de equilibrio térmico entre la salida de los sólidos y la salida del aire y la suposición de despreciar los gradientes de temperatura dentro de la partícula para el secado de maíz en una operación discontinua de un secador de lecho fluidizado rotatorio. Además del modelo desarrollado, se implementó el estudio de la sensibilidad de los coeficientes de difusividad y el coeficiente de transferencia de calor. El modelo presentó buena predicción de los datos experimentales como la temperatura del sólido y aire a la salida y el contenido de humedad de la partícula.

Zahed et al. (1995), desarrollaron un modelo heterogéneo o de dos fases, para la simulación de secadores de lechos fluidizados en operación continua y discontinua. El modelo consta de una fase burbuja en donde solo existen las burbujas de gas y una fase densa en la cual se considera que se encuentra la totalidad de los sólidos en un mezclado perfecto con el gas. El modelo considera tres pasos que controlan la transferencia de masa en el SLF dentro de los cuales esta la transferencia de masa que se da de la fase densa a la fase burbuja, otro es el proceso de transferencia de masa que existe en la fase densa (sólido más gas perfectamente mezclados) y también el transporte de masa interno que esta controlado por un mecanismo difusivo.

Hoebink y Rietema (1980a) (Zahed et al. 1995), modelaron el secado de sólidos húmedos en un secador de lecho fluidizado por lotes (SLFL). El lecho estaba dividido en tres fases (burbuja, nube y fase densa). En este modelo se describía el fenómeno de transferencia de masa desde el sólido húmedo hasta la fase burbuja, considerando despreciable la limitación difusional dentro de la partícula. Posteriormente este modelo fue modificado considerando limitación en la difusión interna en la partícula Hoebink y Rietema (1980b).

Siettos, Kiranoudis y Bafas (1999), propusieron dos estrategias de control avanzado para SLF; la primera estrategia de control fue el controlador de linealización Input-Output el cual requiere de un modelo matemático exacto para su implementación, mientras que el esquema de control basado en un controlador de lógica difusa esta basado en el conocimiento cualitativo del sistema de control.

Otro de los modelos matemáticos basados en el control difusivo más recientes para la predicción de las cinéticas de secado en lechos continuos fluidizados, es el desarrollado por Abdel Jabbar et al. (2002a). Este modelo básicamente es una adaptación del modelo de una fase en estado estacionario (Zahed y Epstein, 1992), para obtener un modelo en estado no estacionario para los secadores de lecho fluidizados continuos. La solución de las ecuaciones de

balance de materia, energía y difusión se resuelven simultáneamente por métodos numéricos. También Abdel Jabbar et al. (2002b) diseñó un sistema de control multivariable para un secador continuo de lecho fluidizado, a partir del modelo propuesto por Abdel-Jabbar et al. (2002a), el algoritmo de control que se propuso fueron el modelo de control interno (IMC) y el modelo de control predictivo (MPC).

Vizcarra y col. (1998) (Pérez, 2000) realizaron la deshidratación del trigo (variedad Salamanca) en un secador a nivel laboratorio de lecho fluidizado. Modelaron el proceso de secado por lotes utilizando el modelo de Zahed y Epstein. Encontraron que el modelo comienza a tener deficiencias considerables cuando se trabaja a temperaturas de alimentación de gas elevadas ($T > 60$ °C), ya que los perfiles de humedad comienzan a estar muy por debajo de los datos experimentales a tiempos mayores de 30 min de secado. Los autores concluyen que el principal factor que altera los resultados, es la difusividad efectiva (D_{ef}), por lo que proponen una correlación para determinar esta propiedad de transporte en el secado de trigo:

$$D_{ef} = 0.0097 \exp \left[-\frac{4909.5}{T} + 35.1811 - 0.11256M \right] \quad (1.1)$$

Caballero (1999), realizó un estudio sobre las cinéticas de secado en granos de amaranto; en éste estudio, se simuló y modeló la cinética de secado experimental de la semilla de amaranto en un rango experimental con dos diferentes contenidos de humedad en la semilla, para diferentes grados de temperatura, que no dañaran la materia prima. El comportamiento de la cinética de secado experimental fue comparado con dos modelos matemáticos los cuales son los más mencionados en la literatura actual referente a los secadores de lecho fluidizados, el modelo homogéneo o modelo de una sola fase (Zahed y Epstein, 1992) y el modelo de dos fases, (Zahed et al., 1995). De las simulaciones realizadas se concluyó que el modelo de una sola fase presentaba una mejor predicción de los resultados experimentales, debido a la complejidad de la solución de las ecuaciones de materia y energía y a las restricciones que tiene el

modelo de dos fases, al considerar que el gas que atraviesa la fase emulsión, se encuentra en condiciones de fluidización mínima. Lo cual fue comprobado por medio de un análisis de sensibilidad de parámetros.

Capítulo 2

Métodos Teóricos

2.1 Introducción al Control de Procesos

Muchas plantas químicas, tales como refinerías de petróleo, plantas de etileno, amoníaco y muchas otras son operadas bajo un control digital. Los efectos han sido muy sustanciales, dando como resultado un mejor sistema de control automatizado y una reducción de los costos de operación. El control automático de procesos se define como la manera de mantener la variable controlada en el punto de control, a pesar de las perturbaciones.

También se puede decir que las razones de la automatización de las plantas de proceso son proporcionar un entorno de seguridad y a la vez mantener la calidad deseada del producto y alta eficiencia de la planta con reducción de la demanda de trabajo humano. (Smith y Corripio, 1995).

2.1.1 Operaciones Básicas en Todo Sistema de Control

La importancia de los elementos de control básicos explicados anteriormente se debe a que sin ellos no es posible realizar las tres operaciones básicas que deben estar presentes en todo sistema de control, estas operaciones se describen a continuación:

- **Medición:** La medición de la variable que se controla se hace generalmente mediante la combinación de sensores y transductores.
- **Decisión:** Con base en la medición, el controlador compara y decide que hacer para mantener la variable a controlar en el valor o rango deseado.

- Acción: Como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una acción en el sistema, la cual generalmente es realizada por el elemento final de control.

También, es necesario para el control de procesos conocer algunos términos fundamentales. El primer término es la variable controlada, esta es la variable que se debe mantener o controlar dentro de algún valor deseado. El segundo término es el punto de control o setpoint, es el valor especificado que la variable controlada debe tener, es decir, es el valor deseado para dicha variable. La variable manipulada, es la variable que se utiliza para mantener la variable controlada en el punto de control. La Perturbación es cuando cualquier cambio en la variable manipulable ocasiona que la variable de control se desvíe del punto de control. Dentro de los términos también son importantes: El circuito abierto o lazo abierto, se refiere a la situación en la cual se desconecta el controlador del sistema, es decir, el controlador no realiza ninguna función relativa para mantener la variable controlada en el punto de control, la otra forma de control es el control de circuito cerrado o de lazo cerrado, se refiere a la situación en la cual se conecta el controlador al proceso; el controlador compara el punto de control con la variable controlada y determina la acción correctiva. Otro término importante es el control regulador que se utiliza para referirse a los sistemas diseñados para compensar las perturbaciones. A veces la perturbación más importante es el punto de control mismo, es decir que este, puede cambiar en función del tiempo, lo cual es utilizado comúnmente en procesos batch (por lote) y en consecuencia, la variable controlada debe ajustarse al punto de control, para este diseño se utiliza el término servocontrol.

2.2 Introducción a los Modelos Matemáticos de Sistemas Dinámicos

El modelado de procesos es valioso por que es una abstracción y ayuda a evitar la observación y experimentación repetitiva. Sin embargo, el ahorro del

costo potencial y el tiempo que ofrece el uso de los modelos matemáticos compite con el hecho de que el modelo sólo imita la realidad y no incluye todas las características del proceso real que ha sido modelado. Ahora, el proceso de interés contiene información no siempre disponible o tal vez no siempre válida en el modelo. (Edgar y Himmelblau, 1988).

Se debe tener en cuenta que la construcción de un modelo es un proceso iterativo. Ver Figura 2.1. En el desarrollo de un modelo, el usuario debe decidir que factores son relevantes y cuán complejo el modelo debe ser. La construcción de un modelo puede ser dividida por conveniencia en cuatro pasos:

1. Definición del problema y su formulación: La definición del problema, el conocimiento de elementos importantes pertenecientes al problema y a la solución, la determinación del grado de exactitud del modelo y su aplicación, tienen lugar en este paso, así como la evaluación de estructura y complejidad. También se debe conocer, el número de variables independientes incluidas en el modelo, el número de ecuaciones independientes requeridas para describir el sistema y el número de parámetros desconocidos en el modelo.
2. Análisis preliminar y detallado: En este paso se debe especificar toda la información, como la programación lógica y los algoritmos necesarios para desarrollar el modelo, así como su descripción matemática y simulación. Primero se definen las variables de entrada y salida, cual es el sistema y cual el medio ambiente. También, las representaciones específicas del modelo, así como las suposiciones y limitaciones de los modelos que han sido transferidos a códigos computacionales actuales. La implementación computarizada de los modelos requiere verificar la disponibilidad de software y hardware, desarrollar programación lógica y diagramas de flujo.
3. Evaluación: Este paso se propone como una revisión final del modelo en conjunto. La evaluación del modelo se lleva a cabo de acuerdo a los criterios de evaluación y a los planes de prueba establecidos en la definición del problema. Después llevar a cabo una prueba sensitiva de las entradas del

modelo y los parámetros y determinar si las relaciones aparentes son físicamente significativas.

4. Interpretación y aplicación: Una vez que el modelo esta completo se procede a la aplicación e interpretación de resultados.

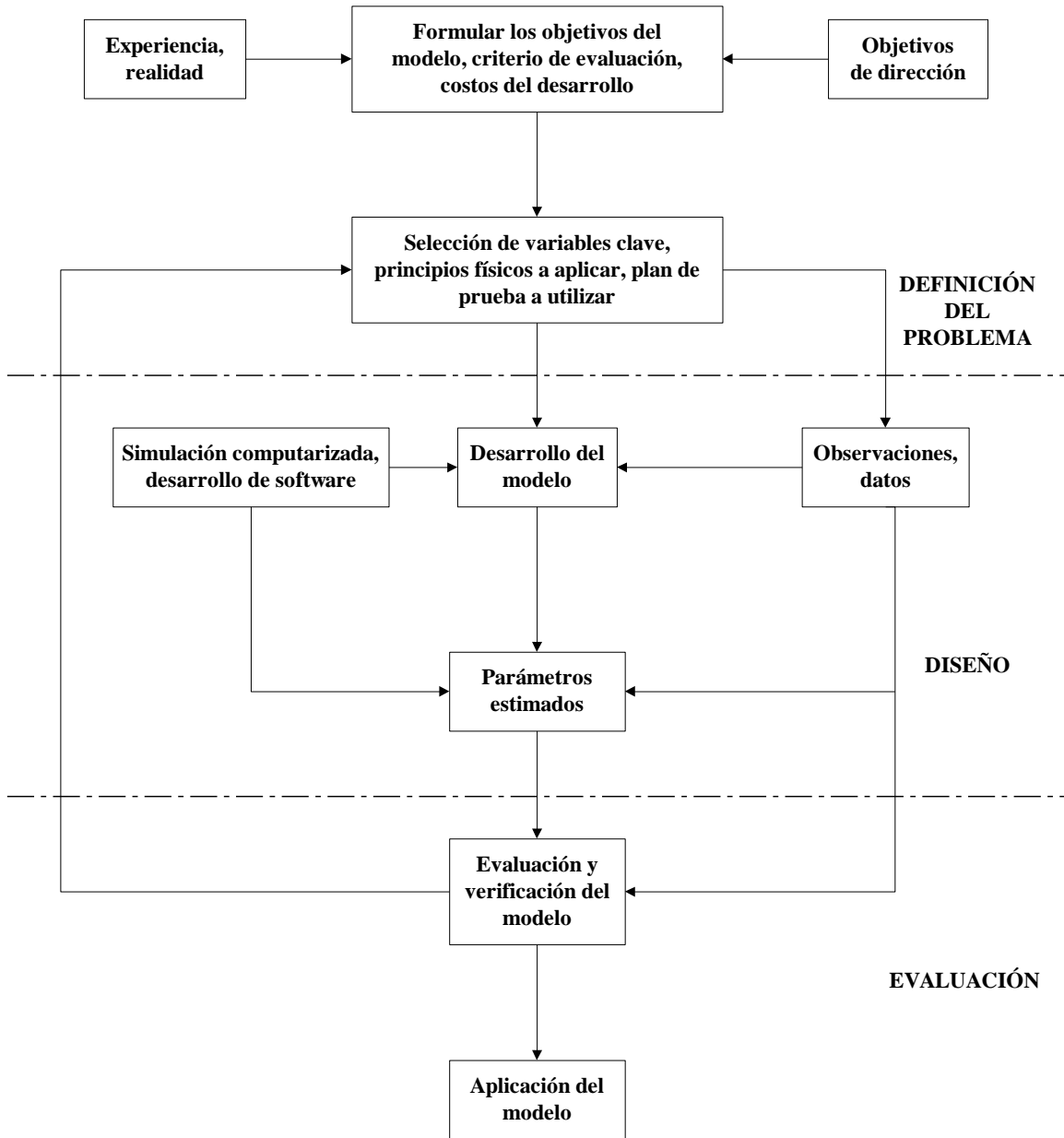


Fig. 2.1 Aplicaciones más importantes en la construcción de un modelo antes de su aplicación (Edgar y Himmelblau, 1988).

2.3 Tiempo Muerto

En la mayoría de los problemas de modelado se supone que los cambios tienen lugar en alguna de las variables de entrada (perturbaciones, variables manipuladas) y los efectos observados en las variables de estado y las salidas son instantáneas. Así cuando se efectúan cambios en las variables de entrada, por ejemplo de un reactor continuo tipo tanque agitado (CSRT), las variables de entrada (C_{Ai} , T_i , F_i , etc.) se considera que afectan de manera inmediata a las variables de salida (C_A , T , F , etc.). Lo anterior es contrario a la experiencia física o real, e indica que cuando la variable de entrada de un sistema cambia, hay un intervalo de tiempo que puede ser corto o largo durante el cual su efecto no es observado en las variables de salida del sistema. Este intervalo de tiempo es llamado tiempo muerto, retraso de transporte, retraso puro o retraso distancia velocidad. El tiempo muerto es un elemento importante en la modelación matemática de procesos químicos y tiene un serio impacto sobre el diseño de controladores eficientes. (Stephanopoulos, 1984).

2.4 Concepto de Control Retroalimentado

El proceso generalizado de la Figura 2.2. Tiene una salida (y), una perturbación potencial (d), y una variable manipulada disponible (m). La potencia (d) también conocida como carga del proceso cambia de forma impredecible y el objetivo de un sistema de control es conservar el valor de la salida (y) a un valor deseado. El sistema de la Figura 2.2, es conocido como lazo abierto.

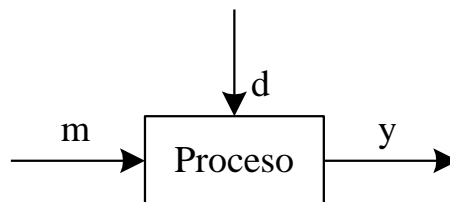


Fig. 2.2 Proceso con perturbación de carga en el proceso (Stephanopoulos, 1984).

En la Figura 2.3, se muestra un sistema de control retroalimentado, también llamado de lazo cerrado. La acción de un control retroalimentado toma los siguientes pasos: Medición del valor de la salida (flujo, presión, nivel del líquido, temperatura o composición) utilizando un sistema de medición apropiado. Así, (Y_m) es el valor indicado por el sensor de medición, compara el valor indicado por (Y_m) con el valor deseado (Y_{sp}) ó (set-point) de la salida, La desviación error es $\epsilon = Y_{sp} - Y_m$. El valor de la desviación (ϵ) es proporcionada al controlador principal. El controlador cambia el valor de la variable manipulada (m) de tal forma que reduce la desviación del error (ϵ). Usualmente, el controlador no afecta directamente la variable manipulada (m), pero lo realiza a través de otro dispositivo (válvulas de control) conocidas como elementos finales de control.

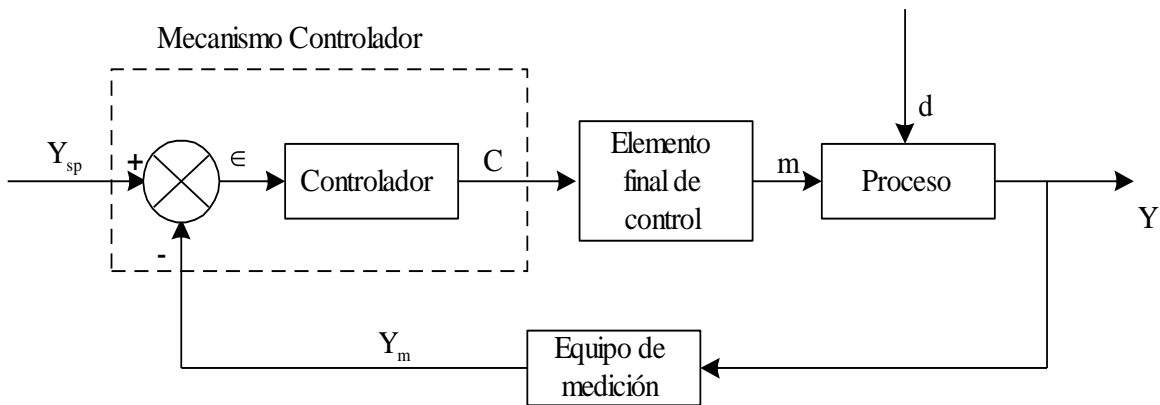


Fig. 2.3. Lazo de control retroalimentado (Stephanopoulos, 1984).

2.5 Tipos de Controladores

Hay tres tipos básicos de controladores retroalimentados:

- Proporcional(P)
- Proporcional-Integral(PI)
- Proporcional-Integral-Derivativo(PID)

Los detalles de construcción pueden diferir de acuerdo a cada fabricante, pero sus funciones son esencialmente las mismas.

2.5.1 Controlador Proporcional (P)

Su salida actuante es proporcional al error:

$$C(t) = K_C \epsilon(t) + C_s \quad (2.1)$$

Donde:

K_C = ganancia proporcional del controlador.

C_s = Señal de inclinación del controlador o señal actuante cuando $\epsilon=0$.

Un controlador proporcional es descrito por el valor de su ganancia proporcional (K_C) o equivalente por su banda proporcional (PB) donde:

$$PB = 100/K_C \quad (2.2)$$

La banda proporcional caracteriza el rango sobre el cual el error debe cambiar para manejar la señal actuante del controlador sobre su rango total. Usualmente PB esta en el rango $1 \leq PB \leq 500$, de esta manera la ganancia más grande de K_C ó equivalentemente la más pequeña de la banda proporcional, producen la más alta sensibilidad de la señal actuante del controlador para la desviación de ϵ .

Definida la desviación de $C'(t)$ de la señal actuante como sigue:

$$C'(t) = C(t) - C_s \quad (2.3)$$

Tomando:

$$C'(t) = K_C \epsilon(t) \quad (2.4)$$

Y aplicando transformada de Laplace a la Ecuación (2.4), se obtiene la función de transferencia del controlador proporcional.

$$G_C(s) = \frac{C(s)}{\epsilon'(s)} = K_C \quad (2.5)$$

2.5.2 Controlador Proporcional – Integral (PI)

Son comúnmente conocidos como proporcionales – plus - reset (proporcional con reajuste adicional). Su señal actuante es relacionada con el error por la ecuación:

$$C(t) = K_C \epsilon(t) + \frac{K_C}{\tau_I} \int_0^t \epsilon(t) dt + Cs \quad (2.6)$$

Donde: $\tau_I =$ Constante de tiempo integral o tiempo de reajuste en minutos, también conocido como tiempo integral.

El tiempo integral es un parámetro ajustable y en algunas veces referido como minutos por repetición. Usualmente varía en un rango de $0.1 \leq \tau_I \leq 50$ minutos. Algunos fabricantes no calibran sus controladores con el término τ_I pero si en términos de su recíproco $1/\tau_I$ (repeticiones por minutos), lo cual es conocido como velocidad de reajuste.

Si se considera que el escalón cambia por un escalón de magnitud ϵ . La Figura 2.4, muestra la respuesta de la salida de un controlador que fue obtenido a partir de la Ecuación (2.7). Se observa que inicialmente la salida del controlador es (K_C) (la condición del término integral es cero). Después de un periodo de τ_I minutos la contribución del término integral es:

$$\frac{K_C}{\tau_I} \int_0^{\tau_I} \epsilon(t) dt = \frac{K_C}{\tau_I} \epsilon \tau_I = K_C \epsilon \quad (2.7)$$

Esto indica que la acción de control integral ha repetido la respuesta de la acción proporcional. Esta repetición toma lugar cada τ_I minuto, debido a lo anterior τ_I toma el nombre de tiempo de reajuste. Por lo tanto se puede definir al

tiempo de reajuste como el tiempo que necesita el controlador para repetir la acción proporcional inicial en su salida.

