

PREDICCIÓN DEL SECADO DE ZANAHORIA EN LECHO FLUIDO MEDIANTE UN GEMELO DIGITAL BASADO EN ECUACIONES FENOMENOLÓGICAS

Prediction of carrot drying in fluidized bed using digital twin based on phenomenological equations

^{1,2} Alejandro Javier Delgado Araujo*

² Edison Fernando García Narváez

² Fausto Andrés Reyes Estévez

^{2,3} Gilda Graciela Gordillo Vinueza

² Carlos Alberto Almeida

⁵ Jorge Alfonso López Lara

⁴ William Ricardo Venegas Toro

² Jorge Luis Santamaría Carrera

² Alejandro Daniel Hidalgo Chafuel

¹ Universidad de la Frontera, Doctorado en Ingeniería, Temuco, Chile.

² Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química, Departamento de Operaciones Unitarias, Quito, Ecuador.

³ Universidad Politécnica Salesiana, Grupo GILEC, Quito, Ecuador.

⁴ Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador.

⁵ Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador – EP PETROECUADOR, Quito, Ecuador.

* adelgado@uce.edu.ec

RESUMEN

Desarrollo e implementación de un gemelo digital para simular y predecir el proceso de secado de hojuelas de zanahoria en un lecho fluido (FBD), integrando ecuaciones termodinámicas con técnicas de simulación digital. Se recolectaron datos experimentales y operativos para validar el comportamiento del secador en condiciones reales, comparándolos con los resultados del modelo simulado. El gemelo digital permitió identificar puntos críticos, optimizar parámetros operativos, mejorar la eficiencia del proceso y proporcionar un modelo para predecir su comportamiento. Los resultados mostraron un cambio en la humedad final de 10% al 7% con la implementación del gemelo digital. Además, valiéndonos de los resultados en el simulador se realizó un análisis estadístico de varianza (ANOVA) que indica un modelo estadístico polinómico de primer orden con un coeficiente de determinación $R^2 = 99,88$. Estos resultados demuestran que los gemelos digitales son una herramienta eficaz para optimizar procesos industriales, alineándose con los avances de la automatización industrial, contribuyendo a la mejora continua en la calidad del producto y la sostenibilidad energética.

Palabras claves: *Gemelo digital, secado en lecho fluido, Aspen HYSYS® v14, zanahoria.*

ABSTRACT

Development and implementation of a digital twin to simulate and predict the fluidized bed drying (FBD) process of carrot flakes, integrating thermodynamic equations with digital simulation techniques. Experimental and operational data were collected to validate the dryer's behavior under real-life conditions, comparing them with the results of the simulated model. The digital twin allowed critical points to be identified, operating parameters to be optimized, process efficiency to be improved, and a model to predict its behavior was provided. The results showed a change in final moisture content from 10% to 7% with the implementation of the digital twin. In addition, using the simulator results, a statistical analysis of variance (ANOVA) was carried out, indicating a first-order polynomial statistical model with a coefficient of determination $R^2 = 99.88$. These results demonstrate that digital twins are an effective tool for optimizing industrial processes, aligning with advances in industrial automation, contributing to continuous improvement in product quality and energy sustainability.

Keywords: *digital twin, fluid bed drying, Aspen HYSYS® v14, carrot.*

I. INTRODUCCIÓN

El mercado global de gemelos digitales experimenta un crecimiento sostenido y se proyecta que alcance los 86,09 mil millones de dólares para 2028, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 42,7% desde 2021 (1). Esta herramienta a pesar de encontrarse en fase de desarrollo ya ha demostrado aplicaciones prometedoras en varias industrias, destacando en el procesamiento de alimentos; sus aplicaciones van desde la trazabilidad en la cadena de frío, la simulación del transporte de productos perecibles hasta la optimización de procesos postcosecha, entre ellos el secado (2). En este contexto, los gemelos digitales ofrecen un instrumento que permite controlar la evolución de variables críticas en procesos agroindustriales como el contenido de humedad (3), el peso, la actividad de agua y el perfil térmico. En investigaciones como la de Onwude (3), al aplicar modelos digitales a frutas cítricas, los resultados mostraron que era posible predecir con un 92% de precisión la variabilidad en el contenido de humedad y la actividad de agua durante el almacenamiento. La integración de algoritmos de aprendizaje automático en estas simulaciones incrementa la precisión predictiva, potenciando su utilidad para la gestión y control de procesos (1). Uno de los equipos con mayor aplicación en esta industria es el secador de lecho fluido (fluid bed dryer), reconocido por su capacidad para proporcionar un secado uniforme y adaptarse a diversos tipos de productos (4). Estudios anteriores demuestran que existe gran potencial entre la tecnología de los gemelos digitales y la optimización de procesos industriales en alimentos.

Verboven (5) demostró que un gemelo digital aplicado en frutas refrigeradas permitió reducir el deterioro postcosecha en un 20%. Por otro lado, Melesse (2) reportaron mejoras de hasta un 15% en la eficiencia térmica al predecir las curvas de secado mediante modelos fisicomatemáticos acoplados y una reducción del 12% en los tiempos de transporte simulados. Investigaciones recientes han explorado el potencial de los gemelos digitales para simular y optimizar parámetros operativos en procesos complejos de secado por lotes. Chen et al. (2020) demostró que su uso en secadores de lecho fluido permitió reducir en un 25% el consumo energético, mientras que Bürger (6) resaltaron que la integración de modelos fenomenológicos con datos experimentales permite alcanzar coeficientes de determinación

(R²) superiores al 95% en la predicción de la cinética de secado. De manera similar, estudios de Udagama (7) sobre gemelos digitales en la industria alimentaria plantean que el ahorro energético en operaciones unitarias puede oscilar entre un 15 y 30%, dependiendo de la complejidad del sistema modelado. Estos avances muestran que la digitalización de operaciones unitarias representa una herramienta estratégica para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia energética.

