

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Modelado de un secador de bandeja por lotes como un módulo integrado a un simulador de procesos comercial en la elaboración de bebidas nutracéuticas.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Andrea Emilia Palacios Rodríguez

Vicky Noemí Plúas Monroy

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a las personas que me han apoyado durante toda esta etapa de mi vida, especialmente a Dios que siempre me ha llenado de sabiduría y fortaleza para seguir adelante, a mi querida madre Roxana que con su inmenso amor supo aconsejarme y ser mi soporte durante esta etapa de mi vida, en especial a mi padre Pedro que, aunque no esté en este mundo su apoyo siempre fue incondicional y un pilar fundamental para mí, a mis hermanos Marlon y Milena que con su cariño supieron animarme a seguir adelante y darme confianza en mí mismo en los momentos más críticos. A mi abuelita Victoria y mi abuelito Pedro, que con sus enseñanzas fueron una inspiración para mí, a mi novio Joseph que siempre me alentó a seguir adelante.

VICKY NOEMÍ PLÚAS MONROY

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme inteligencia y ayudarme a seguir adelante, a mis padres, hermanos y novio por su apoyo, comprensión y amor incondicional.

A mis amigas que supieron darme su amistad a lo largo de mi carrera.

A mis tutores los PhD. Wilfredo Ángulo, Yris González, sin sus enseñanzas y guía no sería posible la realización de este proyecto.

VICKY NOEMÍ PLÚAS MONROY

DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico a un soñador, a un valiente la cual vida resultó tan efímera, pero marcó la vida de muchos, fue un buen hijo, un buen amigo, una excelente persona y mi hermano. Quien me enseñó a escribir sin asentar las palabras en las líneas porque decía que eso me ayudaría a ser más creativa y a soñar mucho más allá. Flavio Andrés Prieto Rodríguez sigues siendo uno de mis pilares y permanecerás siempre en nuestros corazones.

Andrea Emilia Palacios Rodríguez

AGRADECIMIENTOS


Agradezco a Dios por cada bendición bajo forma de oportunidad o lección que me hizo llegar hasta aquí, a nuestro tutor el Dr. Angulo, cotutora Dr. Gonzáles y los docentes de apoyo que con paciencia y dedicación fueron excelentes guías en este proyecto. Les agradezco de corazón a mis padres Marjorie Rodríguez y Emilio Palacios que han hecho muchos sacrificios y han estado siempre presentes, a mi abuelita Eusebia Loja, mi inspiración. Doy gracias a los docentes de la institución que tuve el placer de conocer y así adquirir tantos conocimientos, a mis amigas, gracias a ellas el camino fue más llevadero.

Un agradecimiento muy especial a la Miss Rosa Díaz, a la Miss Patricia Valdiviezo y a quien fue mi padrino durante un semestre muy difícil, de verdad gracias a su empatía y aliento no desmayé en el camino.

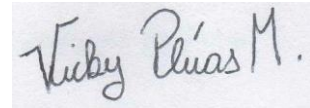
Andrea Emilia Palacios Rodríguez

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Andrea Emilia Palacios Rodríguez y Vicky Noemí Plúas Monroy damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Andrea Emilia Palacios
Rodríguez



Vicky Noemí Plúas
Monroy

EVALUADORES

Mgtr. Nadia Flores

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Wilfredo Angulo

PROFESOR TUTOR

PhD. Yris González

PROFESOR COTUTOR

RESUMEN

La necesidad de predecir el comportamiento de un proceso ha incrementado el uso de simuladores comerciales en la industria ya que estos logran indicar los resultados que se obtendrían al implementar un proceso de forma real. El presente proyecto se enfoca en modelar un secador de bandejas por lotes como modulo integrado a un simulador de procesos. Este modelado es un paso previo al escalamiento piloto de una planta de elaboración de la bebida nutracéutica. Para ello se investigaron los posibles modelos matemáticos para el equipo con el fin de escoger el que se adecue mejor al secador, luego de ello se realizó la respectiva introducción de todas las ecuaciones y variables tanto en un lenguaje de programación como en el modelador personalizado del simulador comercial, esto primero se lo realizó con los datos del modelo matemático y luego con datos de la bebida nutracéutica para finalmente obtener las gráficas de interés. Gracias a ello se logró reproducir el secado de bandejas por lotes empleando el customizador del software, así como también verificar el tiempo de secado desde la humedad inicial ingresada hasta la humedad final, de igual forma se obtuvo la temperatura del sólido a la salida del secador.