La acción integral causa que la salida del controlador $C(t)$ cambie mientras exista un error en la salida del proceso. Por lo tanto, tal controlador puede eliminar errores pequeños. De la Ecuación (2.6), se obtiene la función de transferencia de un controlador proporcional – integral.

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) = \left(\frac{K_c \tau_I s + K_c}{\tau_I s} \right) \quad (2.8)$$

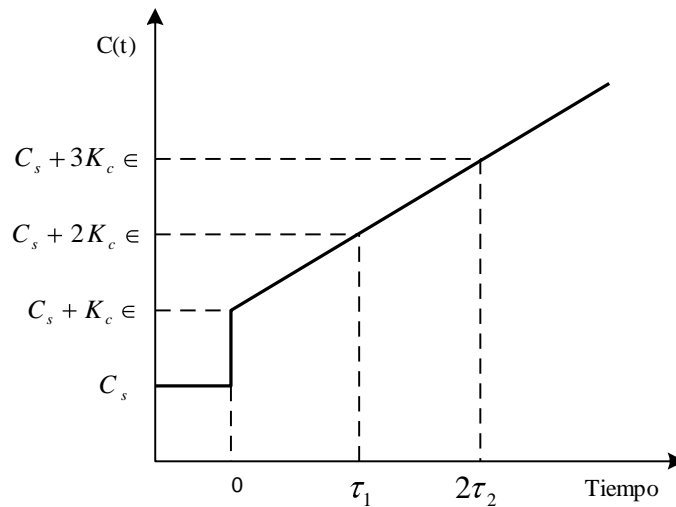


Fig. 2.4. Respuesta de un controlador PI con un error de cambio escalón (Stephanopoulos, 1984).

El término integral de un controlador PI causa que su salida cambie mientras exista un error diferente de cero. Frecuentemente los errores no pueden ser eliminados rápidamente y dan tiempo suficiente para producir valores cada vez más grandes para el término integral, el cual conserva los incrementos de la acción de control hasta que este se sature (por ejemplo, una válvula completamente abierta o cerrada), esta condición es llamada acción final integral.

2.5.3 Controlador Proporcional – Integral – Derivativo (PID)

Es comúnmente conocido como proporcional–plus–reset–plus–rate (proporcional con reajuste adicional y velocidad adicional). La salida de este controlador esta dada por:

$$C(t) = K_C \epsilon(t) + \frac{K_C}{\tau_I} \int_0^t \epsilon(t) dt = K_C \tau_D \frac{d\epsilon}{dt} + C_s \quad (2.9)$$

Donde: τ_D = Es la constante de tiempo derivativo en minutos.

Con el término derivativo ($d\epsilon/dt$), el controlador proporcional integral derivativo (PID) anticipa el posible error existente en un futuro inmediato y aplica una acción de control la cual es proporcional a la velocidad actual de cambio en el error. Debido a esta propiedad, la acción de control derivativo es algunas veces referido como control anticipatorio. De la Ecuación (2.9), se obtiene la función de transferencia de un controlador PID.

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) = \left(\frac{K_C \tau_I \tau_D s^2 + K_C \tau_I s + K_C}{\tau_I s} \right) \quad (2.10)$$

Las mayores desventajas de la acción de control derivativa son para una respuesta con error constante diferente de cero, no da acciones de control como $d\epsilon/dt=0$. Para una respuesta con mucho ruido con error cercano a cero, puede calcular derivativas grandes y producir acciones de control grandes, las cuales no son necesarias.

2.6 Métodos de Sintonización de Controladores

El proceso para seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de desempeño se conoce como sintonización del

controlador. Para lo cual existen tres criterios generales para el ajuste de controladores.

- Criterio simple es la respuesta de $\frac{1}{4}$ de la razón de decaimiento.
- Criterio de operación del tiempo integral (Integral del valor absoluto del error (IAE), integral del error al cuadrado (ISE), integral del valor absoluto del error por el tiempo (ITAE))
- Criterio basado en reglas semiempíricas, las cuales se basan en la respuesta de la curva de reacción del proceso.

Capítulo 3

Modelos de Secadores de Lecho Fluidizado: Una Fase y Dos Fases

Para llevar a cabo la simulación del proceso de secado en un lecho fluidizado en operación por lotes, se utilizó el modelo homogéneo (Zahed y Epstein, 1992), del cual se describen sus características y método de solución posteriormente. En este punto se describen a grandes rasgos las diferencias en las suposiciones fundamentales entre el modelo homogéneo y el modelo heterogéneo (Zahed et al., 1995). La principal diferencia entre un modelo y otro es que en el modelo de una fase u homogéneo, se considera al lecho fluidizado como una mezcla perfecta de sólidos y gas, descartando la presencia de burbujas o alguna otra fase derivada de la presencia de la fase burbuja; y el modelo de dos fases o heterogéneo considera al lecho fluidizado dividido en dos fases, una densa y otra burbuja. Los balances de materia y energía se desarrollan a nivel macroscópico para ambos modelos y se resuelven simultáneamente junto con la ecuación de difusión. En la Figura 3.1, se presentan las representaciones físicas de los modelos homogéneo y heterogéneo; y en la Tabla 3.1 se presentan sus suposiciones fundamentales.

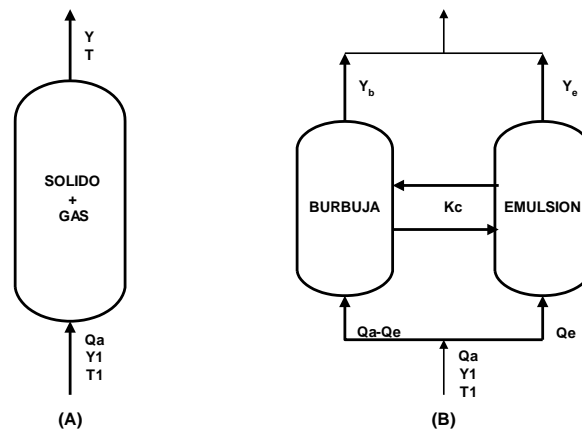


Fig. 3.1 Representación física de los dos modelos: A) Modelo Homogéneo y B) Modelo Heterogéneo.

Tabla 3.1 Suposiciones fundamentales y principales diferencias entre el modelo homogéneo y heterogéneo.

Suposiciones fundamentales en modelado de secadores de lecho fluidizado	Modelo Homogéneo	Modelo Heterogéneo
Sólidos en el lecho son de tamaño uniforme e internamente homogéneos, con una esfericidad suficientemente cercana a la unidad para que puedan ser aproximados geométricamente como esferas isotrópicas.	✓	✓
El encogimiento de los sólidos durante el secado es despreciable y sus propiedades físicas permanecen constantes con el tiempo.	✓	✓
El proceso de secado es dominado por la de difusión de humedad interna, por lo que la resistencia a la transferencia de masa por convección externa puede despreciarse y el contenido de humedad en la superficie del sólido puede considerarse que se encuentra en equilibrio con la humedad del gas (aire) que lo rodea (Mathur y Epstein, 1974) (Zahed y Epstein, 1992).	✓	X
De los anteriores tres puntos se puede suponer que la migración de humedad en la partícula se da en dirección radial.	✓	✓
El gradiente de temperatura en los sólidos es despreciable. Esta suposición viene de la definición del número de Lewis (difusividad térmica / difusividad másica) involucrado en los sólidos típicos como granos de cereales (Zuritz y Singh, 1982) (Zahed y Epstein, 1992). Por lo que la temperatura en el grano es uniforme en cualquier tiempo.	✓	✓
Las paredes del secador se pueden considerar esencialmente adiabáticas, es decir que el calor perdido por las paredes a los alrededores es despreciable con el calor transferido entre el aire y los sólidos.	✓	✓
La masa contenida de aire en el lecho es despreciable comparada a la masa de sólidos en el lecho.	✓	X
Como los sólidos se encuentran en un mezclado perfecto con el aire, la temperatura y humedad de una muestra de sólido es representativa para todo el lote de sólidos en el lecho fluidizado.	✓	Solo en la fase densa
El aire a la salida se encuentra en equilibrio térmico con los sólidos en el lecho fluidizado.	✓	✓

Existe transferencia de masa por convección externa de la superficie de la partícula al gas de la fase densa.	X	✓
La fracción de espacios vacíos mínimo de fluidización es la misma en la fase densa; a condiciones de U_{mf} .	X	✓
No existen variaciones radiales de concentración dentro de las dos fases.	X	✓
No existen partículas de sólidos dentro de la fase burbuja.	X	✓
Las burbujas son de un tamaño uniforme (calculada a la altura media del lecho) y están distribuidas uniformemente en el lecho.	X	✓
Las partículas fluidizadas con el gas de secado se encuentran en un régimen burbujeante.	X	✓
El gas atraviesa la fase burbuja en forma de flujo pistón.	X	✓
Los fenómenos y efectos hidrodinámicos provocados por las burbujas tales como la coalescencia y la formación de una estela, son despreciables.	X	✓

X = No aplica

✓ = Aplica

3.1 Características de los Secadores de Lecho Fluidizado

Dentro de las principales características de los lechos fluidizados es que se provee de un área de contacto eficiente entre las partículas sólidas y el gas de secado; también se obtiene un buen resultado en la tasa de transferencia de calor y masa, además de que la temperatura es uniforme a lo largo del lecho comparado con los lechos fijos (Prasad y Pydi, 2003). El mantenimiento de estos equipos es barato en comparación con los de lecho borbotante, entre otros. Más sin embargo, también tiene desventajas ya que los sólidos que se quieren secar en estos equipos deberán ser resistentes a la fricción ya que si no se maltrata en demasía el grano disminuyendo así la calidad del producto, cuando esto ocurre es necesario contar con un ciclón para recolectar los finos formados por el contacto entre los sólidos y las paredes del recipiente. Otra desventaja que hay que tomar en cuenta principalmente en el modelado de estos secadores es que si se supone un secador muy grande, las caídas de presión aumentarán y esto traerá como consecuencia un aumento en los costos de mantenimiento del equipo y de servicios de operación.

3.1.1 Densidad de la Partícula

Se conocen tres tipos de densidades:

- La densidad empacada, que se obtiene considerando a los sólidos y los espacios vacíos entre ellos, referidos al mismo volumen que los contiene.
- La densidad aparente, que se obtiene considerando a los sólidos, referidos al volumen que los contiene, corregido por el volumen correspondiente a los espacios vacíos existente entre las partículas.
- La densidad real, que es la densidad formada únicamente por los sólidos, referidos al volumen que los contiene, corregido por el volumen correspondiente a los espacios vacíos entre e intra partícula.

3.1.2 Velocidad Mínima de Fluidización

La velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) se obtiene al relacionar la caída de presión ejercida por el gas al atravesar el lecho en función de la velocidad superficial del gas (Kunii y Levenspiel, 1991). En la Figura 3.2; se presenta un gráfico en donde se observa de manera experimental como obtener la velocidad mínima de fluidización a partir de la caída de presión dentro del lecho a medida que aumenta la velocidad del gas de fluidización. En una primera zona, se observa regularmente una dependencia lineal de la presión con respecto a la velocidad del aire, esta zona corresponde al lecho fijo, después de seguir aumentando la velocidad del gas de fluidización, se llega a un punto (punto A) en donde se observa un cambio brusco en la pendiente, y es ahí donde se localiza la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}). A partir de este punto, la velocidad superficial del gas se traduce en una caída de presión constante en el lecho; a esta zona se le conoce como lecho fluidizado.

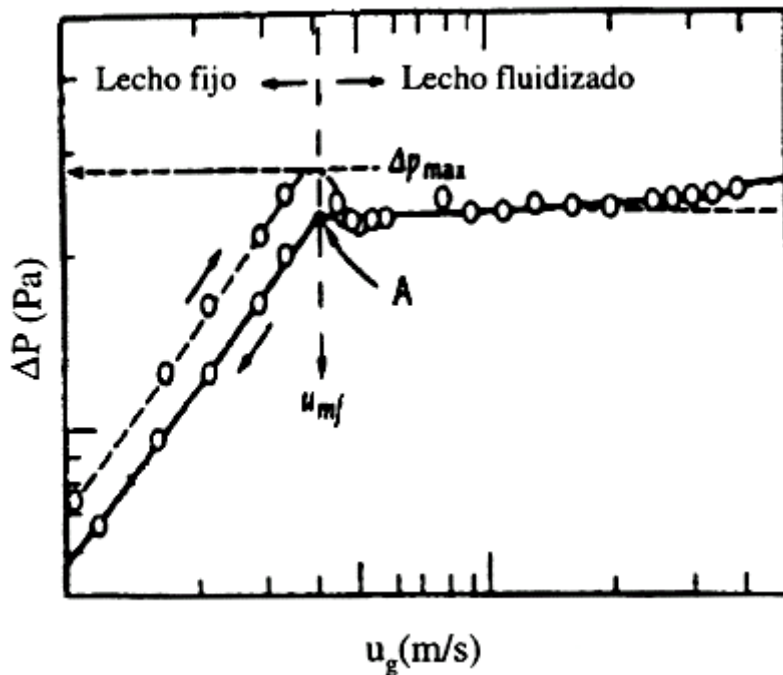


Fig. 3.2 Curva característica para la obtención de la velocidad mínima de fluidización. (Pérez, 2000)

3.2 Planteamiento del Modelo Matemático para el modelo homogéneo.

Las ecuaciones fundamentales de balance de materia y energía que describen el modelo son:

Balance de materia:

$$\dot{Q}_a(Y - Y_1) = -m_s \frac{d\bar{M}}{dt} \quad (3.1)$$

La Ec. (3.1), se interpreta como la humedad retirada por el aire es igual a la humedad cedida por el sólido.

Balance de energía o entalpía:

En el balance de energía se asume que la temperatura del aire a la salida (T), es igual a la temperatura de referencia (T*).

$$\dot{Q}_a(Cp_A + Y_1 Cp_V)(T_1 - T^*) = \dot{Q}_a(Y - Y_1)\Delta H + m_s (Cp_s + \bar{M}Cp_w) \frac{dT}{dt} \quad (3.2)$$

La Ec. (3.2), expresa cómo la entalpía del aire que entra es igual a la entalpía de la humedad evaporada que es llevada por el aire, más la energía necesaria para calentar el sólido y ceder un gramo de agua.

La condición inicial para la ecuación de energía es:

$$C.I.1. \quad t = 0; \quad T = T^* = T_0 \quad (3.3)$$

Del análisis de grados de libertad se tienen tres incógnitas Y, \bar{M} y T con dos ecuaciones diferenciales ordinarias (balance de materia y energía) y una ecuación diferencial parcial (ecuación de difusión) que se resuelve para obtener la

distribución de concentración $M(r,t)$ e integrarla en todo el volumen del sólido para obtener $\bar{M}(t)$.

De acuerdo a las suposiciones del modelo homogéneo, la migración de humedad desde el centro del sólido esférico a su superficie es en dirección radial, es decir que $M = M(r,t)$ y que la difusividad efectiva $D_{ef} = D_{ef}(M,T)$, se obtiene:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[D_{ef} \left(r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right) \right] \quad (3.4)$$

Desarrollando la Ec. (3.4), se obtiene:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial D_{ef}}{\partial M} \right) \left(\frac{\partial M}{\partial r} \right)^2 \quad (3.5)$$

Se observa que la Ec. (3.5) es una ecuación diferencial parcial que es no lineal por el segundo término del lado derecho de la ecuación; la expresión de difusividad efectiva para el grano de trigo duro se presenta en el Apéndice A, Sección A.1. La condición inicial y de frontera para evaluar la Ec. (3.5), son:

$$\text{C.I.2. } t = 0; \quad 0 \leq r \leq R_s; \quad M = M_0 = \bar{M} \quad (3.6)$$

La primera condición frontera considera la geometría del sólido, tomando como referencia el centro de la partícula esférica donde no existe flux o gradiente de concentración.

$$\text{C.F.1. } t \geq 0; \quad r = 0; \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \quad (3.7)$$

La segunda condición frontera, considera como punto de referencia la superficie de la partícula esférica; indicando que la humedad perdida por el sólido es la humedad ganada por el aire.

$$\text{C.F.2. } t > 0; \quad r = R_s; \quad -D_{ef} A_s \frac{\partial(M\rho_s)}{\partial r} = \frac{m_s}{n_s} \left(-\frac{d\bar{M}}{dt} \right) \quad (3.8)$$

Donde:

$$n_s = \frac{m_s}{\rho_s V_s} \quad (3.9)$$

Combinando la Ec. (3.1), con la Ec. (3.8) y Ec. (3.9), se obtiene que la condición de frontera dos (C.F.2.) puede expresarse de la siguiente forma:

$$\left(-\frac{\partial M}{\partial r} \right)_{r=R_s} = \frac{\dot{Q}a}{m_s D_{ef} A_s} (Y - Y_1) V_s \quad (3.10)$$

El contenido de humedad promedio dentro de la partícula después del tiempo t es obtenido integrando sobre el volumen de la partícula.

$$\bar{M}(t) = \frac{4\pi}{V_s} \int_0^{R_s} r^2 M(r, t) dr \quad (3.11)$$

Una vez obtenido $\bar{M}(t)$, quedan dos variables más por obtener Y y T para poder dar solución a los balances de materia y energía simultáneamente. Asumiendo que el aire en el lecho se comporta como un gas ideal, la humedad del aire a la salida (Y) en términos de saturación relativa (f) y la presión de vapor de agua pura a la temperatura del lecho, esta dada por (Kiefer, 1941; Zuritz y Singh, 1982) (Zahed y Epstein, 1992):

$$Y = \frac{0.622 P_v f}{(P - P_v f)} \quad (3.12)$$

Donde:

$$P_v = 100 \exp \left[27.0214 - \frac{6887}{T} - 5.31 \ln \left(\frac{T}{273.16} \right) \right] \quad (3.13)$$

La saturación relativa del aire a la salida esta directamente relacionada con el contenido de humedad de los sólidos en el equilibrio mediante la isoterma

de desorción termodinámica. Para granos almidonados, estas isotermas están mejor representadas por la ecuación de Henderson (Henderson, 1952; Thompson et al; 1968; Pfof et al. 1976; Chen y Morey, 1989) (Zahed y Epstein, 1992).

$$f = 1 - \exp[-K(100Me)^N(T - 273.16 + C)] \quad (3.14)$$

Donde: K, N y C: Son constantes empíricas para diferentes tipos de sólidos (granos), los valores para el grano de trigo duro se presentan en el Apéndice A, Sección A.2.

El calor isostérico de desorción-vaporización (ΔH) necesaria para desorber ó vaporizar agua de los granos de cereal a concentración constante, esta dada por la ecuación de Clausius-Clapeyron, considerando para el caso de un gas ideal y un volumen específico de líquido el cual es relativamente despreciable al volumen específico de vapor (Pitzer y Brewer, 1961) (Zahed y Epstein, 1992), se tiene:

$$\Delta H = \frac{R_v T^2}{P_v} \left(\frac{\partial P_v}{\partial T} \right) + \frac{R_v T^2}{f} \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) \quad (3.15)$$

El primer término de la derecha de la Ec. (3.15), representa el calor de vaporización del agua a temperatura constante y el segundo término representa la diferencial de calor neto de desorción a temperatura y humedad de equilibrio dados. Resolviendo las diferenciales parciales de la Ec. (3.15) se tiene:

$$\Delta H = R_v T^2 \left[\frac{6887}{T^2} - \frac{5.31}{T} + \frac{(1-f)K(100Me)^N}{f} \right] \quad (3.16)$$

Para la simulación del secado de un sólido en un SLFL, se escogió el grano de trigo duro, debido a la simplicidad de su difusividad efectiva y a la cantidad de datos teóricos-experimentales que existen en la literatura. Los valores de los parámetros para el grano de trigo se presentan en el Apéndice A, Sección A.3.

3.3 Método de Solución del Modelo Homogéneo.

El sistema de ecuaciones anteriormente descritas, es un sistema que consiste en ecuaciones diferenciales parciales no lineales y ordinarias, así como de un conjunto de ecuaciones algebraicas e integral. La complejidad de las ecuaciones del modelo prácticamente prohíbe una solución analítica. Por lo que se necesitan de técnicas de solución numéricas para dar solución al modelo.

Entre los métodos numéricos utilizados para la solución del modelo se encuentra el método de diferencias finitas; la función principal de este método es transformar las ecuaciones diferenciales parciales en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. La transformación se hace reemplazando las derivadas espaciales en las ecuaciones diferenciales parciales con una aproximación algebraica mediante el uso de los diferentes esquemas del método de diferencias finitas implícitas, ya sea hacia atrás, hacia adelante o centrales. Así, el dominio espacial de la Ec. (3.5) fue discretizada en n nodos ó partes como se muestra en la Figura 3.3; para las simulaciones realizadas la discretización se realizo para 150 nodos con un paso de integración de 0.001 minuto.