Uno de los desafíos para la industria de alimentos es la perdida de residuos postcosecha, alcanzando hasta el 45% en frutas y hortalizas, debido a procesos ineficientes de conservación y secado (7). Aquí es donde el uso de gemelos digitales cobra especial relevancia, ya que; permiten monitorear en tiempo real las condiciones internas y externas del producto, realizar simulaciones antes de ejecutar el proceso real y ajustar automáticamente los parámetros para maximizar la eficiencia energética y la calidad. Adicionalmente, Barraza (8) afirma que optimizar los gemelos digitales con herramientas IoT y machine learning aumenta la confianza en la recepción de datos en un rango del 10 al 18%, controlando la variabilidad en las predicciones. Estos hallazgos forman una parte importante en el desarrollo de la metodología aplicada al secado de zanahorias, donde los procesos y la distribución de las propiedades a lo largo del tiempo pueden ser variables difíciles de controlar.

En la agroindustria, la zanahoria de color naranja (*Daucus carota* subsp. *sativus*) presenta un alto potencial de mercado, ya que es un vegetal rico en nutrientes esenciales y compuestos bioactivos con reconocidos beneficios para la salud (9). Entre sus principales nutrientes se encuentran la provitamina A (β -caroteno), el α -caroteno, la luteína, la vitamina C (ácido ascórbico), la vitamina E y el complejo de vitaminas del grupo B (10). Por esta razón, ha sido seleccionada en el presente estudio, pero no se cuantificará el efecto del secado sobre sus nutrientes o componentes bioactivos. Motegaonkar [9] revisaron diferentes métodos de deshidratación y concluyeron que el secado en lecho fluido permite una retención de hasta el 85% de carotenoides, mientras que el secado combinado microondas-FBD incrementa la conservación hasta en un 92%, frente a un 60–65% en secado por aire caliente. Nicolle (11) al evaluar distintas variedades de zanahoria, reportaron variaciones de hasta

un 40% en el contenido de β -caroteno tras el secado, confirmando que la técnica empleada tiene un impacto determinante sobre la calidad nutricional.

El presente trabajo propone el desarrollo de un gemelo digital para el secado de hojuelas de zanahoria en un secador de lecho fluido, implementado en Aspen HYSYS® V14 y validado experimentalmente. Los resultados esperados se alinean con los reportados en la literatura: Chen (12) demostraron reducciones de hasta un 25% en el consumo energético en secadores de lecho fluido al optimizar caudal y temperatura mediante simulaciones. Bürger (6) evidenciaron que los modelos híbridos (fenomenológicos y experimentales) alcanzan coeficientes de determinación superiores al 95% en la predicción de la cinética de secado, lo que se traduce en mejoras de alrededor del 10% en la homogeneidad del proceso y Motegaonkar (9) revisaron distintos métodos de secado en zanahoria y concluyeron que el secado en lecho fluido conserva hasta un 85% de carotenoides en condiciones óptimas. Con ello se busca demostrar que la integración de estas herramientas no solo contribuye a la eficiencia energética, sino que también asegura la preservación de compuestos bioactivos y la sostenibilidad del proceso dentro de la industria de alimentos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Consideraciones del estudio

Se recolectaron datos experimentales y operativos de procesos de secado en lecho fluido, considerando los factores configurables del equipo. La metodología se desarrolló utilizando un lecho fluidizado de laboratorio, categoría industrial, marca SED PHARMA, modelo SED-1GFB-A. Los parámetros operacionales incluyen temperatura del granulador (45–150 °C), presión de aire comprimido (2–4 bar) y caudal de aire (0–150 m³/h). El equipo está fabricado en acero inoxidable 304 y 316, con componentes de vidrio de borosilicato, y dispone de dos modos de operación: manual y automático. Funciona con un voltaje de 220 V y una frecuencia de 60 Hz. Además, incorpora una bomba peristáltica de tipo electrónico BINACA 5001 / 5001SS (13), con un caudal máximo de 1000 mL/h, lo que amplía su versatilidad en procesos de secado y recubrimiento. Los parámetros operacionales

por estudiar serán el caudal y la temperatura del aire, masa del producto, así como el tiempo de secado. Se espera que estas variables influyan de manera significativa en el rendimiento del proceso, particularmente en la humedad relativa alcanzada en el producto final (12). El mecanismo de secado en lecho fluido comprende varias etapas; a medida que el agua se evapora, se forma un menisco en cada poro, generando fuerzas capilares que determinan el movimiento del líquido en el interior de la matriz porosa (14). Para simplificar el análisis del fenómeno, se asume que la operación unitaria se desarrolla a velocidad constante, donde la tasa de secado está gobernada principalmente por la evaporación de la humedad superficial (15). La Figura 1 presenta un diagrama esquemático con los componentes del secador de lecho fluido utilizado, mientras que la Tabla 1 describe de forma resumida las partes que conforman el equipo.