Palabras claves: nutracéutica, modelador personalizado del simulador comercial, secado

ABSTRACT

The need to predict the behavior of a process has increased the use of commercial simulators in the industry, since they manage to indicate the results that would be obtained when implementing a process in a real way. This project focuses on modeling a batch tray dryer as a module integrated into a process simulator. This modeling is a preliminary step to the pilot scaling of a nutraceutical beverage manufacturing plant. For this, the possible mathematical models for the equipment were investigated to choose the one that best suits the dryer, after which the respective introduction of all the equations and variables was carried out both in a programming language and in the personalized modeler of the dryer commercial simulator, this was first done with the data from the mathematical model and then with data from the nutraceutical beverage to finally obtain the graphs of interest. Thanks to this, it was possible to reproduce the drying of trays in batches using the software customizer, as well as to verify the drying time from the initial humidity entered to the final humidity, in the same way the temperature of the solid at the exit of the dryer was obtained.

Keywords: *nutraceutical, custom modeler of the commercial simulator, drying*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES	3
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
CAPÍTULO 1.....	13
1. Introducción.....	13
1.1 Descripción del problema.....	13
1.2 Justificación del problema	15
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo General	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 Marco teórico	18
CAPÍTULO 2 Metodología	29
2.1 Revisión del estado del arte del problema.....	29
2.2 Revisión de modelos matemáticos sobre el secado por lotes	30
2.3 Selección del modelo que mejor representa el equipo en la elaboración de la bebida nutracéutica.....	30
2.4 Descripción del algoritmo computacional asociado a la discretización del modelo matemático.....	30

2.5	Selección del lenguaje de programación.....	31
2.6	Implementación del algoritmo computacional en el lenguaje de programación seleccionado	31
2.7	Validación del algoritmo	32
2.8	Selección del simulador comercial de procesos.....	33
2.9	Procedimiento para migrar el algoritmo computacional del modelo matemático al software escogido en la sección anterior	33
2.10	Validación del módulo del secador de bandejas por lotes implementado en un software.....	33
2.11	Implementación del módulo de secado por lotes en el proceso de elaboración de la bebida nutracéutica.....	34
CAPÍTULO 3.....		35
3.	Resultados Y ANÁLISIS	35
3.1	Análisis del modelo matemático	35
3.2	Resultados y análisis de la validación del modelo matemático en Python y en Aspen Custom Modeler	35
3.3	Resultados y análisis con datos de la bebida nutracéutica en Python y ACM 48	
CAPÍTULO 4.....		60
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	60
4.1	Conclusiones	60
4.2	Recomendaciones.....	61
BIBLIOGRAFÍA		62
5.	Bibliografía	62
APÉNDICES.....		66

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PSIG	Libra por pulgada cuadrada.
KPA	Kilo Pascal
ATM	Atmósferas
KJ	Kilojoule
Kg	Kilogramo
HA	Humedad Absoluta
ACM	Aspen Custom Modeler
PDE	Ecuación diferencial parcial

SIMBOLOGÍA

a_{vo}	Relación inicial del área y volumen de partícula
a_v	Relación del área y volumen de partícula
a_w	Actividad del agua
Bi_{md}	Número de Biot
$C_{p_{hs}}$	Calor específico del sólido húmedo
$C_{p_{ha}}$	Calor específico del aire húmedo
ΔH_s	Calor de sorción
ΔH_w	Calor de vaporización
ε	Porosidad
$h_{g,h}$	Coefficiente de transferencia de calor
K	Conductividad térmica del sólido.
K_g	Coefficiente de transferencia de masa
L_c	Espesor del material
n_w	Flujo de agua
P_{ws}	Presión de vapor de saturación del agua
$P_{w\infty}$	Presión de vapor del agua
ρ_a	Densidad del aire
ρ_s	Densidad del sólido seco
T_s	Temperatura del sólido
T_g	Temperatura del aire
V_{10}	Volumen de lecho inicial
V	Volumen real
X	Humedad en el sólido
Y	Humedad en el aire
A	Área interfacial de contacto de fase
M_s	Masa de sólido
X_o	Contenido de humedad en el sólido antes del secado
A	Coefficiente de transferencia de calor por convección