Así, para todos los nodos internos $1 \leq j \leq n$ la ecuación diferencial parcial se discretizó usando la aproximación de diferencias centrales. Para el nodo contiguo al nodo de condición frontera uno (C.F.1.) se uso la aproximación de diferencias hacia delante y para el nodo n y el nodo de la condición frontera dos (C.F.2.) se uso la aproximación de diferencias hacia atrás; una vez obtenido el conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODEs) como resultado de la discretización espacial, se implemento el método de Runge-Kutta de cuarto orden para integrar el conjunto de ODEs. La Ec. (3.11), se resolvió numéricamente por el método del trapecio.

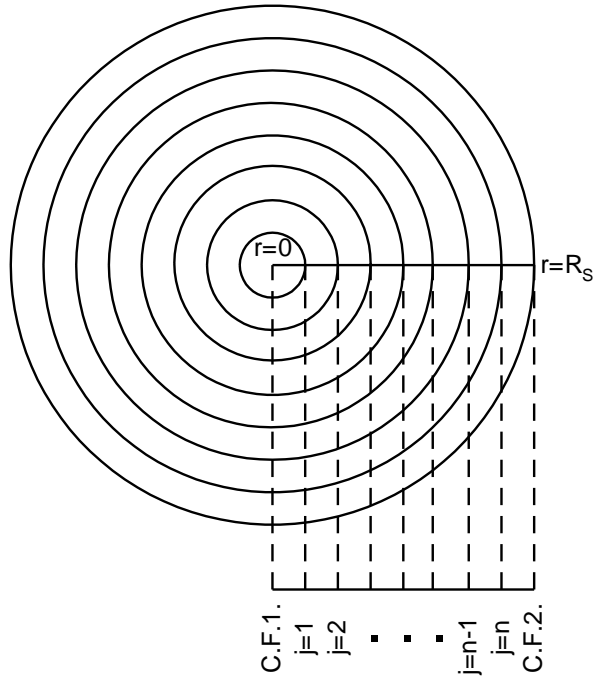


Fig. 3.3 Discretización del dominio espacial en la partícula esférica.

De esta manera las ecuaciones discretizadas en el dominio del espacio en la partícula son las siguientes:

Para la C.F.1. (Ec. 3.7) se tiene que aplicando diferencias finitas hacia adelante se obtiene que $M_0 = M_1$ y aplicando diferencias finitas centrales para la primera y segunda derivada del dominio espacial, en el primer nodo ($j=1$) se tiene:

Discretización para la primera derivada es:

$$M'_{(j=1)} = \frac{M_{j+1} - M_{j-1}}{2\Delta r} \quad (3.17)$$

Discretización para la segunda derivada es:

$$M''_{(j=1)} = \frac{M_{j+1} - M_{j-1}}{\Delta r^2} \quad (3.18)$$

De esta manera se tiene que la ecuación de difusión discretizada para el primer nodo, es:

$$M_t = D_{ef} \left(M''_{j=1} + \frac{2}{r_1} M'_{j=1} \right) \quad (3.19)$$

Para los nodos internos $2 \leq j \leq n-1$, se tiene que aplicando diferencias finitas centrales en la primera y segunda derivada se obtiene:

Discretización para la primera derivada es:

$$M'_{(2 \leq j \leq n-1)} = \frac{M_{j+1} - M_{j-1}}{2\Delta r} \quad (3.20)$$

Discretización para la segunda derivada es:

$$M''_{(2 \leq j \leq n-1)} = \frac{M_{j+1} - 2M_j + M_{j-1}}{\Delta r^2} \quad (3.21)$$

De esta manera se tiene que la ecuación de difusión discretizada para los nodos internos, es:

$$M_t = D_{ef} \left(M''_{(2 \leq j \leq n-1)} + \frac{2}{r_{(2 \leq j \leq n-1)}} M'_{(2 \leq j \leq n-1)} \right) \quad (3.22)$$

En la C.F.2. (Ec. 3.10) al aplicarle diferencias finitas hacia atrás, se obtiene:

$$M_{n+1} = M_n - \Delta r \beta \quad (3.23)$$

Donde

$$\beta = \frac{\dot{Q}_a Y - Y_1 V_s}{m_s D_{ef} A_s} \quad (3.24)$$

Aplicando diferencias finitas centrales para la primera y segunda derivada del dominio espacial, en el último nodo ($j = n$) se tiene:

Discretización para la primera derivada es:

$$M'_{(j=n)} = \frac{M_{j+1} - M_{j-1}}{2\Delta r} \quad (3.25)$$

Discretización para la segunda derivada es:

$$M''_{(j=n)} = \frac{M_{j+1} - 2M_j + M_{j-1}}{\Delta r^2} \quad (3.26)$$

De esta manera se tiene que la ecuación de difusión discretizada para la condición de frontera externa (C. F. 2.), es:

$$M_t = D_{ef} \left(M''_{(j=n)} + \frac{2}{r_n} M'_{(j=n)} \right) \quad (3.27)$$

Se puede observar que la parte no lineal de la ecuación de difusión (Ec. 3.5) no aparece en las ecuaciones discretizadas, esto es debido a que el material o grano de estudio es el trigo duro y de acuerdo a la expresión de la difusividad efectiva (Ec. A.1) presentada en el Apéndice A, Sección A.1. Esta no presenta una dependencia con respecto a la humedad sino solamente a la temperatura por lo que $\frac{\partial D_{ef}}{\partial M} = 0$ y por lo tanto todo el termino se hace cero.

Los perfiles de humedad dentro de la partícula a lazo abierto se presentan en el Apéndice B, Sección B.1, se observa que los cambios de concentración importantes dentro de la partícula ocurren a tiempos cortos del proceso menores a 50 minutos, esto debido a una diferencia de temperatura alta entre el aire de alimentación y el sólido.

Capítulo 4

Análisis de las Simulaciones a Lazo Abierto y Cerrado del Secado de Trigo en un SLFL.

4.1 Identificación de las Variables del Proceso.

En la Figura 4.1, se presentan esquemáticamente las variables del proceso. Se observa que es un sistema multivariable con tres entradas de las cuales dos son variables manipulables y una es variable de carga o de perturbación potencial y tres variables controlables como salida. Las variables manipulables son la temperatura y flujo de aire a la entrada y la variable de perturbación potencial esta conformada por la humedad del aire a la entrada y las variables controlables están integradas por la temperatura y la humedad promedio en los sólidos y la humedad del aire a la salida. La humedad del aire a la entrada se consideró constante aunque muchas veces puede comportarse como una función oscilatoria con gradientes altos de humedad por lo que se necesitaría un esquema de control servo-regulador.

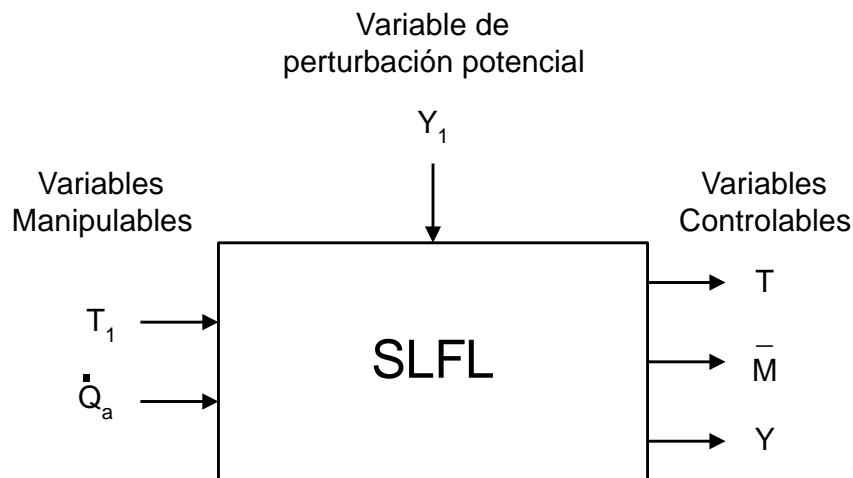


Fig. 4.1 Variables del proceso de un SLFL

4.2 Sistema a Lazo Abierto con Perturbaciones en las Variables de Temperatura y Flujo de Aire a la Entrada.

4.2.1 Sistema a Lazo Abierto con Perturbaciones en la Temperatura del Aire a la Entrada del SLFL.

En la Figura 4.2, se presenta la respuesta del proceso a lazo abierto para la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para tres diferentes valores en la temperatura del aire a la entrada (T_1). Se observa que mientras más grande sea el valor inicial de T_1 , el tiempo necesario para alcanzar un contenido de humedad promedio específico de 0.03565 g/g (es decir el 10% de la humedad inicial en la partícula) es mucho menor. Por ejemplo para una temperatura alta de $T_1 = 70^\circ\text{C}$, el tiempo en alcanzarse la humedad especificada fue de aproximadamente 245 minutos con una temperatura en la partícula de 69.14°C ; en contraste, las otras dos respuestas de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula a T_1 nominal (60°C) y mínima (50°C) en las que el periodo de simulación (450 minutos) no fue lo suficientemente grande para alcanzar la humedad promedio especificada; se obtuvo que a los 450 minutos y una temperatura en la partícula de 59.77°C el contenido de humedad promedio en la partícula fue de 0.03734 g/g y para la corrida a T_1 baja a un tiempo de 450 minutos se obtuvo una temperatura en la partícula de 49.34°C con un contenido de humedad promedio en la partícula de 0.06414 g/g. También se puede observar en las respuestas del contenido de humedad del aire a la salida, entre mayor es la temperatura del aire a la entrada mayor será también la humedad del aire a la salida; lo anterior es debido a que el aumento de la temperatura del aire a la entrada proporciona más energía a las partículas, causando que se evapore más humedad. Además, cuando se tienen altas temperaturas en la partícula ésta incrementa la difusividad másica haciendo que el contenido de humedad promedio en la partícula disminuya y que la humedad del aire a la salida aumente.

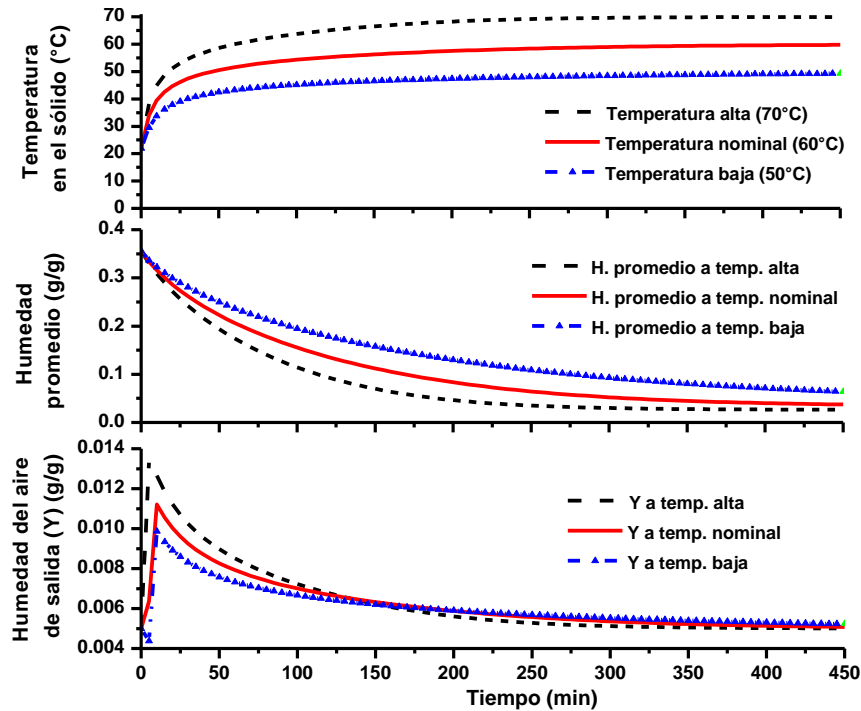


Fig. 4.2 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para un flujo de aire constante ($\dot{Q}_a = 13690 \text{ g/g}$) y perturbaciones en la temperatura del aire a la entrada.

También se observa en la respuesta de la humedad promedio en la partícula, que a períodos de tiempo inicial no presenta las pequeñas variaciones que generalmente presentan las cinéticas secado experimentales, esto puede deberse a que el flujo de aire alimentado sea lo suficientemente grande como para que el efecto se vea menguado; o también a las características del modelo bajo estas condiciones. Generalmente este efecto de secado inicial suele ser muy insignificante con respecto a todo el periodo de secado. Por lo que no debería afectar en las simulaciones realizadas.

4.2.2 Sistema a Lazo Abierto con Perturbaciones en el Flujo de Aire a la Entrada del SLFL.

En la Figura 4.3, se presenta la respuesta del proceso a lazo abierto para la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para tres diferentes valores en el flujo de aire a la entrada (\dot{Q}_a) manteniendo constante la temperatura del aire a la entrada ($T_1 = 70^\circ\text{C}$).

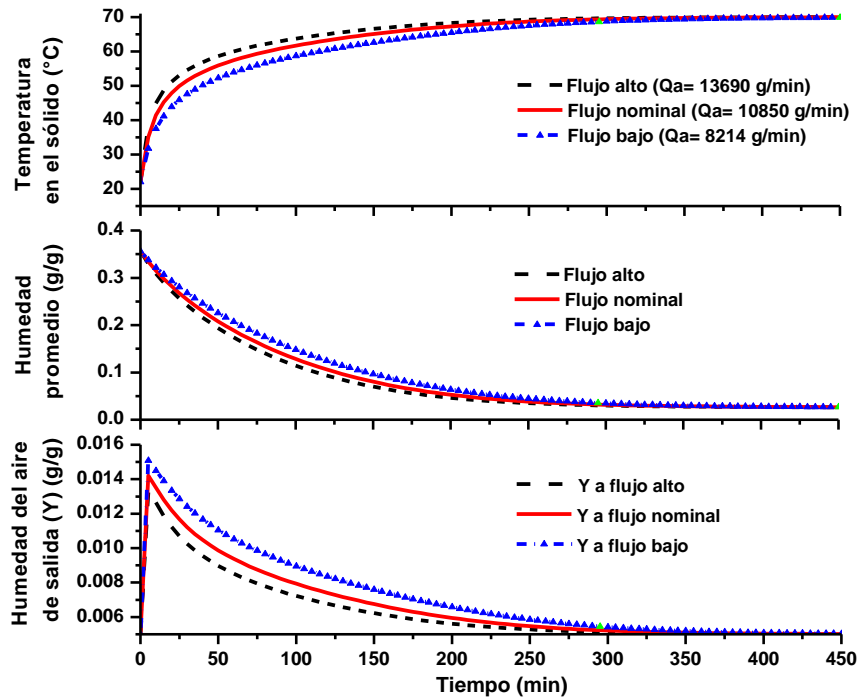


Fig. 4.3 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para una temperatura del aire constante ($T_1 = 70^\circ\text{C}$) con perturbaciones en el flujo de aire a la entrada.

Se observa en las respuestas de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, que a flujo alto ($\dot{Q}_a = 13690 \text{ g/g}$ equivalente a $2.4U_{mf}$ y 26.2% más del valor nominal), nominal ($\dot{Q}_a = 10850 \text{ g/g}$ equivalente a $1.9U_{mf}$) y bajo ($\dot{Q}_a = 8214 \text{ g/g}$ equivalente a $1.4U_{mf}$ y 24.3% menos del valor

nominal), se alcanza el contenido de humedad promedio especificado para la partícula de 0.03565 g/g (es decir el 10% de 0.3565 g/g que representa la humedad inicial en la partícula) también se observa que esto ocurre a diferentes tiempos; por ejemplo para un flujo alto de aire a la entrada el 10% de humedad inicial en la partícula es alcanzado en 245 minutos con una temperatura en la partícula de 69.14 °C, para un flujo nominal de aire a la entrada esto ocurre a los 265 minutos con una temperatura en la partícula de 68.95 °C y finalmente para un flujo de aire bajo a la entrada el tiempo en alcanzarse el 10% de humedad es de 295 minutos con una temperatura en la partícula de 68.67 °C. También el gradiente en el contenido de humedad promedio en la partícula no es muy marcado en comparación con las respuestas del contenido de humedad promedio presentadas en la Figura 4.2. Lo cual indica que la perturbación en la variable T_1 afecta más al sistema que la perturbación de la variable \dot{Q}_a .

En las respuestas del contenido de humedad del aire a la salida se puede observar que entre menor es el flujo de aire alimentado mayor es la humedad inicial en la humedad del aire a la salida, lo anterior se debe a que el tiempo de residencia del aire alimentado es mayor a flujos bajos, lo anterior también tiene un inconveniente ya que a flujos bajos la velocidad de secado es mucho menor como se observa en la Fig. 4.3 donde a mayor flujo de aire alimentado la humedad del aire a la salida llega más rápido al estado estacionario.

4.3 Sistema a Lazo Abierto con Perturbaciones Tipo Escalón y Rampa en las Variables de Temperatura y Flujo de Aire a la Entrada del SLFL.

4.3.1 Sistema a Lazo Abierto con Perturbaciones Tipo Escalón en las Variables de Temperatura y Flujo de Aire a la Entrada Transcurridos 50 Minutos del Proceso.

En la Figura 4.4-a, se presenta la respuesta del proceso a lazo abierto de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida con perturbaciones tipo escalón en las variables manipulables de temperatura y flujo de aire a la entrada transcurridos 50 minutos del proceso.

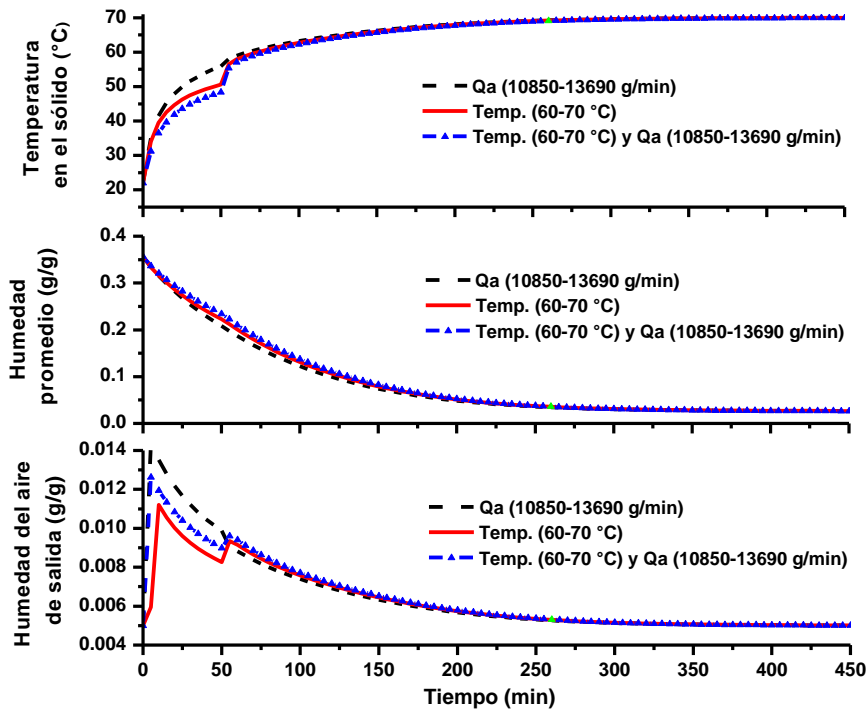


Fig. 4.4-a Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida con perturbaciones tipo escalón en la temperatura y flujo de aire a la entrada transcurridos 50 minutos del proceso.

Se puede apreciar que el cambio escalón en el flujo de aire a la entrada del secador de lecho fluidizado por lotes (SLFL) de 10850 g/min a 13690 g/min

transcurridos 50 minutos, no afecta de manera significativa la respuesta del proceso de secado como se puede observar en la respuesta de la temperatura en la partícula y la humedad del aire a la salida, en cambio cuando se perturba T_1 el efecto que se observa en las respuestas antes mencionadas es significativa, de igual manera ocurre cuando se perturban simultáneamente la T_1 y el \dot{Q}_a donde se muestra un efecto más significativo en la temperatura de la partícula y en la humedad del aire a la salida. De lo anterior se deduce que la humedad del aire a la salida es mayor cuando se realiza la perturbación de tipo escalón en el \dot{Q}_a no por la perturbación en la variable misma si no por la alta temperatura del aire con que es alimentada. Las respuestas del contenido de humedad promedio en la partícula no reflejan el efecto de las perturbaciones tipo escalón de manera significativa como en las respuestas de la temperatura del sólido y humedad del aire a la salida, posiblemente porque se trata de un sistema sobre amortiguado; de lo anterior se deduce que si se pensara en desarrollar un sistema de control de tipo SIMO la variable a perturbar sería la temperatura del aire a la entrada por el efecto visiblemente significativo que se presentan en las respuestas de la Figura 4.4-a.

4.3.2 Sistema a Lazo Abierto con Perturbaciones Tipo Escalón en las Variables de Temperatura y Flujo de Aire a la Entrada Transcurridos 100 Minutos del Proceso.

En la Figura 4.4-b, se presenta la respuesta del proceso a lazo abierto de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida con perturbaciones tipo escalón en las variables manipulables de temperatura y flujo de aire a la entrada una vez transcurridos 100 minutos del proceso. Se puede observar que las características de las respuestas presentadas en la Figura 4.4-b son muy similares a las presentadas en la Figura 4.4-a; solamente se comentara las pequeñas diferencias relevantes que se presentan entre una y otra.