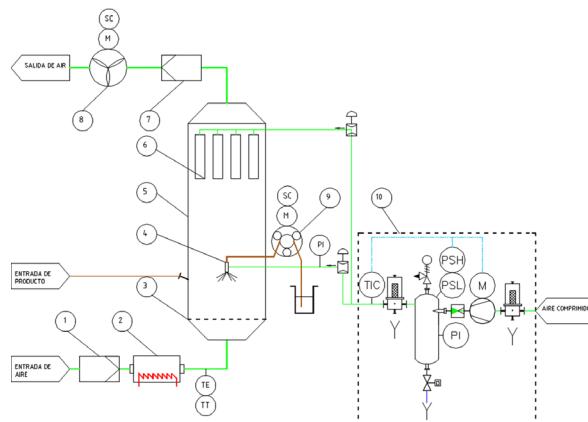


Figura 1. Diagrama esquemático con los componentes del secador de lecho fluido.

Donde:

- 1: Filtro de aire
- 2: Soplador/ Ventilador
- 3: Precalentador
- 4: Sensor de temperatura
- 5: Cámara de secado
- 6: Sistema de aspersión
- 7: Separador ciclónico
- 8: Ventilador de extracción
- 9: Sistema de control
- 10: Sistema de aire comprimido

Variables de proceso

En la presente investigación se seleccionaron como variables de estudio la temperatura del aire de secado (60–70 °C), el flujo de aire de fluidización (90–150 m³/h) y la cantidad de materia prima por carga (0,5–1,0 kg), debido a

que constituyen los factores más determinantes en la eficiencia del proceso y en la calidad final del producto. La temperatura es el principal impulsor de la evaporación de agua; Padilla (16) reportaron que un incremento de 10 °C en la temperatura de secado redujo el tiempo en un 18% a temperaturas menores de 70°C. Otra de las variables a considerar es el flujo de aire, este parámetro regula tanto la dinámica de fluidización como la transferencia de calor y masa. Chen (12) demostró que duplicar el caudal de aire en un secador de lecho fluido redujo la humedad final en un 25%. Finalmente, la cantidad de materia prima por carga incide en la homogeneidad del secado, Billah (17) señalaron que cargas superiores a 1,0 kg en lechos fluidizados de laboratorio incrementan en un 8–10% la humedad residual, debido a la menor penetración del aire caliente en las capas inferiores.

Preparación y secado de las muestras

Las zanahorias frescas fueron sometidas a un proceso de limpieza para eliminar residuos superficiales. Posteriormente, la materia prima se cortó en hojuelas con un espesor promedio de 2 mm y un diámetro aproximado de 20–25 mm, utilizando un cortador manual de cuchilla ajustable (18). Estas dimensiones se seleccionaron para garantizar una adecuada transferencia de calor y masa. Estas medidas fueron constatadas, estudios previos reportan que láminas delgadas entre 1,5 y 3,0 mm favorecen un secado uniforme y reducen los gradientes de humedad interna (19). Las muestras se pesaron en una balanza analítica digital de precisión (marca Ohaus®, modelo Pioneer PA214C), con capacidad de 200 g ± 0,001 g, calibrada internamente antes de cada jornada experimental (20). El uso de hojuelas delgadas, junto con un pesaje de alta precisión, garantizó la homogeneidad de las condiciones experimentales y la reproducibilidad de los resultados obtenidos en el secador de lecho fluidizado. Las muestras se colocaron en el secador de lecho fluido (FBD), el cual se encendió y se dejó estabilizar durante 10 minutos. A continuación, se establecen los parámetros de operación para cada uno de los experimentos, considerando tres niveles de caudal de aire: bajo (90 m³/h), medio (120 m³/h), alto (150 m³/h) y tres niveles de temperatura: baja (60 °C), media (65 °C) y alta (70 °C). Para delimitar la cantidad de materia prima se establecieron dos niveles: baja (0,50 kg) y alta (1,00 kg). El tiempo de secado se mantuvo en 60 minutos y la presión del aire comprimido en 3 bares. El

proceso de secado se inició registrando el tiempo con un cronómetro digital. Una vez transcurrido el tiempo de residencia programado, el equipo se apagó y la cámara de secado se dejó enfriar antes de extraer las muestras. Finalmente, las hojuelas secas (Figura 2) se pesaron nuevamente para determinar la pérdida de humedad.



Figura 2. Hojuelas de zanahoria secas.

Simulación en Aspen HYSYS® v14

Para iniciar la simulación, se seleccionaron las sustancias que intervienen en el sistema. Los datos utilizados para la simulación del secado de zanahoria fueron: tipo de fluido (solución 5 % hidróxido de sodio– 95 % agua), presión de entrada (3 bar), y temperatura de entrada (25 °C). El gemelo digital se modeló utilizando hidróxido de sodio como sustituto, debido a que en el entorno de Aspen HYSYS® v14 no existen componentes que representen de forma directa a vegetales o alimentos (16,21). El hidróxido de sodio se eligió también por su capacidad calorífica relativamente alta y su comportamiento térmico predecible en soluciones acuosas, con valores que oscilan entre 3,85 y 4,15 J/g °C (24). En este

modelo, el agua libre de la solución representa la humedad que se busca eliminar durante el secado, lo que permite realizar balances de masa y energía para evaluar la eficiencia del proceso. Por otro lado, para simular el aire comprimido que ingresa a la cámara del lecho fluido, se empleó la siguiente parametrización: tipo de fluido (98.60 % aire- 1.40 % agua), presión de entrada (0.7226 bares), temperatura de entrada (20 °C).