Y _o	Humedad absoluta del aire en la entrada
W _b	Caudal másico del aire
W _d	Tasa de eliminación de humedad por unidad de superficie
T _{go}	Temperatura de aire húmedo en la entrada
C _b	Capacidad calorífica específica del aire seco
C _s	Capacidad calorífica del sólido
C _a	Capacidad calorífica de la fase de vapor
C _{al}	Capacidad calorífica de la fase líquida
Q	Cantidad de calor suministrado por unidad de tiempo
T _m	Temperatura del sólido
M _{air}	Masa del aire
M _o	Masa del sólido inicial
M _f	Masa del sólido final
C _p	Capacidad calorífica del agua
P _{aire}	Presión del aire
P _{vapag}	Presión de vapor del agua
k	Conductividad térmica del agua
μ	Viscosidad del agua
ρ	Densidad del agua
L _o	Longitud del lecho inicial

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Hojas de Ilex Guayusa	19
Ilustración 2 Vernonanthura Patens	19
Ilustración 3 Teobroma cacao L. (cascarilla de cacao)	20
Gráfica 2. 1 Flujograma de la metodología	29
Gráfica 3. 1 caso Benchmark	39
Gráfica 3. 2 caso Benchmark validado en Python	40
Gráfica 3. 3 Humedad del sólido versus el tiempo de la validación del modelo matemático.....	41
Gráfica 3. 4 Humedad del gas versus el tiempo de la validación del modelo matemático.....	41
Gráfica 3. 5 Temperatura del sólido versus el tiempo de la validación del modelo matemático.....	42
Gráfica 3. 6 Temperatura del gas versus el tiempo de la validación del modelo matemático.....	42
Gráfica 3. 7 Humedad del sólido respecto a la longitud, caso Benchmark en ACM ..	44
Gráfica 3. 8 Humedad del sólido respecto a la longitud, caso Benchmark en Python	44
Gráfica 3. 9 Humedad del sólido versus la longitud de la validación del modelo matemático.....	46
Gráfica 3. 10 Humedad del gas versus la longitud de la validación del modelo matemático.....	46
Gráfica 3. 11 Temperatura del sólido versus la longitud de la validación del modelo matemático.....	46
Gráfica 3. 12 Temperatura del gas versus la longitud de la validación del modelo matemático.....	47
Gráfica 3. 13 Humedad del sólido versus la longitud de la validación del modelo matemático.....	47

Gráfica 3. 14 Humedad del gas versus la longitud de la validación del modelo matemático.....	47
Gráfica 3. 15 Temperatura del sólido versus la longitud de la validación del modelo matemático.....	48
Gráfica 3. 16 Temperatura del gas versus la longitud de la validación del modelo matemático.....	48
Gráfica 3. 17 Humedad del sólido versus el tiempo para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	53
Gráfica 3. 18 Humedad del gas versus el tiempo para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	54
Gráfica 3. 19 Temperatura del sólido versus el tiempo para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	54
Gráfica 3. 20 Temperatura del gas versus el tiempo para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	54
Gráfica 3. 21 Humedad del sólido versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	56
Gráfica 3. 22 Humedad del gas versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	56
Gráfica 3. 23 Temperatura del sólido versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	56
Gráfica 3. 24 Temperatura del gas versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	57
Gráfica 3. 25 Humedad del sólido versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	57
Gráfica 3. 26 Humedad del gas versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	57
Gráfica 3. 27 Temperatura del sólido versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	58
Gráfica 3. 28 Temperatura del gas versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.....	58
Gráfica 3. 29 Algoritmo computacional realizado en el lenguaje de programación interpretado.....	69

Gráfica 3. 30 Algoritmo computacional realizado en el lenguaje de programación interpretado. 71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Parámetros requeridos del modelo matemático	35
Tabla 3. 2 Datos usados en el modelo matemático para el secador de bandejas por lotes de la bebida nutracéutica	48

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La simulación de procesos es una herramienta útil para el ingeniero, ya que se necesita conocer los rangos normales o prohibidos de funcionamiento de un equipo, esto ayuda tanto al correcto manejo de la planta, así como también a detectar sin ningún tipo de riesgo las condiciones seguras de operación, otra facilidad que la simulación proporciona, es la aproximación de los costos reales de cada equipo, con lo cual, gracias a ello se conocería la inversión inicial al implementar un proceso, ya sea a escala piloto o industrial (Robles, 1986).

Uno de los motivos por los que la simulación de procesos es una herramienta bastante exacta, es que esta usa modelos matemáticos para proporcionar resultados como, balances de materia y energía, por ello los modelos matemáticos son importantes en la operación de plantas y en el diseño de las mismas, ya que cuando se integra el modelado al simulador, se logra obtener el comportamiento ya sea, del proceso o equipo deseado (Robles, 1986).