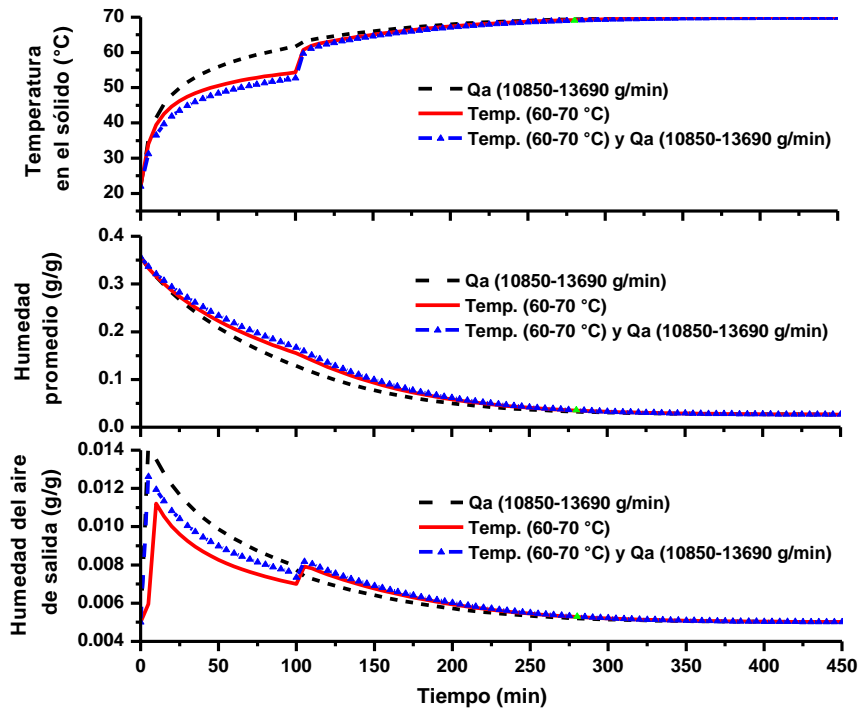


Fig. 4.4-b Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida con perturbaciones tipo escalón en la temperatura y flujo de aire a la entrada transcurridos 100 minutos del proceso.

Sí la perturbación de tipo escalón en las variables manipulables se efectúa a periodos de tiempo cercanos al arranque del proceso, la respuesta del contenido de humedad promedio alcanza en menor tiempo la humedad especificada (es decir el 10% de la humedad inicial en la partícula); también se observa que el efecto en la respuesta de la temperatura en la partícula y la humedad del aire a la salida debido a la perturbación en la T_1 y la perturbación simultanea de la T_1 y el \dot{Q}_a ya no es tan marcada como en la Figura 4.4-a es visible la diferencia en el efecto causado en las respuestas del proceso (variables controlables) por las perturbaciones anteriormente descritas.

4.3.3 Sistema a Lazo Abierto con Perturbaciones Sucesivas Tipo Escalón en las Variables de Temperatura y Flujo de Aire a la Entrada del SLFL.

En la Figura 4.4-c, se presenta la respuesta del proceso a lazo abierto de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida con perturbaciones sucesivas tipo escalón en las variables manipulables de temperatura y flujo de aire a la entrada a diferentes tiempos programados del proceso (50 y 75 minutos). Las perturbaciones se realizaron de la siguiente forma: para la perturbación en escalón en el flujo de aire de 10850 g/min a 13690 g/min se tomo un intervalo de 25% de \dot{Q}_a y para la perturbación en escalón de T_1 de 60°C a 70°C se tomo un intervalo de 5°C entre cada cambio escalón.

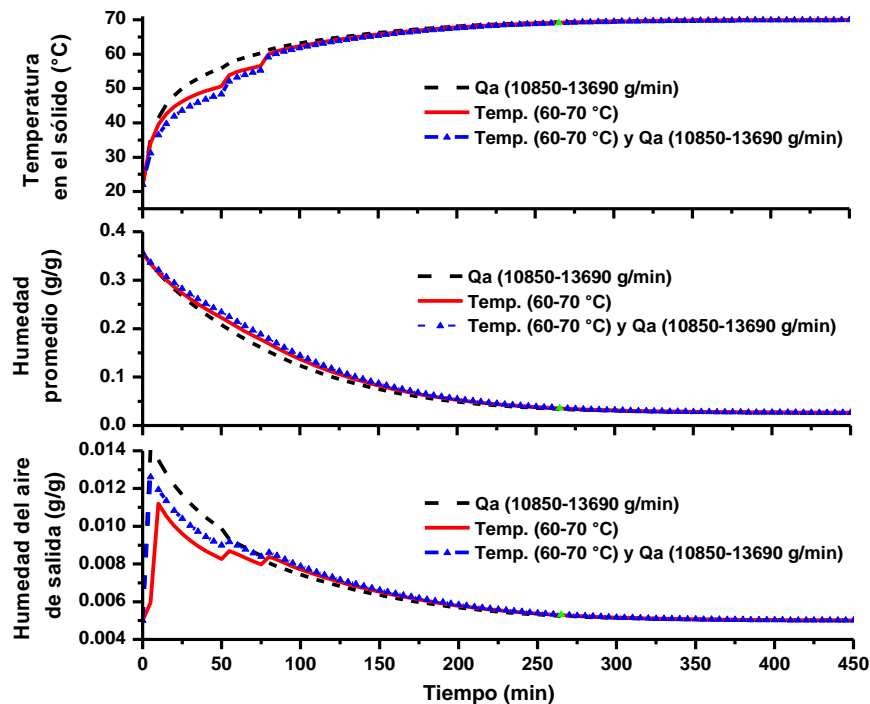


Fig. 4.4-c Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida con perturbaciones sucesivas tipo escalón en la temperatura y flujo de aire a la entrada a diferentes tiempos programados.

Al igual que las respuestas del proceso (variables controlables Figuras 4.4-a y 4.4-b) las respuestas de la Figura 4.4.-c también presentan las mismas características en cuanto al efecto y comportamiento. De la observación de la respuesta de la temperatura en el sólido se puede deducir que entre más escalones sucesivos se realicen en un tiempo no muy cercano al arranque del proceso, es decir arriba de 75 minutos, la respuestas de temperatura en el sólido presentaran comportamientos y efectos similares a las perturbaciones en T_1 y la perturbación simultanea de la T_1 y \dot{Q}_a . Nuevamente se deja ver también en esta simulación que para este tipo de perturbaciones (escalón) la variable T_1 es la que más afecta al proceso de secado.

4.3.4 Sistema a Lazo Abierto con Perturbaciones Tipo Rampa en la Temperatura del Aire a la Entrada del SLFL.

En la Figura 4.5-a, se presentan las perturbaciones tipo rampa en la variable de la temperatura del aire a la entrada del SLFL para un cambio de T_1 de 60°C a 70°C.

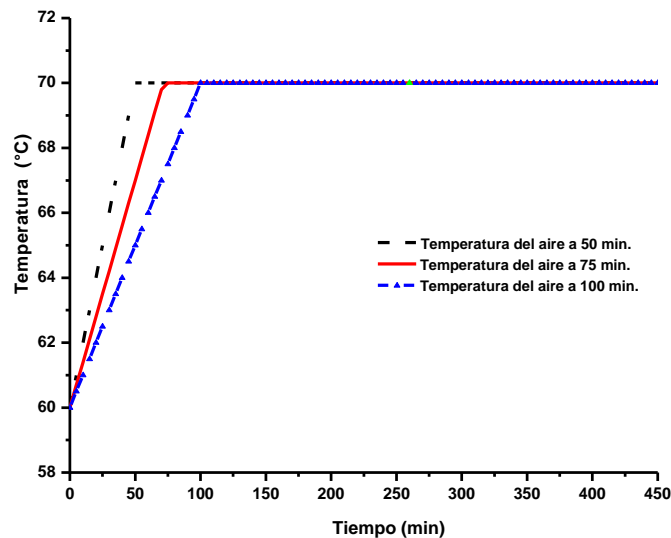


Fig. 4.5-a Perturbaciones tipo rampa en la temperatura del aire a la entrada del SLFL.

Las perturbaciones tipo rampa se realizaron para tres diferentes tiempos en las que la T_1 alcanzo el estado estacionario; los tiempos en que se alcanzo el estado estacionario fueron a los 50, 75 y 100 minutos. Lo anterior se realizo con el objetivo de analizar como afecta la perturbación tipo rampa de T_1 en las respuestas del proceso, las cuales se presentan en la Figura 4.5-b.

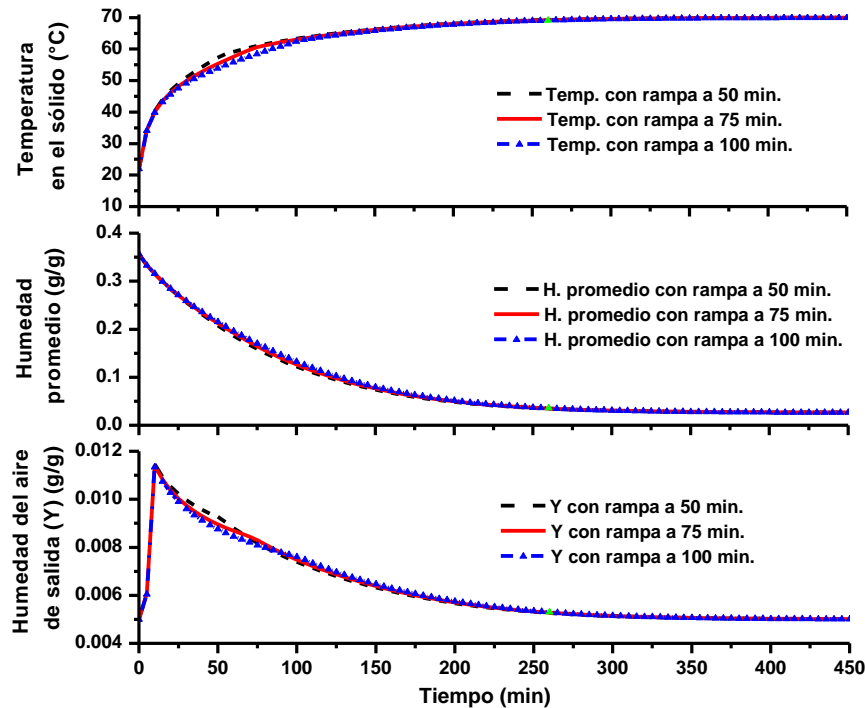


Fig. 4.5-b Dinámica de la temperatura y contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida con perturbaciones tipo rampa en la temperatura del aire a la entrada.

Se puede apreciar en la respuesta de la temperatura en la partícula que existe un pequeño gradiente de temperatura entre una respuesta y otra correspondiente a una perturbación tipo rampa en la T_1 , así entre más corto sea el tiempo en que la T_1 se estabilice el gradiente de temperatura alcanzado en la temperatura de la partícula será mayor; otra cosa importante que analizar es que este efecto en la temperatura de la partícula es tan insignificante que no se observa ningún efecto de importancia en las respuestas del contenido de humedad promedio en la partícula y la humedad del aire a la salida obteniendo de

esta manera respuestas similares para las diferentes perturbaciones tipo rampa presentadas en la Figura 4.5-a. De lo anterior se puede deducir que las perturbaciones tipo escalón anteriormente implementadas proporcionan un efecto más significativo en las respuestas del proceso en comparación con las perturbaciones tipo rampa en la T_1 .

4.3.5 Sistema a Lazo Abierto con Perturbaciones Tipo Rampa en el Flujo de Aire a la Entrada del SLFL.

En la Figura 4.6-a, se presentan las perturbaciones tipo rampa en la variable de la temperatura del aire a la entrada del SLFL para un cambio de \dot{Q}_a de 10850 g/g a 13690 g/g.

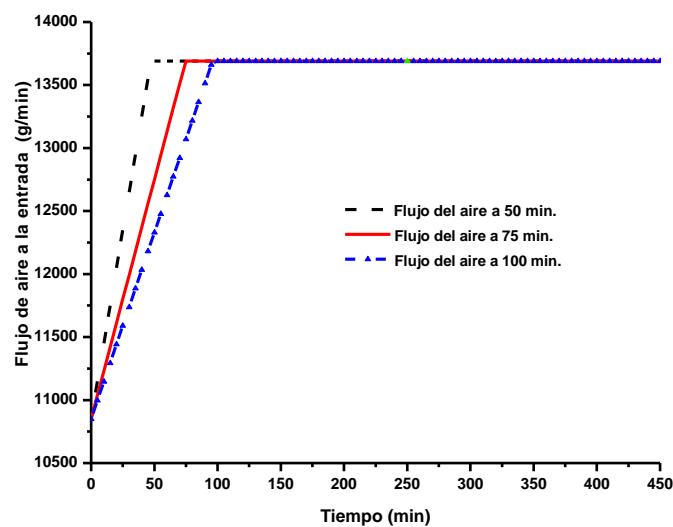


Fig. 4.6-a Perturbaciones tipo rampa en el flujo de aire a la entrada del SLFL.

Las perturbaciones tipo rampa se realizaron para tres diferentes tiempos en las que \dot{Q}_a alcanza el estado estacionario; los tiempos en que se alcanzo el estado estacionario fueron a los 50, 75 y 100 minutos. El efecto de las perturbaciones tipo rampa en \dot{Q}_a se observa en las respuestas del proceso Figura 4.6-b. Se puede apreciar en la respuesta de la temperatura y contenido de

humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida que las respuestas no muestran un cambio significativo entre una y otra, llegando al estado estacionario al mismo tiempo. Por lo anterior se deduce que la perturbación tipo rampa para diferentes tiempos en \dot{Q}_a no representa un cambio significativo. De manera general se puede deducir de las simulaciones anteriormente presentadas para perturbaciones tipo rampa en T_1 ó \dot{Q}_a los efectos y diferencias en las respuestas del proceso son insignificantes.

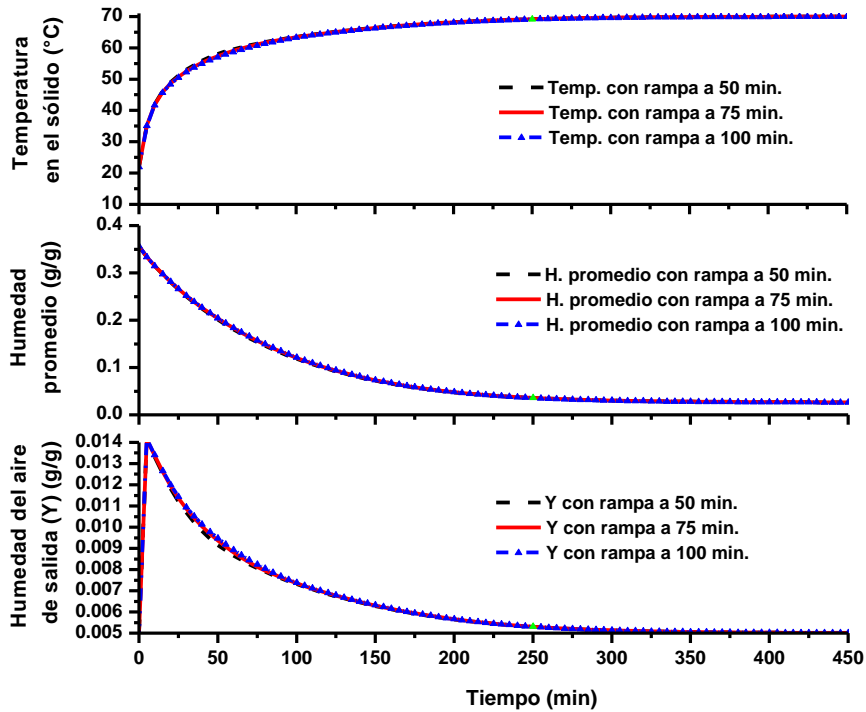


Fig. 4.6-b Dinámica de la temperatura y contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida con perturbaciones tipo rampa en el flujo de aire a la entrada.

4.4 Sistema a Lazo Abierto para Diferentes Valores en la Variable de Perturbación Potencial (Humedad del Aire a la Entrada del SLFL).

Estas simulaciones son importantes analizarlas ya que muchas veces en la industria no se tiene un buen control en el contenido de humedad del aire a la

entrada (Y_1), cuando esta variable presenta gradientes altos de concentración de humedad en tiempos cortos entonces esta variable se vuelve muy importante y por ello es necesario saber de que forma afectara al proceso; es también sabido, que el sistema de control retroalimentado trataría de corregir el problema forzando la variable manipulable para compensar las desviaciones del sistema, por lo que si no se cuenta con un sistema de control robusto todo el sistema podría volverse inestable. En la Figura 4.7 se presentan las simulaciones a lazo abierto de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula para diferentes concentraciones de humedad del aire a la entrada del SLFL.

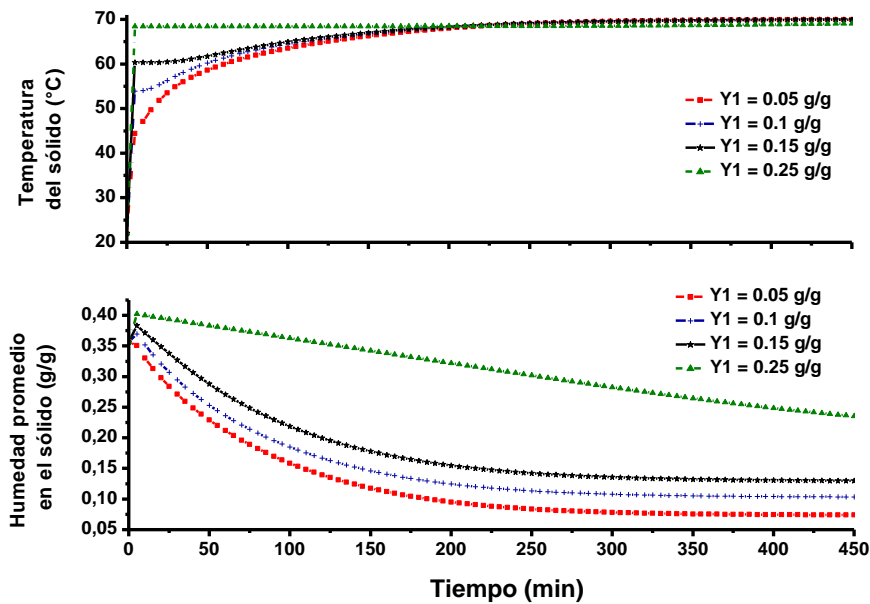


Fig. 4.7 Dinámica de la temperatura y contenido de humedad promedio en la partícula para diferentes concentraciones de humedad en el aire de entrada al SLFL.

Se realizaron varias simulaciones para cuatro valores diferentes de concentración inicial en la humedad del aire a la entrada ($Y_1 = 0.05$ g/g, $Y_1 = 0.1$ g/g, $Y_1 = 0.15$ g/g y $Y_1 = 0.25$ g/g).

En la respuesta de la temperatura del sólido a tiempos menores de 200 minutos los gradientes de temperatura dentro de la partícula son bastante

significativos, ya que entre mayor sea el contenido de humedad inicial en el aire de alimentación la temperatura en el sólido se estabiliza en menos tiempo alcanzando el sólido una temperatura muy cercana a la temperatura del aire a la entrada del SLFL. También en la respuesta del contenido de humedad promedio en la partícula se puede observar que a tiempos muy cortos (arranque del proceso) hay una pequeña oscilación, esto es debido al periodo en que el lecho empieza a fluidizarse y homogenizarse; también se observa que el gradiente entre una respuesta y otra dependiendo de la humedad del aire a la entrada se hace más pronunciada cuando el contenido de humedad del aire a la entrada es mayor. En la Figura 4.8 se presentan las simulaciones a lazo abierto de la humedad del aire a la salida para los valores de concentración de humedad del aire a la entrada del SLFL anteriormente mencionados.

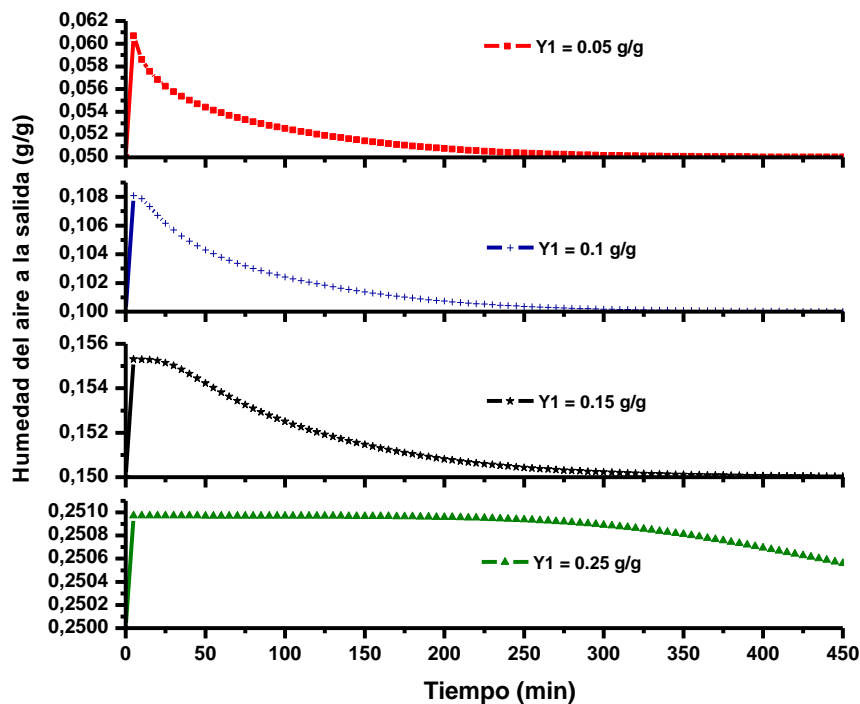


Fig. 4.8 Dinámica de la humedad del aire a la salida del SLFL para diferentes concentraciones de humedad en el aire de entrada.