Se seleccionó el paquete termodinámico NRTL debido a que el sistema está compuesto por sustancias polares, clasificadas como electrolitos (22). En esta elección también se consideraron el rango de presión, la temperatura de entrada del aire y la cantidad de materia prima a secar. El modelo NRTL describe el equilibrio líquido-vapor en soluciones altamente no ideales mediante el uso de coeficientes de actividad y fugacidad, lo que permite reproducir el comportamiento de evaporación en soluciones concentradas (23). Una de las principales ventajas de este modelo

es su capacidad para predecir el comportamiento del sistema en condiciones que los coeficientes de actividad se encuentran por debajo del punto crítico de las sustancias, lo que garantiza una representación confiable del proceso de secado (24).

Una vez configuradas las corrientes, se procede a modelar la red de equipos, la línea de acondicionamiento de aire incorpora un filtro de partículas para la eliminación de impurezas sólidas, seguido de un intercambiador de calor (calentador) que eleva la temperatura del aire hasta el valor requerido para el proceso de secado, antes de su ingreso al secador. Finalmente, se establecen las condiciones operativas del secador de lecho fluidizado, definiendo la temperatura objetivo y las velocidades superficiales tanto del aire como de la corriente de alimentación líquida, el resultado de la simulación se puede observar en la Figura 3 (24).

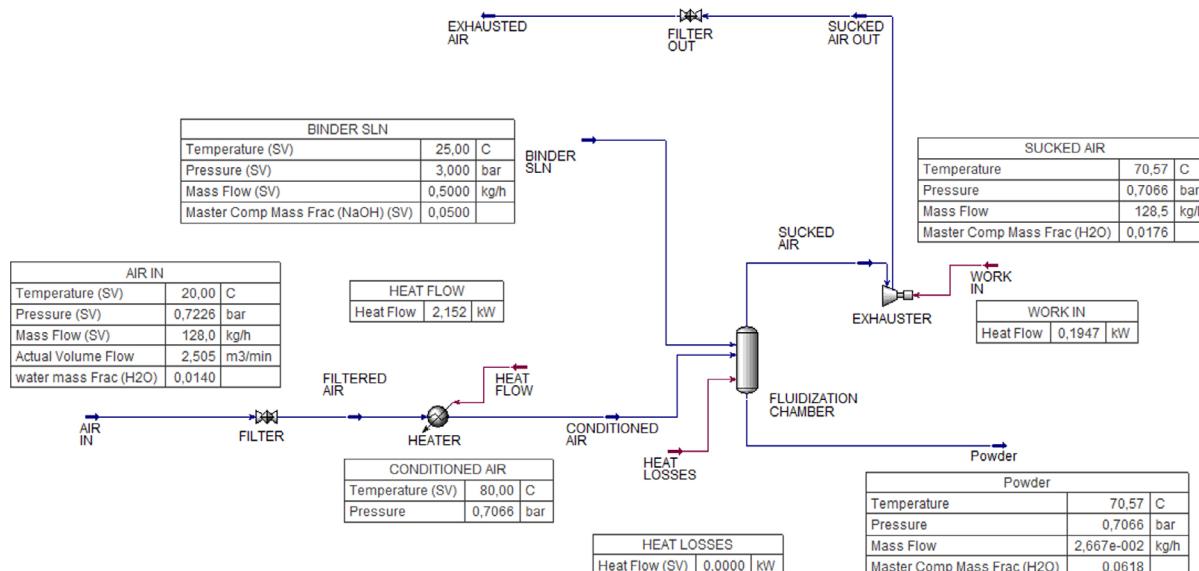


Figura 3. Diagrama de flujo simulado en Aspen HYSYS® v14

Las corrientes de proceso fueron definidas y simuladas utilizando el software Aspen HYSYS® v14, con el fin de modelar el comportamiento de un sistema de secado por aspersión. Las principales corrientes consideradas en el modelo fueron: Air in, que representa el flujo de aire ambiente de entrada al sistema; Filtered air, correspondiente al aire después del proceso de filtración; y Conditioned air, que describe el aire acondicionado (calentado) antes de ingresar al secador. Como alimentación de materia prima,

se definió la corriente Blinder sln (solution), que representa la suspensión húmeda a secar. En la salida del secador, se obtuvieron dos corrientes principales: Powder, correspondiente al producto seco recolectado, y Sucked air, que representa el aire húmedo cargado con humedad evaporada del material. Esta última corriente es impulsada por un soplador (representado mediante la corriente Sucked air out) y, finalmente, dirigida a un sistema de filtrado, del cual sale como Exhausted air, correspondiente al aire limpio

descargado al ambiente. Todas las corrientes fueron caracterizadas termodinámicamente en el modelo mediante modelos de propiedades adecuados para sistemas aire-agua y partículas sólidas, asegurando una representación realista del proceso.

En el sistema de secado, es fundamental analizar la composición del flujo de salida para determinar la cantidad de humedad final, junto con las condiciones de temperatura y presión, además de la cantidad de materia prima seca obtenida.

Análisis estadístico

Se desarrolló un gemelo digital en Aspen HYSYS® v14 para simular el secado de hojuelas de zanahoria en lecho fluido, utilizando una solución de hidróxido de sodio como sustituto del alimento y el paquete termodinámico NRTL. El diseño experimental consideró tres niveles de temperatura (60, 65, 70 °C), caudal de aire (90, 120, 150 m³/h) y dos niveles de masa de materia prima (0,5 y 1,0 kg), con 18 ensayos.