El presente proyecto se enfocará, en introducir el modelo matemático de un secador de bandejas por lotes, mediante un lenguaje de programación al simulador de procesos, esto ayudará a predecir el comportamiento del mismo, y es un paso importante hacia el escalamiento piloto del proceso de elaboración de la bebida nutracéutica.

1.1 Descripción del problema

Existe una gran variedad de softwares de procesos comerciales, muchos de ellos, son fuertes herramientas de cálculo de procesos, que contienen una amplia base de datos para simular equipos, y disponen de modelos para cálculos termodinámicos, esto le da al simulador la ventaja de ser versátil. Algunos de ellos son: Aspen Plus, SpeedUp, PRO II, Hysys, Chemcad. De todos los mencionados, Aspen Plus, PRO II y Chemcad son simuladores de procesos en estado estable, mientras que SpeedUp sirve para representar un proceso dinámico, y Hysys es útil para ambos tipos de simulaciones (Sifuentes, 2003).

Un excelente simulador de procesos es Aspen Plus, ya que modela procesos integrados, realiza la estimación de costos, diseño de equipos, gestión de energía y análisis de seguridad, con el fin de mejorar el tiempo de comercialización, la

eficiencia de los procesos y el desempeño de la sustentabilidad (Aspentech, 2015). Sin embargo, una de sus limitaciones es la falta de ciertos equipos, tales como el secador de bandejas por lotes, comúnmente usado en la industria alimenticia, para el secado de material vegetal entre otros.

Dentro del proceso de elaboración de la bebida nutracéutica, las operaciones unitarias involucradas de alta importancia son: el secado y la extracción, ya que, estas definen la calidad del producto, sin embargo, en el presente proyecto nos centraremos en el secado, por ello la falta del secador de bandejas por lotes afecta, tanto a la simulación del proceso mencionado, como otros procesos que involucren dicho equipo.

Cabe recalcar que, el proyecto nace debido a que, en la tesis de Gabela y Villa, se realizó la caracterización de las materias primas *Vernonanthura Patens*, *Ilex Guayusa* y residuos de cáscara de cacao, mediante simulación del proceso, para lo cual se empleó como secador el de tipo continuo y flujo de aire convectivo a co-corriente, esto debido a su semejanza con el equipo requerido (Gabela and Villa 2021).

Este proyecto pretende solucionar la limitación del simulador modular, para representar la operación unitaria de secado de bandejas por lotes, en un proceso de elaboración de bebidas nutracéuticas. Esta limitante del software, es un problema que afecta a toda empresa o institución que requiera emplearlo, para simular procesos, en los que el secado de bandejas por lotes es una etapa fundamental. La problemática mencionada abarca sectores productivos, con operaciones unitarias similares a las que se encuentran involucradas en la elaboración de bebidas nutracéuticas.

Se debe considerar que, gracias a este proyecto, la simulación del proceso de elaboración de bebidas nutracéuticas, dará mejores resultados, ya que se añadirá al simulador, el modelado de un secador de bandejas por lotes como un módulo integrado, a través de un lenguaje de programación, esto representa un avance significativo a nivel industrial en el Ecuador, ya que, con la simulación se podrá conocer, el comportamiento del proceso mencionado si se implementa de forma real, y esto, no solo ayuda a conocer la inversión inicial que se debe hacer para llevar a cabo el proceso a escala industrial, sino que también, logra ahorrar

tiempo, ya que, evita la resolución de cálculos tales como, balances de materia y energía, costo de los equipos de forma manual. Y ayudará a que el Ecuador sea un país más industrializado.

Existen algunas restricciones relacionadas al proyecto como:

- Poca variedad de modelos matemáticos de un secador de bandejas por lotes, como referencias bibliográficas de soporte, para la reproducción del equipo en el software.
- Lenguaje de programación poco versátil y amigable con el usuario, ya que la estructura del código no es intuitiva, por lo cual se debe investigar para cada subrutina como debe ser configurada según lo que se requiera ejecutar. Un ejemplo es, que la introducción de las ecuaciones diferenciales en el customizador del software resulta complicada.
- El customizador del software tiene como limitación, que grafica de forma automática la representación de las ecuaciones diferenciales empleadas; sin embargo, para graficar ecuaciones algebraicas, en cambio se necesita agregar código para que se pueda efectuar.
- Poca referencia bibliográfica sobre el uso del customizador para: estructurar los códigos, crear gráficas, tablas, enlazar los ports, entre otros.