Se puede observar de la Figura 4.8 que entre mayor en el contenido de humedad del aire a la entrada el tiempo en el que la respuesta de la humedad del

aire a la salida tarda en alcanzar su estado estacionario es mayor, esto debido a que el gradiente de humedad entre el aire a la entrada y la partícula va disminuyendo conforme se aumenta el contenido de humedad del aire a la entrada.

4.5 Sistema a Lazo Cerrado con Control Proporcional (P).

4.5.1 Implementación del Control Proporcional (P).

La estrategia a seguir para la implementación del control proporcional será manipular la temperatura del aire a la entrada (T_1) manteniendo constante el flujo de aire (\dot{Q}_a) y también despreciando la humedad del aire a la entrada por considerarse constante y casi seco. De esta manera el contenido de humedad promedio será afectado mediante una corrección de tipo exponencial que será implementada en la humedad de referencia (\bar{M}_r) como se presenta en la siguiente ecuación.

$$\bar{M}_r = (M_0 - M_{res}) \exp\left(\frac{-t}{t_r}\right) + M_{res} \quad (4.1)$$

Donde t_r (tiempo de referencia) es un valor que permite adimensionalizar en cuanto al tiempo la Ec. 4.1 además de especificar al sistema la trayectoria que debe seguir el proceso de secado. M_{res} (Humedad residual) especifica al sistema la humedad en el sólido que se quiere obtener. De esta manera la temperatura del aire a la entrada será una función de la corrección proporcional del error (control proporcional), como se presenta a continuación:

$$T_1 = \bar{T}_1 + K_p(\bar{M}_r - \bar{M}) \quad (4.2)$$

Donde: K_p = Ganancia proporcional.

4.5.2 Respuesta del Proceso a Lazo Cerrado para Diferentes Ganancias Proporcionales y un Tiempo de Referencia de 5 Minutos.

En la Figura 4.9 se presentan las simulaciones a lazo cerrado de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos; posteriormente se presentaran simulaciones para diferentes tiempos de referencias para el análisis de las respuestas del controlador proporcional. Se puede apreciar de la Figura 4.9 que a medida que la ganancia proporcional (K_P) aumenta, el tiempo en que se alcanza la humedad residual o especificada de 0.03565 g/g también va disminuyendo.

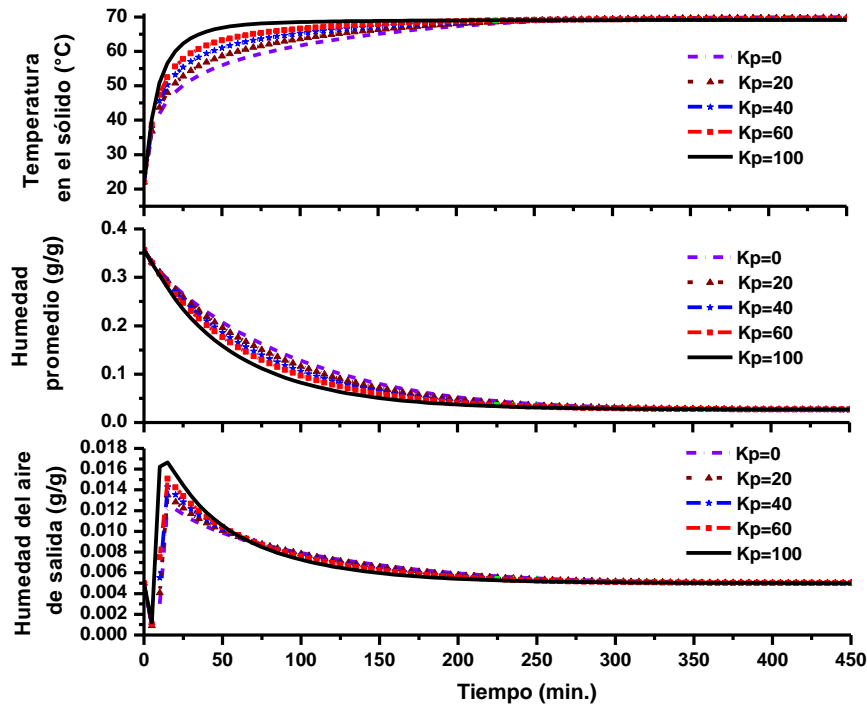


Fig. 4.9 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos.

Una desventaja del aumentar la ganancia proporcional es que el consumo energético para aumentar la temperatura del aire a la entrada también aumenta

por lo que el obtener un producto con una humedad específica en el menor tiempo posible se vera reflejado en el gasto energético.

El valor de ganancia proporcional que dio mejores resultados en la controlabilidad del proceso fue de $K_p = 100$, alcanzándose la humedad específica en el grano en 205 minutos lo cual representa una disminución de 50 minutos en la operación del proceso ya que a lazo abierto el tiempo en alcanzarse la humedad específica es de 265 minutos; también la temperatura en la partícula tuvo un valor de 69°C lo cual representa una operación segura para la integridad del sólido ya que investigaciones anteriores sobre el secado de granos (principalmente cereales) en SLFL han reportado que la temperatura máxima que soportan antes de empezar a quemarse es de 80°C , en contraste la temperatura máxima del aire a la entrada fue de 93°C . La pequeña oscilación que se manifiesta en la respuesta de la humedad del aire a la salida en el periodo inicial de secado es producto de la acción del controlador P, dicha oscilación no varía de manera considerable para cualquier valor de K_p . Otro aspecto importante de las respuestas del proceso es que a mayor ganancia proporcional la humedad promedio en la partícula disminuye y la humedad del aire a la salida aumenta debido a que la temperatura del aire a la entrada va aumentando proveyendo mayor energía a la partícula para la desorción del agua y vaporizarla. En la Figura 4.10, se presentan las perturbaciones en la variable manipulable de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia.

En la Figura 4.11, se presenta la discrepancia que existe entre la humedad de referencia y el contenido de humedad promedio en la partícula; en la cual se puede observar el tiempo en que se alcanza la humedad específica ó residual y el offset que existe entre ambas respuestas para cada ganancia del controlador proporcional.

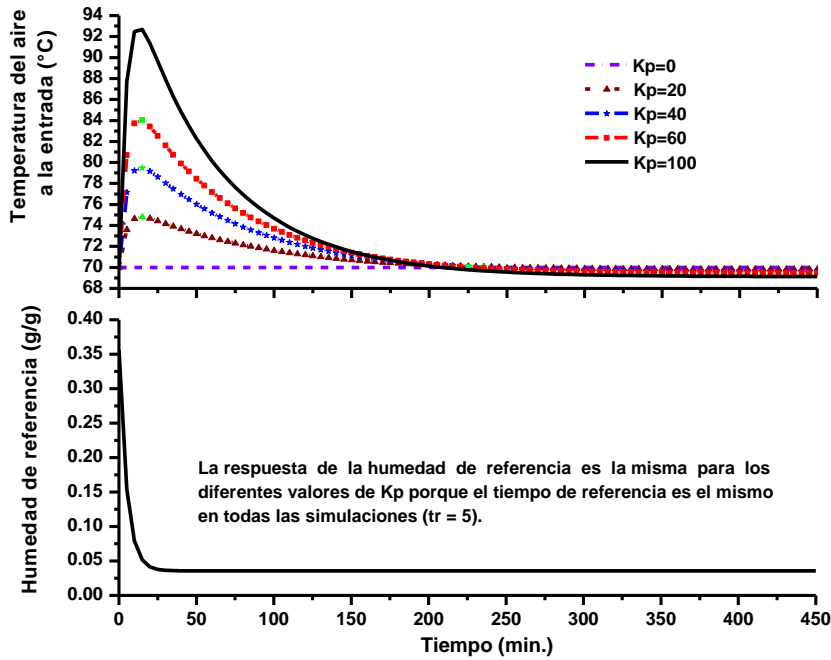


Fig. 4.10 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos.

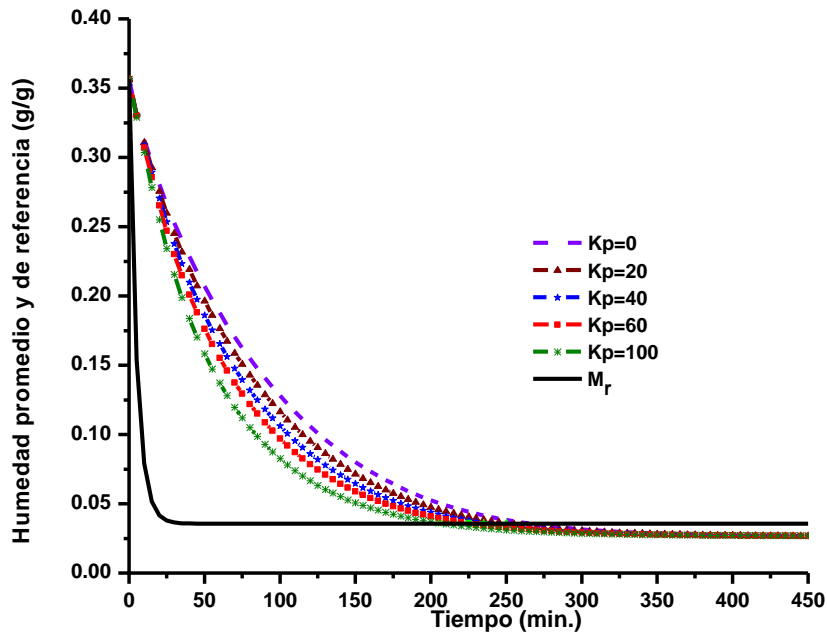


Fig. 4.11 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales.

4.5.3 Respuesta del Proceso a Lazo Cerrado para Diferentes Ganancias Proporcionales y un Tiempo de Referencia de 10 Minutos.

En la Figura 4.12 se presentan las simulaciones a lazo cerrado de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia igual a 10 minutos. También se puede apreciar como en el caso anterior que a mayores ganancias proporcionales el tiempo en alcanzarse la humedad específica es menor aunque el requerimiento energético sea mayor. Básicamente las respuestas del proceso presentadas en la Figura 4.12 presentan las mismas características y tendencias que las observadas en la Figura 4.9.

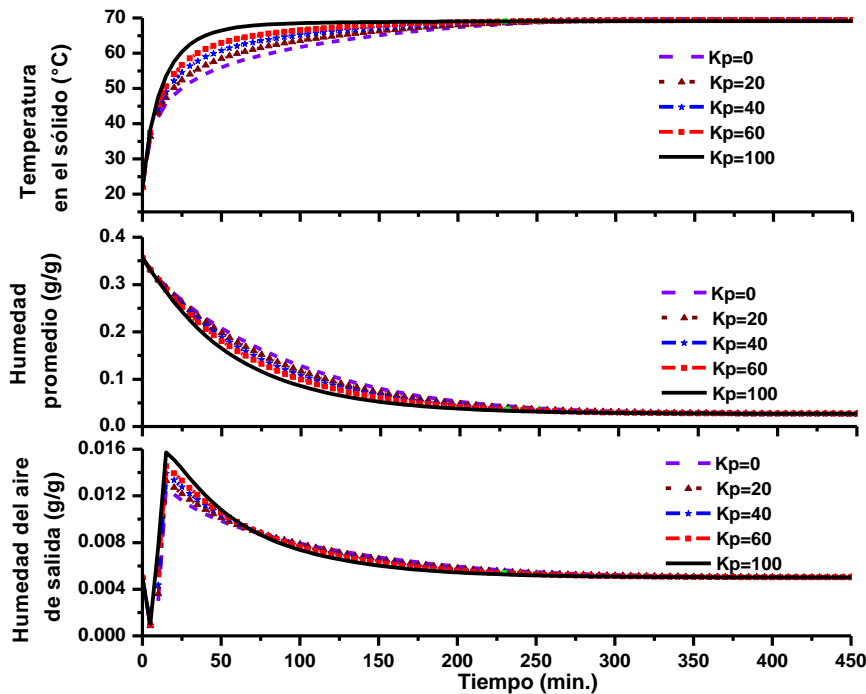


Fig. 4.12 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 10 minutos.

Entre menor sea el tiempo de referencia el tiempo en alcanzarse la humedad específica será también menor, pues la humedad de referencia llega

más rápido al valor de humedad específica ya que la parte exponencial de la Ec. 4.1 será mayor entre más pequeño sea el tiempo de referencia propuesto.

La dinámica de la humedad de referencia y de la temperatura del aire a la entrada se presentan en la Figura 4.13. En la humedad de referencia se puede observar que el estado estacionario se alcanza en 60 minutos a diferencia de la respuesta obtenida para un tiempo de referencia de 5 minutos que se obtiene el tiempo de asentamiento en 20 minutos aproximadamente.

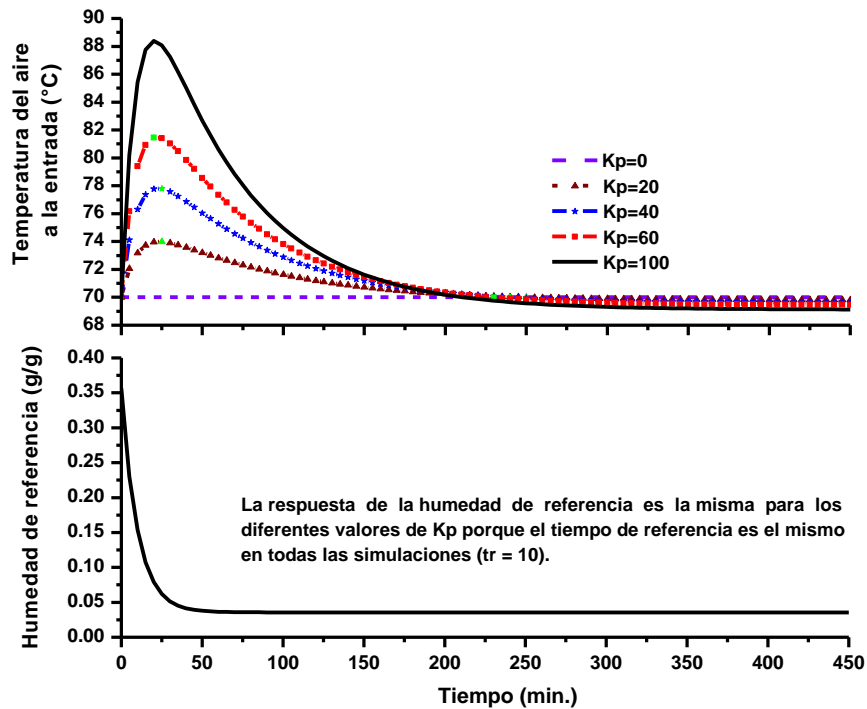


Fig. 4.13 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 10 minutos.

El obtener una respuesta en la humedad de referencia que llegue al estado estacionario en menos tiempo, permitirá que la respuesta del contenido de humedad promedio en la partícula presente un tiempo de asentamiento más rápido, aunque la desviación entre una y otra respuesta será mayor.

En la Figura 4.14, se presenta la desviación que existe entre la humedad de referencia y el contenido de humedad promedio en la partícula.

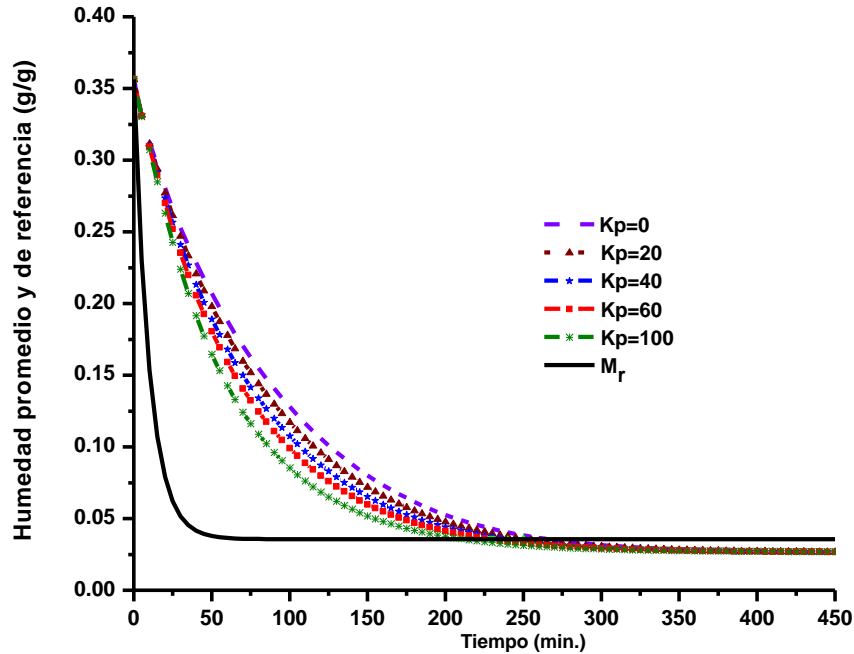


Fig. 4.14 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales.

En la Tabla 4.1, se presentan de manera resumida los tiempos en que se alcanza la humedad específica o residual en la partícula de 0.03565 g/g, también se presentan valores de la temperatura máxima del aire a la entrada y la temperatura en la partícula para diferentes ganancias proporcionales y tiempos de referencia. De la Tabla 4.1 se deduce que a mayores tiempos de referencia el consumo energético será menor pero también el tiempo en alcanzarse la humedad específica será más lento. Se observa también que a partir de un tiempo de referencia de 10 minutos en adelante, el tiempo en que se alcanza la humedad específica no varía mucho en comparación con una $t_r = 5$ minutos. El tiempo en que se alcanza la humedad específica a lazo abierto se redujo de 265 minutos a 205 minutos con el control proporcional, y con la implementación de un control

proporcional-integral (PI) se esperaría que el tiempo en que se alcance la humedad específica sea mucho menor.

Tabla 4.1 Valores de las constantes de un controlador Proporcional (P), con diferentes tiempos de referencia en la obtención de un contenido de humedad promedio en la partícula final de 0.03565 g/g.

Ganancia proporcional $\left(\frac{^{\circ}\text{C} * \text{g}_{\text{S.seco}}}{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}\right)$	Tiempo de referencia de 5 min.			Tiempo de referencia de 10 min.			Tiempo de referencia de 20 min.		
	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)
Kp = 0	265	69	70	265	69	70	265	69	70
Kp = 10	255	69	72	255	69	72	260	69	71
Kp = 20	250	69	75	250	69	74	250	69	73
Kp = 30	245	69	77	245	69	76	245	69	74
Kp = 40	235	69	80	240	69	78	240	69	76
Kp = 50	230	69	82	235	69	80	235	69	77
Kp = 60	225	69	84	230	69	81	230	69	78
Kp = 100	205	69	93	210	69	88	210	69	83

Los datos que se encuentran sombreados en la Tabla 4.1 representan los mejores valores obtenidos de la sintonización del controlador proporcional; se observa que los mejores resultados se obtuvieron con una $K_P=100$ para los tres diferentes tiempos de referencia.

4.6 Sistema a Lazo Cerrado con Control Proporcional-Integral (PI).

4.6.1 Implementación del Control Proporcional-Integral (PI).

La estrategia a seguir para la implementación del control proporcional-integral será manipular la temperatura del aire a la entrada (T_1) manteniendo constante el flujo de aire (\dot{Q}_a) y también despreciando la humedad del aire por considerarse como totalmente seco como anteriormente se planteó para el control proporcional. De esta manera la humedad de referencia (\bar{M}_r) será la misma que se implementó en el control de tipo proporcional Ec. 4.1. La temperatura del aire a la entrada con la adición de la acción integral del error se expresa de la siguiente forma:

$$T_1 = \bar{T}_1 + K_p(\bar{M}_r - \bar{M}) + K_I \int_{t_0}^t (\bar{M}_r - \bar{M}) dt \quad (4.3)$$

Donde:

$$K_I = K_p / \tau_I \quad (4.4)$$

τ_I = Tiempo integral

4.6.2 Respuesta del Proceso a Lazo Cerrado para Diferentes Ganancias Proporcionales y un Tiempo Integral de 5 Minutos.

En la Figura 4.15 se presentan las simulaciones a lazo cerrado de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 5 minutos; cabe mencionar que el tiempo de referencia en todas las simulaciones se tomó con un valor constante de 5 minutos, ya que con este tiempo de referencia se obtuvieron los mejores resultados en la sintonización del controlador de tipo proporcional.