Debido a limitaciones operativas, los experimentos no fueron aleatorizados, sin embargo, cada corrida experimental requirió tiempos de estabilización y limpieza que hacían inviable una secuencia completamente aleatoria, pues podía introducir variaciones adicionales relacionadas con la pérdida de calor residual. La opción más viable fue ejecutar cada uno de los experimentos de forma ordenada, con protocolos estandarizados para mantener estable el sistema; de tal forma que, se mantiene la reproducibilidad en los tratamientos.

El modelo estadístico fue escogido en función de los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia de residuos. Se ajustó el modelo de regresión, tal y como se puede verificar en la tabla 2 y 3. Mediante el coeficiente de determinación (R^2). Se calcularon intervalos de confianza y predicción al 95% para evaluar la precisión del modelo, todos los análisis se realizaron en el programa Minitab® V22.

En base a los resultados obtenidos se realizó un gráfico de superficie de respuesta (RSM) como puede verificarse en la Figura 6, para ver el comportamiento entre los parámetros y la variable de respuesta.

III. RESULTADOS

Se evaluaron las humedades resultantes de hojuelas de zanahoria secadas en un secador de lecho fluido antes y después de realizar modificaciones en los parámetros operativos. Una vez implementadas las mejoras en variables clave se presenta una tabla comparativa que muestra los valores de humedad obtenidos en el gemelo digital en comparación con los datos experimentales iniciales.

Ensayo	Humedad sin el gemelo digital (%)	Humedad con el gemelo digital (%)
1	12,92	10,19
2	12,16	10,38
3	10,17	8,42
4	10,27	8,54
5	8,44	6,69
6	9,37	6,82
7	11,26	9,47
8	11,47	9,60
9	9,55	7,63
10	9,73	7,88
11	7,91	5,81
12	7,83	6,05
13	10,81	8,77
14	10,96	8,76
15	8,82	6,88
16	9,19	7,14
17	7,07	5,19
18	7,56	5,37
Humedad Promedio	9,749	7,755

Tabla 1. Comparación de la variable de respuesta.

A continuación, se muestra el modelo de validación para los datos experimentales, de esta forma las predicciones se pueden utilizar para optimizar variables como temperatura y caudal de aire, reduciendo el consumo energético y mejorando la eficiencia del secado.

Resultados en ASPEN HYSYS® V14

Para implementar el gemelo digital en el sistema es importante cotejar los resultados en el simulador y optimizar las variables, con el objetivo verificar que el gemelo cumple con su función. Esta sección conecta las operaciones físicas con sus homólogas digitales, lo que permite la supervisión y los ajustes en tiempo real. Se aplica el estudio de casos en el simulador para determinar un rango en donde las variables de

proceso que afectan directamente a la calidad del producto sean controladas y posterior, se toman datos para elaborar ecuaciones que describan estas variables (6).

La gráfica muestra la relación entre el flujo de aire de entrada al secador (kg/h) y la humedad final.

Ecuación	R ²
$Y = 0,0012X^2 - 0,3856X + 36,334$	0,9981

Tabla 2. Ecuación y coeficiente de determinación de la Figura 4.

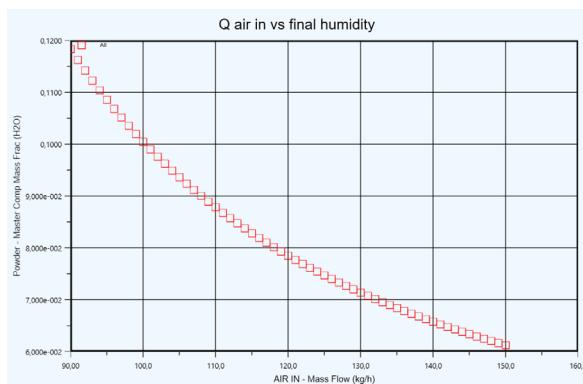


Figura 4. Curva caudal de aire vs humedad final.

Ecuación	R ²
$Y = 0,0056X^2 - 1,4248X + 92,515$	0,9953

Tabla 3. Ecuación y coeficiente de determinación de la Figura 5.

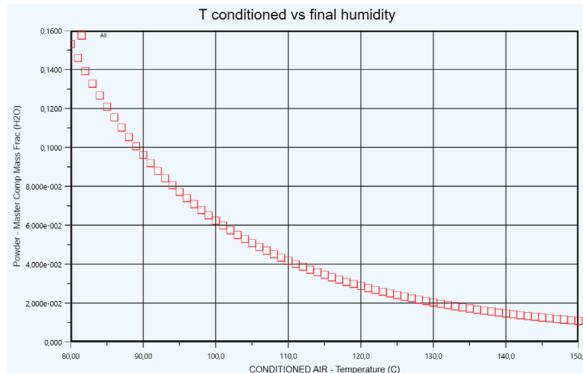


Figura 5. Curva temperatura del aire vs humedad final.