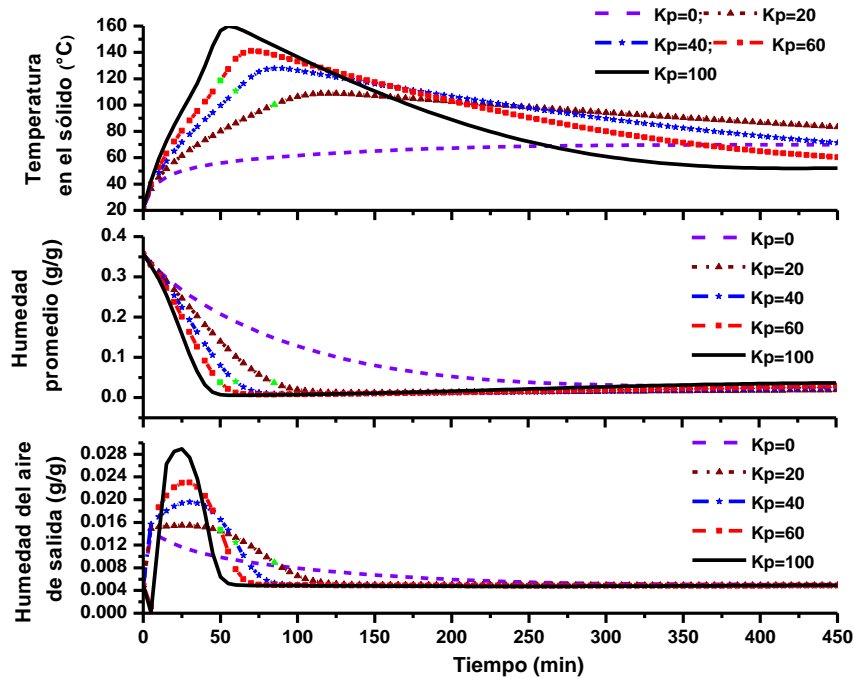


Fig. 4.15 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 5 minutos.

En la Figura 4.15 la temperatura en la partícula rebasa el límite de temperatura permitido (80°C) para secar un grano; lo cual deja en claro que la elección del tiempo integral de $\tau_i=5$ minutos no es un buen parámetro para la sintonía del controlador PI tomando en cuenta las propiedades físicas de los granos (trigo). El problema de estas respuestas del proceso no es la elección de la ganancia proporcional ya que a cualquier ganancia mayor de cero las respuestas del sistema se intensifican, por lo que una opción para la solución del problema sería el aumento del valor del tiempo integral para relajar de esta manera las respuestas del sistema.

Posteriormente se presentaran algunas simulaciones para diferentes tiempos de integración y ganancias proporcionales para analizar las diferencias en el comportamiento de las respuestas y posteriormente se resumirán en una tabla los datos más significativos en la sintonización del controlador PI. Otro aspecto

que resalta de las respuestas del proceso es que entre más se aumenta la ganancia proporcional la humedad promedio en la partícula disminuye considerablemente con el control de tipo PI y en consecuencia la humedad del aire a la salida aumenta rápidamente; esto da a entender que la ganancia proporcional también juega un papel importante en la intensidad o relajación de las respuestas del sistema. La pequeña oscilación que se manifiesta en la respuesta de la humedad del aire a la salida en el periodo inicial de secado es producto de la acción del controlador PI presentándose el mismo comportamiento oscilatorio que en caso anterior del controlador P, aquí el valor de K_p si juega un papel importante ya que a valores menores de $K_p = 40$, la oscilación desaparece aunque no se obtiene un buen resultado en la respuesta de temperatura en la partícula pues todos los resultados son por arriba de 80°C . En la Figura 4.16, se presentan las perturbaciones en la variable manipulable de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia.

Se observa en la Figura 4.16 que el tiempo en que la humedad de referencia alcanza la humedad residual o especificada de 0.03565 g/g es aproximadamente 25 minutos, este comportamiento será constante en todas las simulaciones para la sintonización del controlador PI ya que el tiempo de referencia es constante ($t_r=5 \text{ min.}$).

En la Figura 4.17, se presenta la desviación existente entre la humedad de referencia y el contenido de humedad promedio en la partícula; se puede observar el tiempo en que se alcanza la humedad específica ó residual y el offset que existe entre ambas respuestas para cada ganancia proporcional del controlador proporcional. A medida que la ganancia proporcional (K_p) aumenta, el tiempo en que se alcanza la humedad específica de 0.03565 g/g también disminuye. Se observa de la Figura 4.17 que también a medida que la ganancia proporcional aumenta el offset de la respuesta del contenido de humedad promedio en la partícula disminuye.

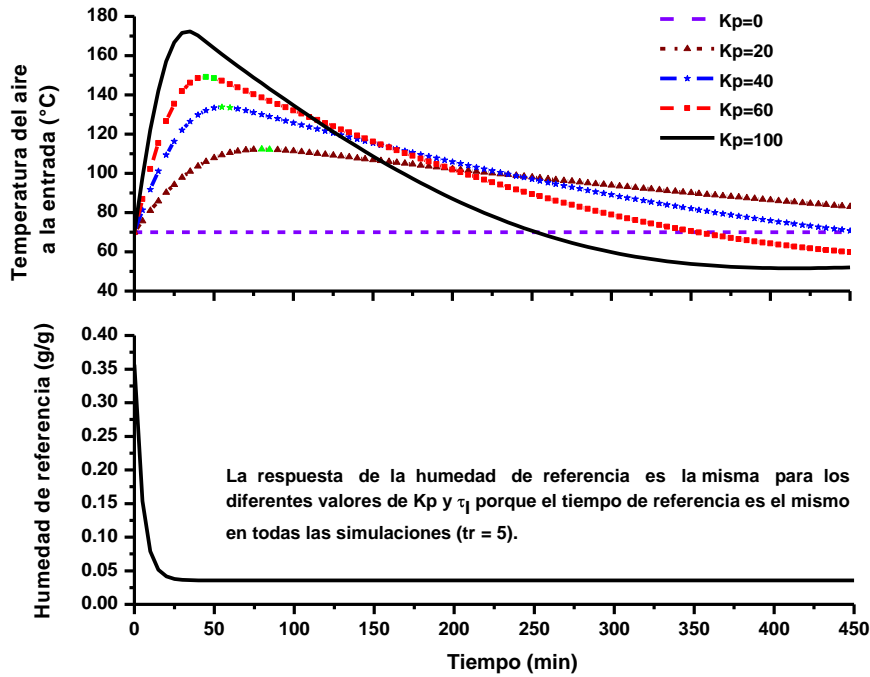


Fig. 4.16 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 5 minutos.

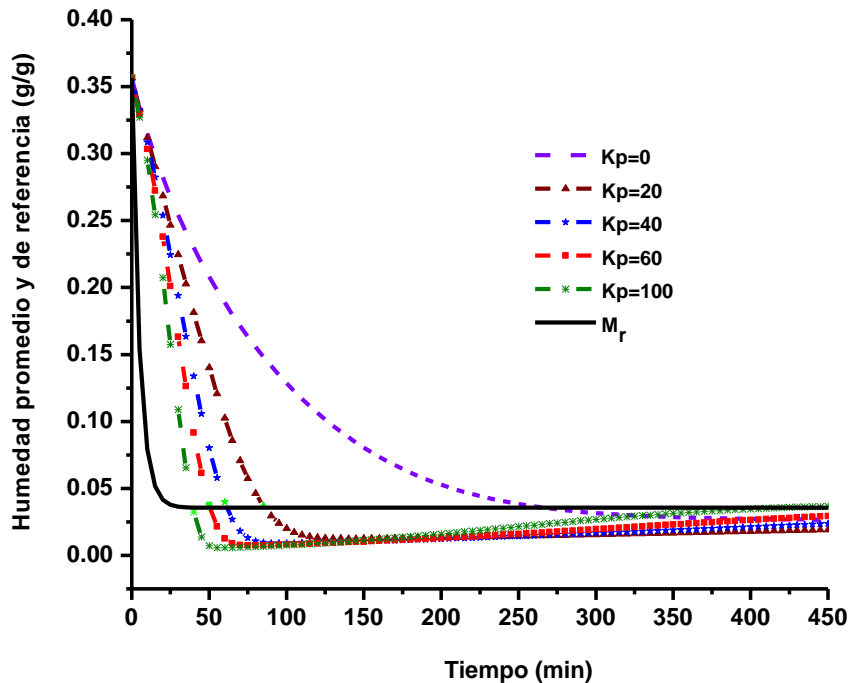


Fig. 4.17 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales.

4.6.3 Respuesta del Proceso a Lazo Cerrado para Diferentes Ganancias Proporcionales y un Tiempo Integral de 50 Minutos.

En la Figura 4.18 se presentan las simulaciones a lazo cerrado de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos; el tiempo de referencia es de 5 minutos por las suposiciones anteriormente descritas.

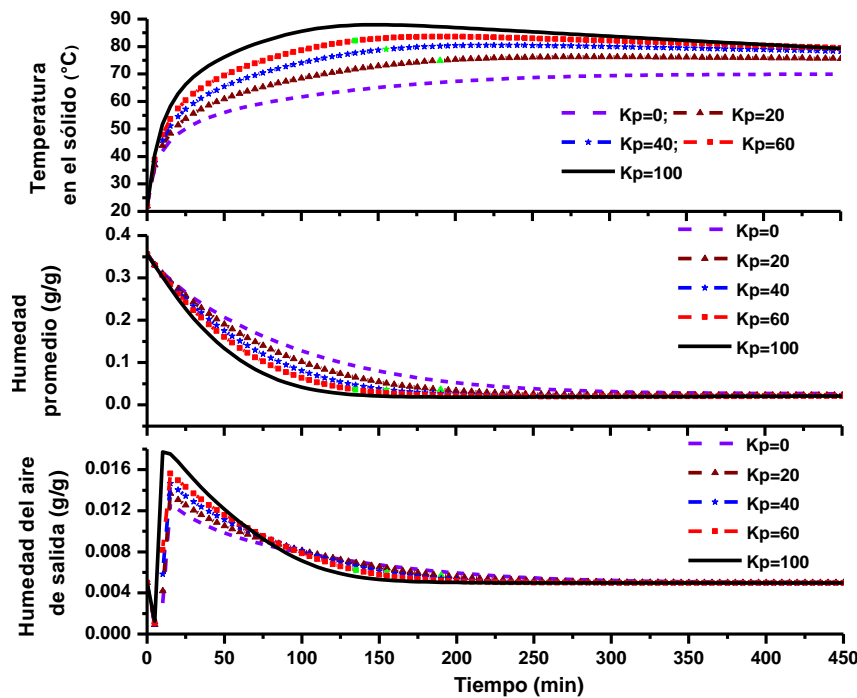


Fig. 4.18 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos.

En la Figura 4.18 se observa que el efecto del tiempo integral de 50 minutos ha relajado las respuestas proporcionando valores por debajo del límite de temperatura permitido (80°C) para secar un grano; no obstante cuando se implementan ganancias proporcionales igual o mayores de $K_p=60$, el límite de temperatura permitido en el sólido es sobrepasado por lo que los valores de

ganancia proporcional que pueden ser utilizados para el secado de trigo duro considerando un tiempo integral de 50 minutos van de $0 \leq K_p < 60$. La elección de la K_p más adecuada para el secado del grano de trigo considerando un tiempo integral de 50 minutos y un tiempo de referencia de 5 minutos, estarían en función del rango de seguridad del límite de temperatura del sólido y también del ahorro en el gasto energético necesario para calentar el aire a la entrada o bien del tiempo en que se desea alcanzar la humedad especificada. Posteriormente se presentara una tabla con los valores de importancia obtenidos de esta simulación. También se puede observar que la elección de la ganancia proporcional juega un papel importante en sintonización del controlador PI en comparación con las simulaciones realizadas para un tiempo integral de 5 minutos. En la Figura 4.19, se presentan las perturbaciones en la variable manipulable de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia. Se puede apreciar en la respuesta de la temperatura del aire a la entrada que la exigencia energética al sistema es significativamente menor en comparación con la presentada en la Figura 4.16.

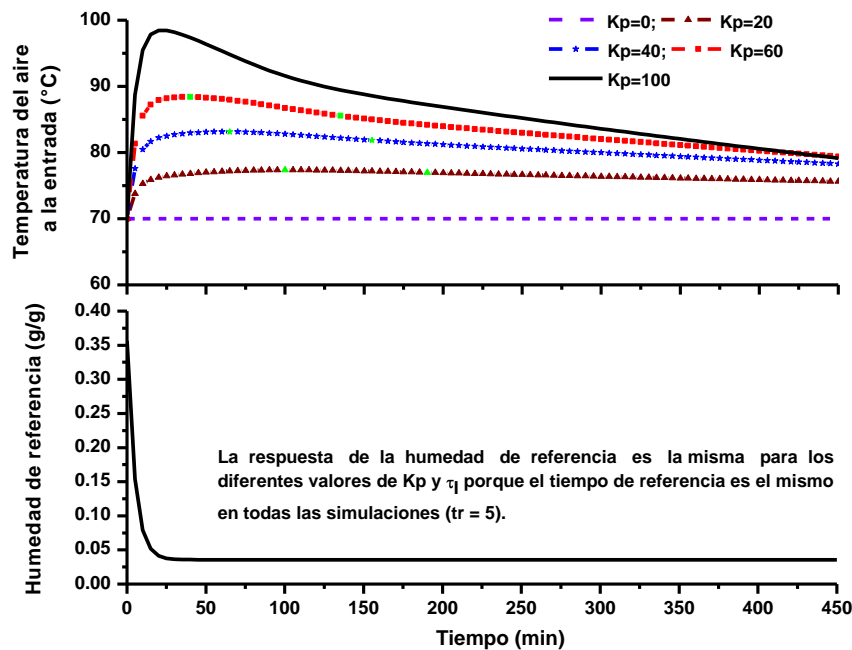


Fig. 4.19 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos.

En la Figura 4.20, se presenta la desviación que existe entre la humedad de referencia y el contenido de humedad promedio en la partícula.

A medida que la ganancia proporcional (K_p) aumenta, el tiempo en que se alcanza la humedad específica de 0.03565 g/g también disminuye. Un aspecto que observar es que el offset entre la respuesta del contenido de humedad promedio en la partícula con respecto a la humedad de referencia no desaparece, esto podría deberse a limitaciones intrínsecas en las suposiciones del modelo del proceso.

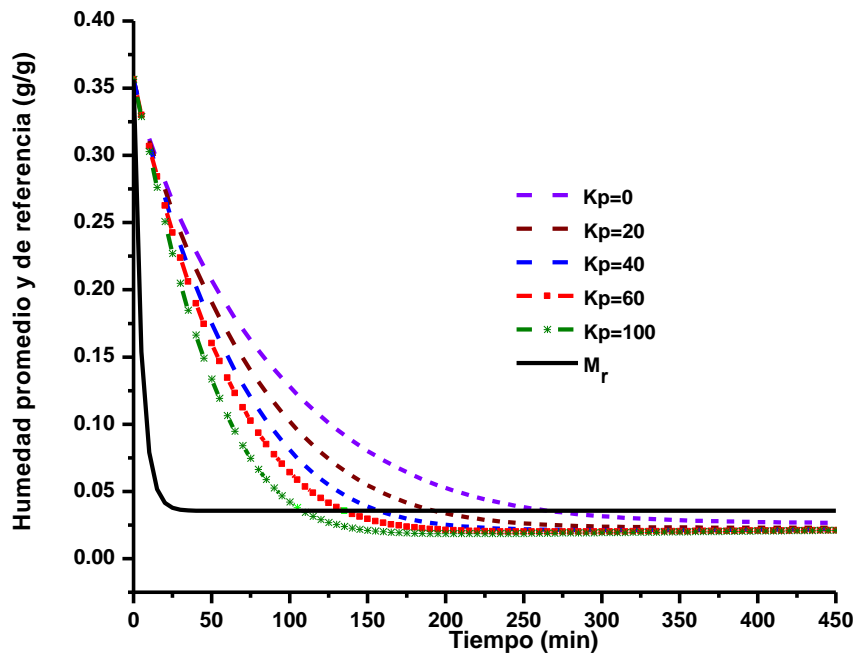


Fig. 4.20 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos.

En la Tabla 4.2, se presentan de manera resumida los tiempos en que se alcanza la humedad específica en la partícula de 0.03565 g/g, también se presentan valores de la temperatura máxima del aire a la entrada y la temperatura en la partícula para diferentes ganancias proporcionales y tiempos de integración en el sintonizado del controlador de tipo PI. De la Tabla 4.2 se puede observar que

para algunos valores de menor tiempo integral el comportamiento de las respuestas del proceso son muy rápidas haciendo poco problemático la obtención de una humedad promedio en la partícula final de 0.03565 g/g sin tener que afectar las propiedades del grano (trigo). Se puede observar también que la implementación de la acción integral produce mejores resultados en cuanto al tiempo en que se alcanza la humedad específica, ya que a lazo abierto el tiempo en que se alcanza la humedad específica es de 265 minutos y a lazo cerrado con un control de tipo P es de 205 minutos en comparación con la mejor respuesta a lazo cerrado del sistema con un control de tipo PI que fue de 155 minutos.

Los datos que se encuentran sombreados en la Tabla 4.2 representan los valores obtenidos de la sintonización del controlador PI en donde es permisible secar el grano sin afectar sus propiedades físicas y/o quemarlo.

Tabla 4.2 Valores de las constantes de un controlador Proporcional-Integral (PI), con un tiempo de referencia constante ($t_r=5\text{min.}$) en la obtención de un contenido de humedad promedio en la partícula final de 0.03565 g/g .

Ganancia proporcional $\left(\frac{^{\circ}\text{C} * \text{g}_{\text{S.sec0}}}{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}\right)$	$\tau_i = 5$			$\tau_i = 10$			$\tau_i = 20$			$\tau_i = 30$		
	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)
$K_p = 0$	265	69	70	265	69	70	265	69	70	265	69	70
$K_p = 10$	115	90	97	150	82	86	185	77	79	205	74	76
$K_p = 20$	85	100	112	115	90	96	150	82	85	170	78	81
$K_p = 30$	70	107	124	95	95	104	130	86	91	150	82	85
$K_p = 40$	60	111	134	85	100	111	115	89	95	130	84	89
$K_p = 50$	55	116	142	75	103	117	100	91	99	120	86	92
$K_p = 60$	50	119	149	70	106	122	95	94	103	110	88	95
$K_p = 100$	40	130	172	55	115	138	75	101	115	85	93	105

Ganancia proporcional $\left(\frac{^{\circ}\text{C} * \text{g}_{\text{S.sec0}}}{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}\right)$	$\tau_i = 40$			$\tau_i = 50$		
	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)
$K_p = 0$	265	69	70	265	69	70
$K_p = 10$	210	73	75	220	72	74
$K_p = 20$	180	76	79	190	75	77
$K_p = 30$	160	79	82	170	77	80
$K_p = 40$	145	81	85	155	79	83
$K_p = 50$	135	83	88	145	81	86
$K_p = 60$	125	85	91	135	82	88
$K_p = 100$	100	90	101	105	86	98

En este capítulo se pueden destacar las siguientes observaciones:

Se identificaron las variables del proceso más importantes (manipulables, potenciales y controlables); del análisis de sensibilidad a lazo abierto con perturbaciones de tipo escalón y rampa sobre las variables manipulables se observó que el flujo de aire a la entrada no representa una influencia considerable en el proceso; sin embargo se encontró que el proceso es más sensible a la temperatura de alimentación del aire. Por lo que se optó por un esquema de tipo servo control retroalimentado en función de la temperatura de alimentación del aire manteniendo constante la humedad y el flujo de alimentación del aire.

También se observó que el contenido de humedad de aire a la entrada es una variable de perturbación potencial muy importante a considerar cuando en el proceso no se tiene un control adecuado para mantener constante su concentración.

Las simulaciones a lazo cerrado en este capítulo se realizaron para observar la estabilidad del proceso con la implementación de los controladores P y PI especificando la humedad promedio final del sólido en 0.03565 g/g (es decir el 3.6% de humedad final en la partícula). La implementación del controlador P y PI llevó a la disminución del tiempo requerido para obtener un sólido con una humedad promedio específica ya que de 265 minutos que tardaba el proceso en alcanzar la humedad deseada a lazo abierto, con la implementación del control proporcional solo se necesitó de 205 minutos de acuerdo a la mejor respuesta obtenida para este controlador; y con la implementación del controlador PI la humedad específica final se obtuvo en tan solo 155 minutos, por lo que con la implementación del PI podría obtenerse el doble de producción en comparación con los tiempos requeridos del proceso a lazo abierto sin que el sólido sufra daño térmico.

Capítulo 5

Análisis de las Simulaciones a Lazo Cerrado del Secado de Trigo en un SLFL para Obtener un 10% de Humedad Final en la Partícula.

5.1 Especificaciones Comerciales en el Secado de Granos.

En el capítulo anterior, se analizaron las respuestas a lazo abierto y cerrado en el secado de trigo, pero en la búsqueda de una condición final de humedad en la partícula casi cercana a la humedad de equilibrio (0.03565 g/g de humedad final en la partícula); En el mercado de granos alcanzar la condición final de humedad de 0.03565 g/g no es rentable ya que debido a las condiciones extremas que se le hace pasar al grano este sufre grandes alteraciones en sus propiedades físicas debido a tiempos largos de exposición al calor, otro inconveniente de obtener un producto con una calidad de humedad cercana a la humedad de equilibrio es que se necesitaría de un contenedor o silo con especificaciones muy estrictas en cuanto a humedad del ambiente y aireación, ya que como la humedad en el ambiente llega a variar entre 30% y 70% en algunos lugares del país, este producto al bajarlo del secador podría humectarse nuevamente debido a la gran diferencia de humedad entre el grano seco y la humedad relativa del ambiente, por no existir las condiciones adecuadas de almacenamiento.

Dentro de las especificaciones comerciales y según Mujumdar (1987) (Pérez, 2000) señala que si el trigo contiene una humedad mayor al 19%, sólo se puede almacenar por algunos días, si tiene entre 16 y 18% de humedad, se puede almacenar por algunas semanas, con un 15% de humedad se puede guardar por un año y con 13 a 14% de humedad puede durar mucho más tiempo, considerando desde luego un almacenamiento en condiciones adecuadas.

5.2 Sistema a Lazo Cerrado con Control Proporcional (P) en la Obtención de un Producto con 10% de Humedad Final.

La estrategia para la implementación del control proporcional es la misma que se siguió en el Capítulo 4, Sección 4.4.1. La diferencia en esta sección estriba en el análisis de las respuestas a lazo cerrado en la obtención de un producto con 10% de humedad final a diferencia del capítulo anterior en donde la humedad final que se deseaba obtener era del 3.5% de humedad final muy cercana a la humedad de equilibrio.

5.2.1 Respuesta del Proceso a Lazo Cerrado para Diferentes Ganancias Proporcionales y un Tiempo de Referencia de 5 Minutos en la Obtención de un Producto con 10% de Humedad Final.

En la Figura 5.1 se presentan las simulaciones a lazo cerrado de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos; Se realizaron simulaciones para diferentes tiempos de referencias ($t_r = 5$; $t_r = 10$ y $t_r = 20$) para el análisis de las respuestas del controlador proporcional en la obtención de un producto con el 10% de humedad final, la cual es lo suficientemente necesaria para almacenarse por largos periodos de tiempo; pero solo se presenta esta simulación ya que es representativa de las simulaciones realizadas a tiempos de referencia diferentes. Más adelante se presentaran las principales características entre una simulación y otra. Se puede apreciar de la Figura 5.1 que a medida que la ganancia proporcional (K_P) aumenta, el tiempo en que se alcanza la humedad residual o especificada de 0.1 g/g también va disminuyendo.

También al comparar esta respuesta con la presentada en la Figura 4.7 se puede observar que en la respuesta de la Figura 5.1 el tiempo en que se alcanza

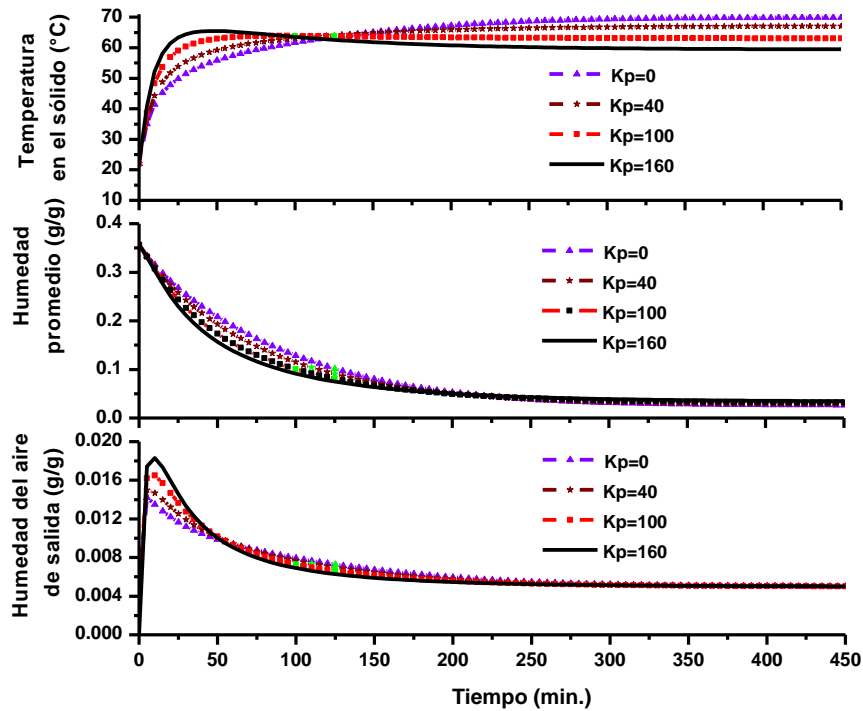


Fig. 5.1 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos para la obtención de un producto con el 10% de humedad final.

la humedad residual es mucho menor, de 265 minutos ha solamente 125 minutos (una diferencia de 140 minutos) para una $K_p = 0$. Esto debido a que la exigencia en la humedad final del producto no es tan pequeña.

También se observa en la respuesta de la humedad del aire a la salida del lecho que no presenta la oscilación observada en la Figura 4.7 esto debido a que la exigencia al sistema de control no es muy demandante mostrando así un sistema más estable y apegado a la realidad ya que en las simulaciones presentadas en la Figura 4.7 hay un punto en la respuesta que está por debajo de la curva de equilibrio lo cual dicho en otras palabras se viola una condición de secado muy importante, ya que lo máximo que se puede secar en una partícula es equivalente al contenido de humedad en el equilibrio; claro que esto es para

algunos valores de ganancias proporcionales muy grandes y en el caso del controlador PI a tiempos de integración muy cortos.

En la Figura 5.2, se presentan las perturbaciones en la variable manipulable de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia.

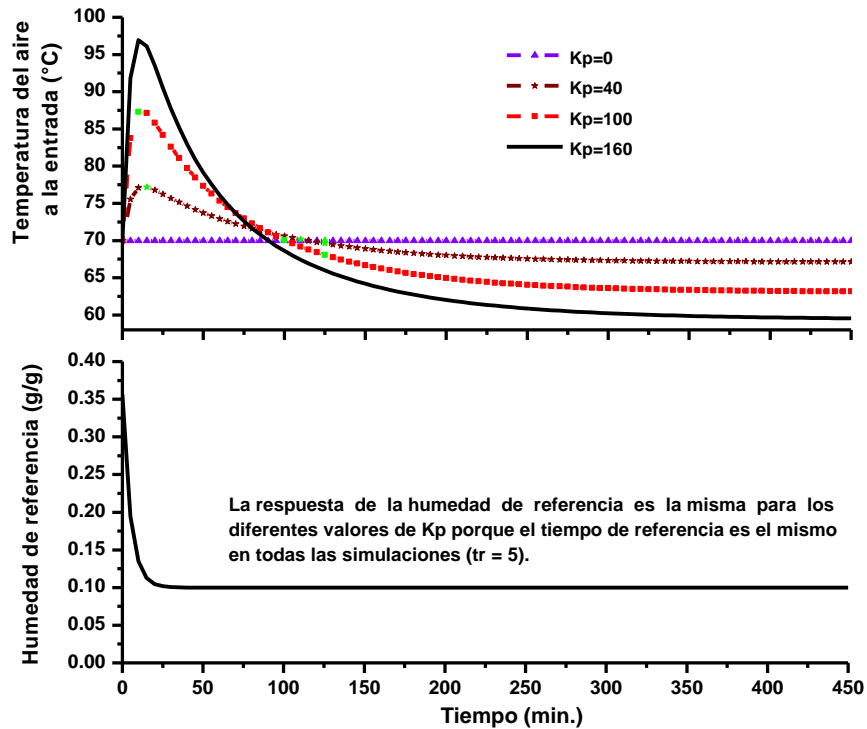


Fig. 5.2 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo de referencia de 5 minutos para la obtención de un producto con el 10% de humedad final.

En la Figura 5.3, se presenta la discrepancia que existe entre la humedad de referencia y el contenido de humedad promedio en la partícula; en la cual se puede observar el tiempo en que se alcanza la humedad específica ó residual y el offset que existe entre ambas respuestas para cada ganancia proporcional del controlador proporcional.

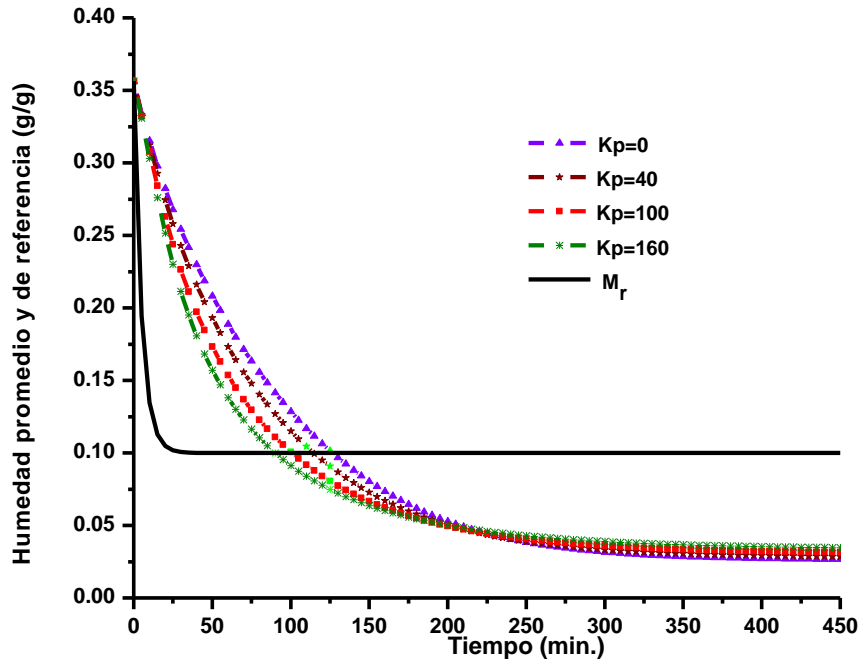


Fig. 5.3 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales para la obtención de un producto con el 10% de humedad final.

En la Tabla 5.1, se presentan de manera resumida los tiempos en que se alcanza la humedad específica en la partícula de 0.1 g/g (10% de humedad final en la partícula), también se presentan valores de la temperatura máxima del aire a la entrada y la temperatura en la partícula para diferentes ganancias proporcionales y tiempos de referencia.

De la Tabla 5.1 se deduce al igual que en la Tabla 4.1 que a mayores tiempos de referencia el consumo energético será menor pero también el tiempo en alcanzarse la humedad específica será más lento y por ende el calor cedido a los granos durante periodos de tiempos prolongados afectara en la calidad final del producto.

Los valores de sintonía más adecuados para el controlador proporcional tomando en cuenta la mejor seguridad y calidad final del grano se encuentran sombreados. Se observa que entre mayor es la ganancia proporcional los resultados en cuanto a reducción del tiempo de operación se refiere son mejores.

Los datos sombreados en la Tabla 5.1 representan los mejores valores obtenidos de la sintonización del controlador Proporcional.

Tabla 5.1 Valores de las constantes de un controlador Proporcional (P), con diferentes tiempos de referencia en la obtención de un contenido de humedad promedio en la partícula final de 0.1 g/g.

Ganancia proporcional $\left(\frac{^{\circ}\text{C} * \text{g}_{\text{S.seco}}}{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}\right)$	Tiempo de referencia de 5 min.			Tiempo de referencia de 10 min.			Tiempo de referencia de 20 min.		
	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido (°C)	Temp. Máxima del aire (°C)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido (°C)	Temp. Máxima del aire (°C)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido (°C)	Temp. Máxima del aire (°C)
Kp = 0	125	64	70	125	64	70	125	64	70
Kp = 10	120	63	72	120	63	71	120	63	71
Kp = 20	120	64	74	120	64	73	120	64	72
Kp = 30	115	64	75	115	64	74	120	64	73
Kp = 40	110	64	77	115	64	76	115	64	74
Kp = 50	110	64	79	110	64	77	115	64	75
Kp = 60	105	64	81	110	64	78	110	64	75
Kp = 100	100	64	87	100	64	83	105	64	79
Kp = 160	90	64	97	90	64	90	100	64	83

5.3 Sistema a Lazo Cerrado con Control Proporcional-Integral (PI) en la Obtención de un Producto con 10% de Humedad Final.

La estrategia para la implementación del control proporcional es la misma que se siguió en el Capítulo 4, Sección 4.5.1.

5.3.1 Respuesta del Proceso a Lazo Cerrado para Diferentes Ganancias Proporcionales y un Tiempo Integral de 50 Minutos en la Obtención de un Producto con 10% de Humedad Final.

En la Figura 5.4 se presentan las simulaciones a lazo cerrado de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y la humedad del aire a la salida para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos en la obtención de una humedad final en la partícula del 10%; cabe mencionar que el tiempo de referencia en todas las simulaciones se tomó con un valor constante de 5 minutos, con este tiempo de referencia se obtuvieron los mejores resultados en la sintonización del controlador de tipo proporcional. De igual manera que en la sección anterior, las simulaciones realizadas para diferentes tiempos de integración ($\tau_i = 5$; $\tau_i = 10$; $\tau_i = 20$; $\tau_i = 30$; $\tau_i = 40$ y $\tau_i = 50$) no pueden ser presentadas debido a la repetitividad de sus características, por lo que solo se presentara esta simulación que es representativa de las otras simulaciones; posteriormente se presentaran las principales características entre una simulación y otra. Se puede observar de la Figura 5.4 que la respuesta de la temperatura en la partícula para diferentes ganancias proporcionales no rebasa el límite de temperatura permitido (80°C) para el cuidado del grano; lo cual deja en claro que la elección del tiempo integral de $\tau_i = 50$ minutos es un buen parámetro para la sintonía del controlador PI tomando en cuenta las propiedades físicas de los granos (trigo duro) y la estabilidad que produce.

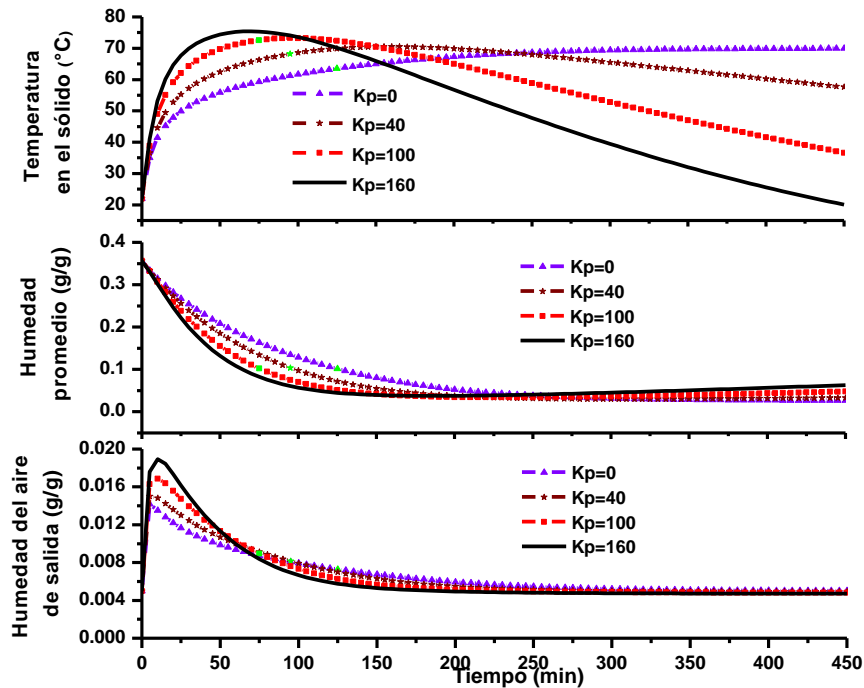


Fig. 5.4 Dinámica de la temperatura y el contenido de humedad promedio en la partícula, y humedad del aire a la salida a lazo cerrado con diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos en la obtención del 10% de humedad final en la partícula.

En contraste cuando el tiempo integral va disminuyendo el sistema se vuelve más inestable al grado que se vuelve inoperable debido a las condiciones de operación (temperaturas del aire a la entrada por debajo de 0°C y similares).

También se puede observar que el problema en estas respuestas del proceso no es la elección de la ganancia proporcional ya que a cualquier ganancia mayor de cero las respuestas del sistema son más rápidas pero también más inestables como antes se menciono, por lo que una opción para la solución del problema seria el aumento del valor del tiempo integral para relajar de esta manera las respuestas del sistema. Otro aspecto importante que resaltar es que no se observan oscilaciones en las respuestas de la humedad del aire a la salida, esto debido a que la exigencia del sistema al controlador no es alta como en el

capítulo anterior que se deseaba saber como reaccionaba el sistema de control ante la obtención de una humedad final en la partícula (0.03565 g/g) muy cercana a la humedad de equilibrio.

En la Figura 5.5, se presentan las respuestas de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia a diferentes ganancias proporcional y un tiempo integral de 50 minutos.

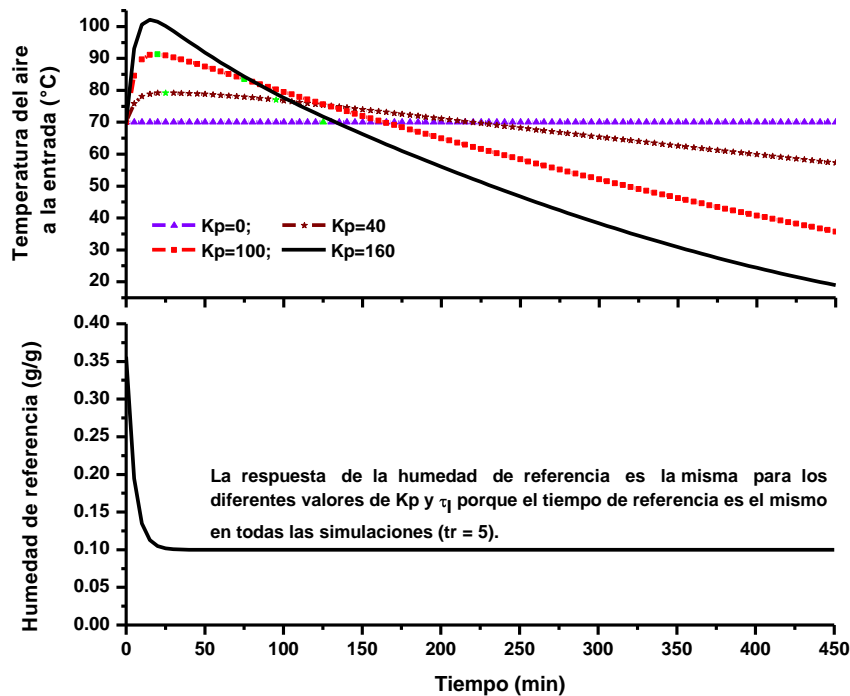


Fig. 5.5 Dinámica de la temperatura del aire a la entrada y la humedad de referencia para diferentes ganancias proporcionales y un tiempo integral de 50 minutos en la obtención del 10% de humedad final en la partícula.

De la Figura 5.5, se puede observar que a pesar de que la temperatura en el sólido no sobrepasa los 80°C en el aire la temperatura es bastante elevada aproximadamente 102°C para una $K_p = 160$ y también se puede observar que la respuesta de la temperatura del aire para esta misma ganancia proporcional le pide al sistema que enfríe el aire a menos de 20°C lo cual sería una operación bastante difícil en cuanto a servicios de operación, más sin embargo el tiempo en que se alcanza el 10% de la humedad final en la partícula ocurre a los 60 minutos,

por lo que el proceso bien podría apagarse en ese momento mediante un sistema de apagado automático y de esta manera hacer más funcional el control del proceso.

En la Figura 5.6, se presenta la desviación que existe entre la humedad de referencia y el contenido de humedad promedio en la partícula; en la cual se puede observar el tiempo en que se alcanza la humedad específica ó residual y el offset que existe entre ambas respuestas para cada ganancia proporcional del controlador proporcional.