Análisis multifactorial

Mediante el análisis estadístico se demostró que el modelo es altamente preciso, el factor con mayor impacto en la humedad final de las hojuelas de zanahoria es el caudal de aire, seguido por la temperatura y al final la materia prima. Con pruebas de normalidad se demostró la significancia del modelo, por lo tanto, las variables tienen una relación directa con la

variable de respuesta (% de humedad). Además, el análisis de las interacciones entre factores muestra que no tiene un aporte significativo, es decir; la importancia de los resultados es independiente a las combinaciones. Para describir el comportamiento de la humedad final en función de las variables de proceso, se ajustó un modelo de regresión cuadrático de superficie de respuesta, considerando la temperatura, el caudal de aire y su interacción. El modelo obtenido fue estadísticamente significativo y explicó más del 99 % de la variabilidad observada en los datos, lo que confirma su capacidad predictiva.

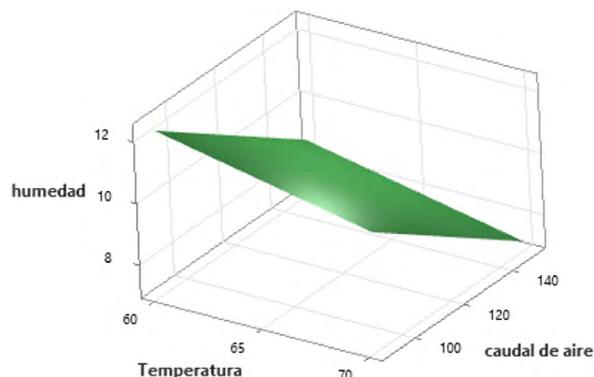


Figura 6. Gráfica de Superficie de respuesta: humedad vs caudal de aire; temperatura

La superficie de respuesta obtenida para la humedad final en función de la temperatura y el caudal de aire demuestra que, al aumentar la temperatura y flujo de aire, la humedad residual en las hojuelas de zanahoria disminuye significativamente, cabe recalcar que en la Figura 6 se mantiene el parámetro de la materia prima como valor fijo de 0,75 kg. Se observa que la zona óptima de secado se concentra hacia la combinación de temperaturas superiores a 65 °C y caudales cercanos a 140 m³/h, donde la humedad alcanza valores mínimos próximos al 8 %. Estos resultados coinciden con Méndez-Lagunas (14) indicaron que temperaturas superiores a 65 °C incrementan la velocidad de secado y reducen hasta en un 40 % el tiempo total del proceso, manteniendo la temperatura alrededor de 70 °C para evitar la degradación de compuestos bioactivos.

La regresión tiene un coeficiente de determinación ajustado del 99.88%, es decir; la ecuación explica el fenómeno con precisión, al aumentar la temperatura y el caudal mejora el secado, mientras que aumentar la cantidad de materia prima lo dificulta, las interacciones entre

parámetros no influyen significativamente al modelo.

$$\text{Humedad (\%)} = 24,2608 - 0,148833 * T - 0,059 * q + 0,331111 * m \quad (1)$$

Donde:

T: Temperatura (°C)

q: Caudal de aire (kg/h)

m: Materia prima (kg/h)

En base al análisis estadístico se obtuvieron datos exactos de los parámetros óptimos para el proceso de secado en el lecho fluido, además; en base a estos parámetros el análisis estadístico plantea un valor específico resultado, de 6,818 % de humedad final. El intervalo de confianza indica el rango en el que se esperan los resultados considerando los cambios en el sistema.

Variable	Valor de la configuración	Intervalo de Confianza al 95%	Unidad
Temperatura	70	(62,911; 67,089)	°C
Caudal de aire	150	(107,47; 132,53)	m³/h
Materia prima	0,5	(0,6221; 0,8779)	kg

Tabla 4. Variables óptimas para el secado.

Respuesta	Valor Optimo de respuesta %	Intervalos de confianza al 95 %	Unidad
Humedad	5-10	(6,223; 7,413)	%

Tabla 5. Intervalos de confianza y precisión.

El análisis estadístico muestra que, bajo los parámetros establecidos, se puede esperar una humedad final en el rango de 6,223% a 7,413% en promedio (Tabla 5). Esto sugiere que el modelo tiene una buena capacidad predictiva y el proceso es relativamente estable, con una dispersión aceptable.

IV. DISCUSIÓN

El experimento demostró que los gemelos digitales mejoran los procesos industriales, estos detalles se ven reflejados en el ahorro de recursos y la eficiencia operativa. Implementar el modelo redujo la humedad final desde el 10% al 7% en promedio, se debe a la capacidad para ajustar las variables independientes y optimizar la transferencia de calor durante el proceso. Una de las ventajas competitivas de los gemelos digitales es su capacidad de autoaprendizaje.

Elyas (23) señala que los gemelos digitales modernos integran algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático que permiten la interpretación de variables en función del entorno y la situación productiva. En el caso específico de frutas y hortalizas, estudios como el de Qi (25) han demostrado que el uso de esta tecnología puede reducir hasta en un 30% las pérdidas por sobre secado o degradación de propiedades organolépticas.

Según Chen (12) el uso de simulaciones numéricas para optimizar el secado de carbón en FBD, logrando una reducción del 25% en el consumo energético. Aunque el material estudiado fue diferente, ambos destacan la importancia de los simuladores para predecir y optimizar procesos de secado. En la investigación se utilizó Aspen HYSYS® v14 para modelar el proceso de secado y posterior validar los resultados mediante el análisis de casos de estudio, donde se verificó el comportamiento de la humedad en función del caudal de aire suministrado; como se puede verificar en la Figura 4.

Según Verboven (5) el uso de gemelos digitales en procesos alimentarios permite optimizar recursos, en este caso se realizaron varias simulaciones para verificar el comportamiento del sistema, se utilizó la herramienta de "análizador de casos" para verificar cual es el comportamiento del gemelo digital realizando cambios en los parámetros de estudio. La Tabla 2 muestra la relación entre la humedad en función de la temperatura, obteniéndose una regresión lineal con coeficiente de determinación de (0,9981). La tabla 3 muestra el comportamiento del sistema cuando la humedad cambia en función del caudal de aire suministrado, con un coeficiente de determinación de (0,9953). Estos valores muestran el potencial de los gemelos digitales, ya que; no solo reduce los costos asociados con pruebas de campo, sino que también permite agregar nuevas estrategias y tomar decisiones con antelación. La innovación y acople de programas tecnológicos ha permitido construir modelos híbridos que integran datos empíricos con modelos teóricos, herramientas como Matlab, Python, COMSOL Multiphysics® han sido parte de la modernización en estos procesos, además el uso de ecuaciones fenomenológicas como la Ley de Fick para la difusión de humedad o el balance energético de Fourier permite simular con precisión la cinética de secado (3).

Se logró una mejora en la reducción de humedad,

sin embargo; estudios recientes reportan avances mayores usando secado combinado (microondas-FBD) o estrategias de control predictivo. Otras investigaciones señalan que el principal desafío en la simulación de secado en FBD no es solo ajustar parámetros, sino comprender la dinámica multiescalar entre el flujo de aire, las gotas atomizadas y la distribución térmica heterogénea dentro del lecho. Estas complejidades se plantean para futuras investigaciones para una mejora continua.

Limitaciones y desafíos técnicos

Existen retos y mejoras para optimizar el sistema de secado, el gemelo digital permite ajustar parámetros como temperatura de entrada del aire, presión del atomizador y flujo de alimentación líquida, evitando problemas de sobrecalentamiento y gasto energético excesivo. Se recomienda conectar sensores de humedad, temperatura, presión y velocidad del aire, a la mano de protocolos de comunicación como OPC UA (Open Platform Communications Unified) o MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) (25). Una forma de escalar el modelo para ampliar el uso de la tecnología es validarla en condiciones de producción continua, con variaciones en la materia prima, ambiente y tipo de boquillas. El uso de atmosferas inertes y el control de presión dentro del sistema es fundamental para reducir los tiempos y mejorar el producto, el nitrógeno N₂ (g) es una alternativa viable para implementar en el BFD.

El simulador no maneja directamente sustancias orgánicas, es por esta razón que los cálculos se aproximan con hidróxido de sodio, una recomendación adecuada para futuras investigaciones es centrarse directamente en el desarrollo de sustancias hipotéticas orgánicas o el uso de programas alternos que usen bases de datos con propiedades orgánicas para modelar su comportamiento.

La ausencia de aleatorización podría haber introducido cierto sesgo sistemático, por ejemplo, asociado al efecto de la secuencia en que se corrieron las pruebas (acumulación de calor en el equipo, ligeras variaciones en la presión de aire o en el estado inicial de la materia prima), es por esta razón que el análisis es lineal como se puede observar en la figura 5. No obstante, al verificar supuestos estadísticos de normalidad, homocedasticidad e independencia de los residuos, se constató que los datos no presentaron

patrones de correlación atribuibles al orden de los ensayos.

V. CONCLUSIONES

Los Gemelos digitales permiten establecer estrategias de mantenimiento predictivo, reduciendo el tiempo de inactividad y mejorando la disponibilidad operativa. Este factor es clave en el desarrollo de fábricas inteligentes y procesos autónomos. Además, desde una perspectiva de sostenibilidad, los gemelos digitales permiten optimizar el uso de recursos naturales, reducir el desperdicio y mejorar la eficiencia energética en múltiples sectores, incluyendo la producción de alimentos, la manufactura, la construcción y la energía. Esto se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y la tendencia hacia una economía circular.

El modelo estadístico aplicado permite predecir la humedad final del producto, considerando los factores temperatura, caudal de aire y cantidad de materia prima, bajo la configuración evaluada (70 °C, 150 L/min y 0,5 kg) como se evidencia en la Tabla 4, se obtiene una humedad estimada de 6,818%, con un intervalo de confianza al 95% que va desde 6,223% a 7,413% (Tabla 5), estos datos muestran alta confiabilidad en la estimación de la media y reflejan la variabilidad esperada para los resultados.

El simulador Aspen HYSYS® v14 es una herramienta útil para el desarrollo de gemelos digitales en procesos industriales, gracias a esta herramienta, fue posible predecir la dinámica de secado, contabilizar los costos energéticos y tomar decisiones en tiempo real, mediante la simulación de casos. Esta función permite analizar el comportamiento del sistema; determinando ecuaciones para predecir el comportamiento del sistema como se puede evidenciar en las tablas 2 y 3.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Central del Ecuador por el apoyo financiero para llevar a cabo esta investigación, específicamente el Proyecto Senior 2021 "Estudio de las variables de proceso de un lecho fluidizado para el mejoramiento de la calidad del granulado de un producto vegetal en polvo". El artículo presente formó parte de la investigación.