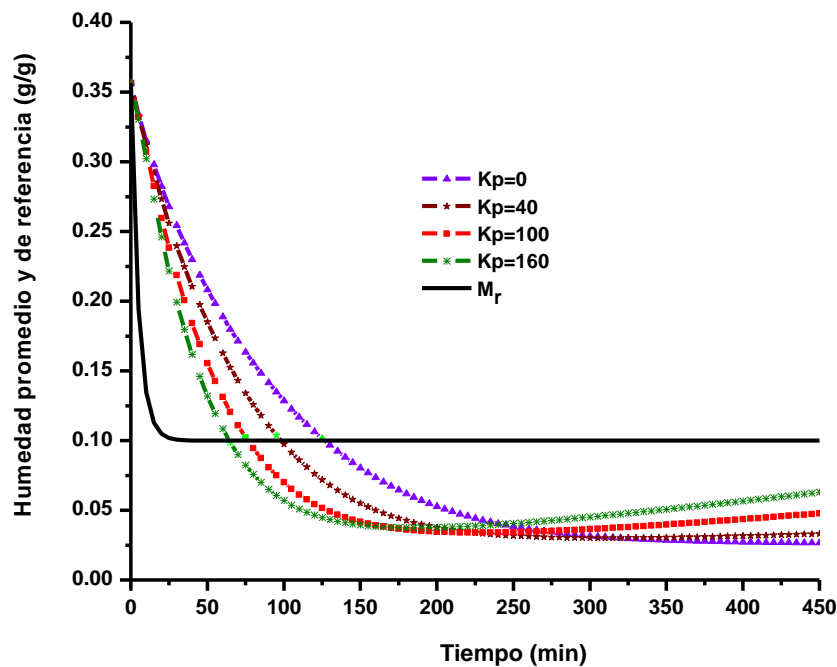


Fig. 5.6 Comparación dinámica entre la humedad de referencia y la humedad promedio en la partícula a diferentes ganancias proporcionales en la obtención del 10% de humedad final en la partícula.

Un aspecto que observar es que el offset entre la respuesta del contenido de humedad promedio en la partícula con respecto a la humedad de referencia no desaparece, esto debido a que el tiempo de integración es grande dándole un mayor amortiguamiento al sistema y evitando así la inestabilidad ya que a

menores tiempo de integración este offset desaparece pero el sistema se vuelve inestable e inoperable por las características de secado.

En la Tabla 5.2, se presentan de manera resumida los tiempos en que se alcanza la humedad final en la partícula de 0.1 g/g, también se presentan valores de la temperatura máxima del aire a la entrada y la temperatura en la partícula para diferentes ganancias proporcionales y tiempos de integración en el sintonizado del controlador de tipo PI.

Los datos que se encuentran sombreados en la Tabla 5.2 representan los valores obtenidos de la sintonización del controlador PI en donde es factible secar el grano sin afectar sus propiedades físicas y/o quemarlo.

Tabla 5.2 Valores de las constantes de un controlador Proporcional-Integral (PI), con un tiempo de referencia constante ($t_r=5$ min.) en la obtención de un contenido de humedad promedio en la partícula final de 0.1 g/g.

Ganancia proporcional $\left(\frac{^{\circ}\text{C} * \text{g}_{\text{S.seco}}}{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}\right)$	$\tau_i = 5$			$\tau_i = 10$			$\tau_i = 20$			$\tau_i = 30$		
	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)
Kp = 0	125	64	70	125	64	70	125	64	70	125	64	70
Kp = 10	85	74	87	100	70	79	110	67	75	110	66	74
Kp = 20	70	81	98	85	74	86	95	69	79	105	68	77
Kp = 30	60	85	107	75	77	92	90	72	83	95	69	79
Kp = 40	55	89	114	70	81	97	85	74	86	90	71	82
Kp = 50	50	92	121	65	83	102	80	76	89	85	72	85
Kp = 60	45	93	127	60	85	106	75	77	92	80	73	87
Kp = 100	40	103	146	50	91	116	60	81	102	70	77	95
Kp = 160	30	106	167	40	96	134	50	85	114	50	80	107

Ganancia proporcional $\left(\frac{^{\circ}\text{C} * \text{g}_{\text{S.seco}}}{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}\right)$	$\tau_i = 40$			$\tau_i = 50$		
	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo de alcance (min)	Temp. del sólido ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$)
Kp = 0	125	64	70	125	64	70
Kp = 10	110	65	73	115	65	72
Kp = 20	105	67	75	110	66	75
Kp = 30	100	68	78	100	67	77
Kp = 40	95	69	80	95	68	79
Kp = 50	90	70	82	90	69	81
Kp = 60	85	71	84	90	70	83
Kp = 100	75	75	93	75	73	91
Kp = 160	65	77	104	65	75	102

Capítulo 6

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los resultados presentados en el capítulo 4 y 5, así como los futuros trabajos que podrían derivarse de este trabajo de investigación.

De las perturbaciones tipo escalón y rampa a lazo abierto realizados sobre la temperatura del aire a la entrada se observó que esta variable manipulable es de gran influencia en el proceso de secado de trigo duro, al aplicarle las perturbaciones antes descritas se observó que a mayor temperatura de alimentación del aire, la rapidez de secado aumenta considerablemente; no así para el flujo de aire a la entrada que no representó una influencia considerable en el proceso de secado de trigo duro; por lo que siendo la temperatura de alimentación del aire la principal variable en el proceso de secado se decidió mantener el flujo de alimentación del aire constante y diseñar el control de tipo P y PI en función únicamente de la temperatura de alimentación del aire.

La implementación del control proporcional y proporcional - integral llevó a la disminución del tiempo requerido para obtener un sólido con una humedad promedio final de 0.1 g/g (es decir el 10% de humedad final en la partícula) ya que de 125 minutos que tardaba el proceso en alcanzar la humedad deseada a lazo abierto, con la implementación del control proporcional solo se necesitó de 90 minutos de acuerdo a la mejor respuesta obtenida para este controlador; y con la implementación del controlador PI la humedad específica final se obtuvo en tan solo 65 minutos, por lo que con la implementación del PI podría obtenerse el doble de producción en comparación con los tiempos requeridos del proceso a lazo abierto.

El contenido de humedad de aire a la entrada es una variable de perturbación potencial muy importante a considerar cuando en el proceso no se tiene un control adecuado para mantener constante su concentración.

La obtención de los parámetros de sintonía K_p y τ_i para los controladores proporcional y proporcional – integral se obtuvieron de manera empírica basado en las respuestas del proceso obtenidas por simulación; un trabajo que podría realizarse a futuro, sería el sintonizado de estos controladores utilizando métodos más robustos combinados con técnicas de optimización tales como: Criterio de operación del tiempo integral (Integral del valor absoluto del error (IAE), integral del error al cuadrado (ISE), integral del valor absoluto del error por el tiempo (ITAE)).

Apéndice A

A.1 Difusividad Efectiva del Trigo

La relación entre la difusividad efectiva, la temperatura y la concentración, están dada por una ecuación tipo Arrhenius para diferentes sustancias sólidas como cereales, en este caso, la difusividad efectiva para el grano de trigo esta dado por (Becker y Sallans, 1961) (Zahed y Epstein, 1992).

$$D_{ef} = 4600 \exp\left(-\frac{6140}{T}\right) \quad (A.1)$$

A.2 Constantes de Isotermas de Desorción para la Ecuación de Henderson

Tabla. A.1 Constantes empíricas obtenidas vía la isoterma de desorción termodinámica para la ecuación de Henderson.

Grano de cereal	K (1/K)	N (---)	C (K)
Trigo	$2.3008 \cdot 10^{-5}$	2.2857	55.82

A.3 Propiedades Físicas del Grano de Trigo Utilizado en la Simulación

Tabla. A.2 Propiedades físicas del grano de trigo utilizado en la simulación.

Investigación:	Mathur and Gishler (1953,1955b)	Dimensión
Grano:	Trigo	
R_s	0.200 ^{**}	cm
A_s	0.5524 [#]	cm ²
V_s	0.0335 ^{##}	cm ³
C_{p_A}	1.013	J/g·K
C_{p_S}	1.255 ⁺	J/g·K
C_{p_V}	1.885	J/g·K
C_{p_W}	4.184	J/g·K

**Radio de la esfera equivalente al volumen = $3V_s / 4\pi^{1/3}$.

#Superficie de la esfera equivalente al volumen / esfericidad = $4\pi R_s^2 / \psi$, donde ψ para el trigo es $\psi = 0.91$ (Becker and Sallans, 1961).

##Volumen de 0.3175 cm * 0.635 cm (Mathur and Gishler, 1955^a) para un esferoide.

+De Becker and Sallans (1961).

A.4 Cálculo de la Velocidad Mínima de Fluidización

Las características del SLFL utilizadas en la simulación y los datos del aire (reportados a una temperatura de 77 °C) y del sólido con los que se calculara la U_{mf} son las presentadas en la Tabla A.3:

Tabla. A.3 Características del SLFL utilizado en la simulación y los datos del aire, y sólidos para el cálculo de la U_{mf} .

Datos	Valor	Dimensión
L_{Lecho} (Zahed, et al. 1992)	122	cm
$A_{Trans.}$	730.617	cm ²
Temperatura del aire (T)	77	°C
ρ_{aire}	$9.95 \cdot 10^{-4}$	Kg/m ³
μ_{aire}	$2.082 \cdot 10^{-5}$	N·s/m ²
$\rho_{s.aparente}$	1323	Kg/m ³
d_s	0.004	m
g_c	9.81	m/s ²

La velocidad mínima de fluidización se obtuvo mediante la siguiente expresión (Zahed, et al. 1995):

$$U_{mf} = \left(\frac{\mu_{aire}}{\rho_{aire} \cdot d_s} \right) \cdot \left[27.2^2 + 0.0408 \cdot N_{Arquimides}^{0.5} - 27.2 \right] \quad (A.2)$$

Donde:

$$N_{\text{Arquimides}} = \rho_{\text{aire}} \cdot \rho_{\text{S.aparente}} - \rho_{\text{aire}} \cdot g_c \cdot \left(\frac{d_s}{\mu_{\text{aire}}} \right) \quad (\text{A.3})$$

Por lo tanto dando solución a la Ec. A.2 y A.3 con los datos referidos anteriormente para el cálculo de U_{mf} , es:

$$U_{mf} = 1.323 \text{ m/s}$$

Si se requiere obtener la velocidad mínima de fluidización en términos de gasto másico, es necesario afectarla por el área transversal del plato distribuidor a la entrada del SLFL y por la densidad del aire a la temperatura que se alimenta. Así, la velocidad mínima de fluidización en términos de gasto masico es:

$$U_{mfm} = 5770.64 \text{ g/min}$$

Esta velocidad mínima de fluidización másico, representa la cuarta parte del flujo nominal con la que se realizaron las simulaciones a lazo abierto y cerrado, es decir que el flujo nominal utilizado en las simulaciones es el equivalente a $1.9U_{mfm}$ veces.

Apéndice B

B.1 Distribución de la Humedad en la Partícula.

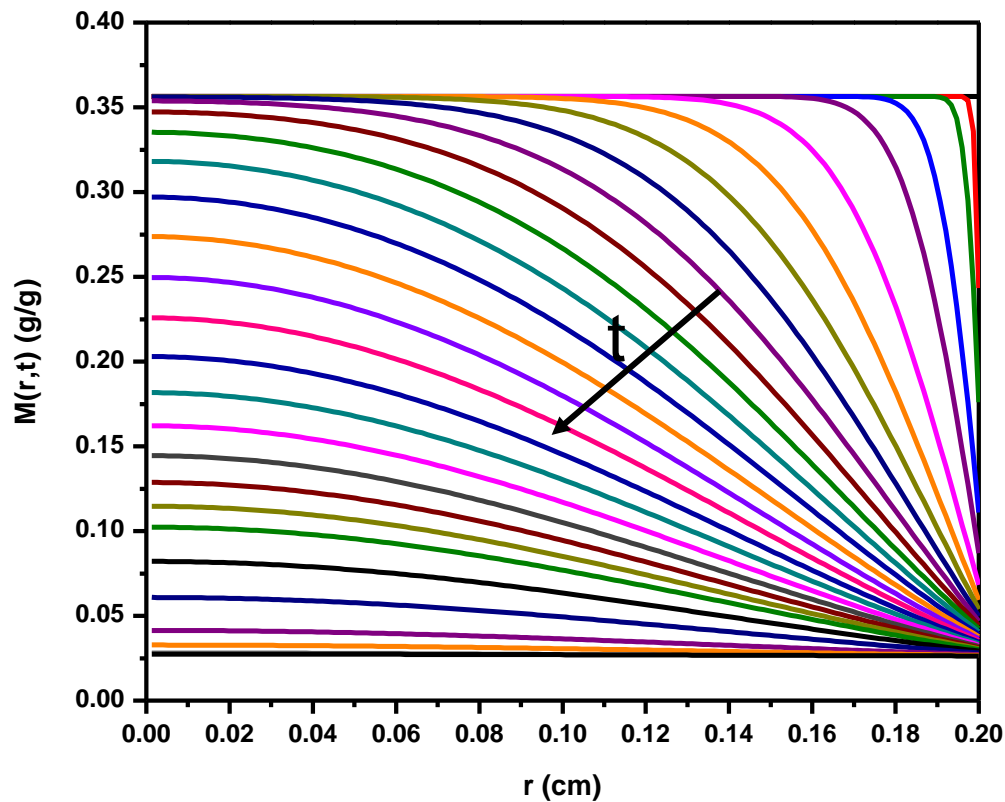


Fig. B.1 Perfil de concentración en la partícula.

En la Figura B.1, se presentan los perfiles de concentración de humedad dentro de la partícula con respecto al tiempo; los valores presentados se corresponde a un periodo de tiempo de $t = 0$, $t = 0.1$, $t = 1$, $t = 5$ y $t = 10$ minutos, los resultados posteriores se imprimen con intervalos de 10 minutos hasta llegar a 450 minutos que fue el período de simulación del proceso y donde la humedad de equilibrio es constante.

Apéndice C

Nomenclatura

- A_S = Área superficial del grano, cm^2
 $A_{\text{Trans.}}$ = Área transversal del lecho, cm^2
 C = Constante en Ec. 3.14, K
 C_{p_A} = Capacidad calorífica a presión constante del aire seco, $\text{J/g}\cdot\text{K}$
 C_{p_S} = Capacidad calorífica a presión constante del grano seco, $\text{J/g}\cdot\text{K}$
 C_{p_V} = Capacidad calorífica a presión constante del vapor de agua, $\text{J/g}\cdot\text{K}$
 C_{p_W} = Capacidad calorífica a presión constante del agua líquida, $\text{J/g}\cdot\text{K}$
 D_{ef} = Difusividad de humedad efectiva en el grano, cm^2/min
 d_s = Diámetro del sólido, m
 f = Saturación relativa = humedad relativa fraccional = P_V / P_V^*
 g_c = Aceleración de la gravedad, m/s^2
 K = Constante en Ec. 3.14, $1/\text{K}$
 K_C = Coeficiente de transferencia de masa entre la fase burbuja y emulsión*, cm/s
 K_P = Ganancia proporcional, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{g}_{\text{Sol. seco}} / \text{g}_{\text{H}_2\text{O}}$
 L_{Lecho} = Longitud del lecho, cm
 M = Contenido de humedad local en el grano, base seca, g/g
 \bar{M} = Contenido de humedad promedio en el grano ó partícula, base seca, g/g
 \bar{M}_r = Humedad de referencia, base seca, g/g
 M_0 = Contenido de humedad inicial de los granos, base seca, g/g
 M_e = Contenido de humedad en equilibrio del grano, base seca, g/g
 M_{res} = Humedad residual ó humedad específica, base seca, g/g
 m_S = Masa de sólidos en el lecho, g
 N = Constante en Ec. 3.14, --
 n_s = Numero de partículas en el lecho.
 P = Presión total, Pa
 P_V = Presión de vapor del agua pura, Pa
 \dot{Q}_a = Flujo masico de aire seco a la entrada del SLFL (también es el flujo correspondiente a la fase burbuja en el modelo de dos fases), g/min
 \dot{Q}_e = Flujo masico de aire y sólidos perfectamente mezclados en la fase emulsión*, g/min
 R = Constante universal de los gases = $8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$

R_V	= $R / M_V = 0.462 \text{ J/g} \cdot \text{K}$
R_S	= Radio equivalente de la esfera, cm
r	= Distancia radial local desde el centro de la esfera, cm
T	= Temperatura del aire a la salida ó de los granos a la salida del lecho, K
T_0	= Temperatura inicial de los granos en el lecho, K
\bar{T}_1	= Temperatura nominal, K
T_1	= Temperatura del aire a la entrada del lecho, K
T^*	= Temperatura de referencia, K
t	= Tiempo, min
t_r	= Tiempo de referencia, min
V_S	= Volumen de sólidos, cm^3
Y	= Humedad del aire a la salida del lecho, g vapor de agua/g aire seco
Y_1	= Humedad del aire a la entrada del lecho, g vapor de agua/g aire seco
Y_b	= Humedad absoluta a la salida de la fase burbuja*, g/g
Y_e	= Humedad absoluta a la salida de la fase emulsión*, g/g

Letras Griegas

$\epsilon(t)$	= Error del sistema.
ΔH	= Calor de desorción – vaporización isoterico a temperatura T , J/g
μ_{aire}	= Viscosidad del aire a 70°C , $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
ρ_{aire}	= Densidad del aire a 70°C , g/cm^3
ρ_S	= Densidad de la partícula, g/cm^3
$\rho_{S.\text{aparente}}$	= Densidad del sólido aparente, g/cm^3
τ_I	= Tiempo integral, min
ψ	= Esfericidad, --

Acrónimos

P	= Proporcional
PI	= Proporcional Integral
SLFL	= Secador de lecho fluidizado por lotes
SIMO	= Una entrada – múltiple salida
U_{mf}	= Velocidad mínima de fluidización
U_{mfm}	= Velocidad mínima de fluidización masico

* Solo aplica en el modelo heterogéneo.

Referencias Bibliograficas

- Abdel-Jabbar N; Jumah R. y Ali Al-Haj. "Dynamic Analysis of Continuous Well-Mixed Fluidized/Spouted Bed Dryers". *Drying Technology*, 2002a, 20 (1), pp. 37-54.
- Abdel-Jabbar N.M; Jumah R.Y. y Ali Al-Haj. "Multivariable Process Identification and Control of Continuous Fluidized Bed Dryers". *Drying Technology*, 2002b, 20 (7), pp. 1347-1377.
- Caballero, F.V.; "Secado de Amaranto: Simulación y Modelado en Lechos Fluidizados", Tesis de Maestría, UAM-Iztapalapa, Méx. 1999.
- Edgar, T.F. y Himmelblau, D.M; "Optimization of Chemical Processes". Mc. Graw – Hill, U.S.A. 1988.
- Henneberg M; Heinrich S; Ihlow M. y Mörl Lothar. "Fluidized Bed Air Drying: Experimental Study and Model Development". *Can. J. Chem. Eng.* 2003, Vol. 81, pp. 176-184.
- Incropera y DeWitt. "Fundamentals of heat and mass transfer". 4^a Edition, Wiley, New York, 1996.
- Jumah R.Y; Mujumdar A.S. y Raghvn G.S.V. "A Mathematical Model for Constant and Intermittent Batch Drying of Grains in a Novel Rotating Jet Spouted Bed". *Drying Technology* 1996, 14 (3&4), pp.765-802.
- Kunii, D. y Levenspiel O. "Fluidization Engineering". Wiley, New York, 1969.
- Ogata Katsuhiko; "Ingeniería de Control Moderno". Prentice may, Méx. 1998.
- Pérez A.C; "Estudio del Proceso de Secado de Trigo en un Sistema de Lecho Vibrofluidizado". Tesis de maestría, UAM-Iztapalapa, Méx. 2000.
- Prasad B.M. y Pydi S.Y. "Residence Time Distribution of Solids in a Fluidized Bed". *Can. J. Chem. Eng.* 2003, Vol. 81, pp. 118-123.
- Siettos C.I. y Kiranoudis C.T; Bafas G.V. "Advanced Control Strategies for Fluidized Bed Dryers". *Drying Technology* 1999, 17 (10), pp. 2271-2291.
- Smith, C.A. y Corripio, A.B; "Control Automático de Procesos Teoría y Practica". Limusa, Méx. 1995.

- Stephanopoulos, G; "Chemical Process Control. And Introduction to Theory and Practice". Prentice Hall, U.S.A. 1984.
- Treybal R.E.; "Operaciones de Transferencia de Masa", 2a ed., Edit. Mc Graw Hill, 1988.
- Viswanathan K. "Model for Continuous Drying of Solids in Fluidized/Spouted Beds". Can. J. Chem. Eng. 1986, 64 (2), pp. 87-95.
- Zahed A.H. y Epstein N. "Batch and Continuous Spouted Bed Drying of Cereal Grains: The Thermal Equilibrium Model". Can. J. Chem. Eng. 1992, 70 (10), pp. 945-953.
- Zahed A.H.; Zhu J.X. y Grace J.R. "Modeling and Simulation of Batch and Continuous Fluidized Bed Dryers". Drying Technology 1995, 13 (1&2), pp. 1-28.



TESIS DE MAESTRIA TITULADA:

**“CARACTERIZACION DINAMICA Y CONTROL DE UN
SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO POR LOTES”**

TESIS QUE PRESENTA:

I.Q. OSCAR VELAZQUEZ CAMILO

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

ASESORES:

**M.C. CARLOS MARTINEZ VERA
Dr. JOSE DE JESUS ALVAREZ RAMIREZ**

*23/10/2007
revisada
OMV*

**Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica
División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa
Av. Michoacán y Purísima s/n, Col. Vicentina, C.P. 09340
Cd. México, D.F., México**