VII. REFERENCIAS

1. Singh M, Srivastava R, Fuenmayor E, Kuts V, Qiao Y, Murray N, et al. Applications of digital twin across industries: a review. *Appl Sci (Basel)*. 2022;12:5727. <https://doi.org/10.3390/app12115727>
2. Melesse TY, Franciosi C, Di Pasquale V, Riemma S. Analyzing the implementation of digital twins in the agri-food supply chain. *Logistics*. 2023;7:33. <https://doi.org/10.3390/logistics7020033>
3. Onwude DI, Bahrami F, Shrivastava C, Berry T, Cronje P, North J, et al. Physics-driven digital twins to quantify the impact of pre- and postharvest variability on the end quality evolution of orange fruit. *Resour Conserv Recycl*. 2022;186:106585. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106585>
4. Kang HJ, Yu HH, Cho CW, Rhee YK, Kim TW, Chin YW. Optimization of medium composition and fluidized bed drying conditions for efficient production of dry yeast. *Microorganisms*. 2024;13:22. <https://doi.org/10.e3390/microorganisms13010022>
5. Verboven P, Defraeye T, Datta AK, Nicolai B. Digital twins of food process operations: the next step for food process models? *Curr Opin Food Sci*. 2020;35:79–87. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.002>
6. Bürger JV, Jaskulski M, Kharaghani A. Modeling of maltodextrin drying kinetics for use in simulations of spray drying. *Dry Technol*. 2025;43. <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2421451>
7. Udugama IA, Kelton W, Bayer C. Digital twins in food processing: a conceptual approach to developing multi-layer digital models. *Digit Chem Eng*. 2023;7:100087. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100087>
8. Barraza Rodolfo B, Chang Pedro Rodrigo O, Yvan Jesus G-L. Digital Twins Application in The Post-Harvest Supply Chain of Fruits and Vegetables: A Systematic Review of The Literature. 2022.
9. Motegaonkar S, Shankar A, Tazeen H, Gunjal M, Payyanad S. A comprehensive review on carrot (*Daucus carota L.*): the effect of different drying methods on nutritional properties and its processing as value-added foods. *Food Biosci*. 2024;1:11. <https://doi.org/10.1039/d3fb00162h>
10. Henrichs E, Noack T, Piedrahita AMP, Salem MA, Stolz J, Krupitzer C. Can a byte improve our bite? An analysis of digital twins in the food industry. *Sensors*. 2022;22:115. <https://doi.org/10.3390/s22010115>
11. Nicolle C, Simon G, Rock E, Amouroux P, Rémesy C. Genetic variability influences carotenoid, vitamin, phenolic, and mineral content in white, yellow, purple, orange, and dark-orange carrot cultivars. 2004;129.
12. Chen Q, Hu J, Yang H, Wang D, Liu H, Wang X, et al. Experiment and simulation of the pneumatic classification and drying of coking coal in a fluidized bed dryer. *Chem Eng Sci*. 2020;214:115364. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115364>
13. Ge R, Ye J, Wang H, Yang W. Investigation of gas–solids flow characteristics in a conical fluidized bed dryer by pressure fluctuation and electrical capacitance tomography. *Dry Technol*. 2016;34:13. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1116083>
14. Méndez-Lagunas LL, Rodríguez-Ramírez J, Sandoval-Torres S, Barragán-Iglesias J, López-Ortíz A. Strawberry fluidized bed drying: antiadhesion pretreatments and their effect on bioactive compounds. *Appl Food Res*. 2025;5:100739. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100739>
15. Askarishahi M, Salehi MS, Radl S. Challenges in the simulation of drying in fluid bed granulation. *Processes*. 2023;11:569. <https://doi.org/10.3390/pr11020569>
16. Amer BMA, Azam MM, Saad AG. Monitoring temperature profile and drying kinetics of thin-layer banana slices under controlled forced convection conditions. *Processes*. 2023;11:1771. <https://doi.org/10.3390/pr11061771>

17. Billah MT, Zannat NE, Hossain MA, Sachcha IH, Yasmin S, Sarker MSH. Process optimization of fluidized bed drying for water spinach: evaluating the effect of blanching through RSM and ANN models. *Food Sci Nutr.* 2025;13:70114. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70114>
18. Doymaz I. Infrared drying kinetics and quality characteristics of carrot slices. *J Food Process Preserv.* 2015;39:4–5. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12524>
19. Nazghelichi T, Kianmehr MH, Aghbashlo M. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. *Energy.* 2010;35:4. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.036>
20. Arslan D, Özcan MM. Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum L.*): change in drying behavior, colour and antioxidant content. *Food Bioprod Process.* 2011;89:7–8. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.09.009>
21. Amira T, Souhir G, Ahmed T. Mathematical modeling of batch fluidized bed drying of alumina. *Am J Mech Appl.* 2025;12:10. <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20251201.12>
22. Gagnon F, Bouchard J, Desbiens A, Poulin É, Lapointe-Garant PP. A dynamic simulation model of a continuous horizontal fluidized bed dryer. *Chem Eng Sci.* 2021;233:116258. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116258>
23. Elyas R. Dynamic simulation for process control with Aspen HYSYS. In: Aspentech, editor. *Chemical Engineering Process Simulation.* 2nd ed. Amsterdam: Elsevier; 2022. p. 20–26. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90168-0.00015-9>
24. Schwarz CE. Effect of variation between different experimental VLE data sets on thermodynamic model and separation predictions: NRTL correlation of the ethanol + water system. *Ind Eng Chem Res.* 2024;63:6–11. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00484>
25. Qi Q, Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access.* 2018;6:5–6. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>