1.2 Justificación del problema

La simulación de un proceso es útil, para obtener información sobre su comportamiento, lo cual ayuda en la toma de decisiones, bajo condiciones de riesgo e incertidumbres, asistidas por computadoras y simuladores que representan todas las etapas del proceso. La principal ventaja del uso de los simuladores de procesos en ingeniería es que, logra representar estructuras de sistemas complejos del mundo real, para entender el comportamiento del sistema, o evaluar nuevas estrategias, manipulando distintas variables, tanto de diseño como de operación, dentro de los límites impuestos por cierto criterio, para el funcionamiento del sistema (Martínez, 2018).

Otras ventajas que tiene el uso del simulador, es la asistencia que brinda en el escalamiento del modelo, el ahorro de tiempo y dinero, debido a que se puede combinar con experimentación de laboratorio, y esto hace que se supla la falta de

equipamiento (Rakicka-Pustułka et al., 2020). Por otro lado, una de las razones principales, por las que se requiere el uso de simuladores de procesos en la Ingeniería, es que cuando se quiere implementar un proceso a escala industrial, por lo general, se trabaja con flujos grandes y si estos tienen un valor económico alto, un ligero cambio en las características de diseño u operación, puede tener una importancia considerable. También existen ocasiones en que las características o propiedades de alguna sustancia que se procesa no son conocidas (Salgado, 2009).

No obstante, se debe tener en cuenta que, en el uso de software el ingeniero debe tener cuidado, ya que, está comprobado que, a pesar de tener el mejor simulador, si se introducen datos erróneos, la simulación puede dar resultados que el programa considere correctos, pero en realidad sean malos resultados (Salgado, 2009). También se debe tener en cuenta, que cuando al simulador le falta algún equipo requerido, y se hace uso de un equipo similar, los resultados que dará el simulador serán correctos, sin embargo, al implementar el proceso ya sea a escala piloto o industrial, serán incorrectos debido a que las ecuaciones y fenómenos de transporte que rigen cada equipo son diferentes, es decir que el usar un equipo distinto al requerido afecta en los resultados obtenidos.

El uso de un equipo similar al requerido también afecta si se requiere que la corriente de salida que contiene el producto de interés, tenga alguna característica en particular, ya que, puede suceder que, en la simulación el producto cumpla con el estándar requerido, pero al implementarlo no cumpla con la característica, lo que representaría un gran problema, ya que se obtendría un producto o compuesto de mala calidad y esto afecta las ventas del mismo.

Por otro lado, el secador de bandejas, es un equipo cerrado y aislado, en el cual los sólidos se colocan en grupos de bandejas en el caso de sólidos particulados, o amontonados en pilas o repisas en el caso de objetos grandes (Perry, 2001). Una de las clasificaciones de los secadores, es por el método de operación, con lo cual, se tienen secadores por lotes, en los que el material se carga al secador y permanece allí hasta que se seca, luego de esto se descarga el material seco y se carga nuevamente al equipo con un nuevo lote (Cárdenas, 2005).

En el caso del proceso de elaboración de una bebida nutracéutica, el tipo de secador que se requiere, es el de bandejas por lote. Sin embargo, el simulador comercial que se usará en este trabajo no cuenta con este equipo, de allí surge la necesidad de implementar un modelado computacional, para el secador de bandeja por lotes, mediante un lenguaje de programación como un módulo integrado al simulador de procesos comercial.

Este módulo integrado tendrá un impacto significativo, ya que será de gran ayuda no solo para simular el proceso de elaboración de una bebida nutracéutica, sino también a todos aquellos procesos que requieren el secado de bandejas por lotes. También resulta económicamente beneficioso debido a que se evitarán errores comunes que se cometerían si se usaran otros equipos que están presentes en el simulador en lugar del módulo integrado.

Otro de los beneficios de este proyecto es que gracias al módulo integrado se podrá iniciar la implementación a escala piloto del proceso de elaboración de la bebida nutracéutica, ya que se obtendrán los datos requeridos para poner en marcha dicho proceso, logrando que el Ecuador sea un país más industrializado y exportador no solo de materias primas sino de productos refinados como lo son las bebidas nutracéuticas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Implementar un modelo matemático de un secador de bandeja por lotes empleando un lenguaje de programación para su validación como módulo añadido a un simulador de procesos comercial en la producción de una bebida nutracéutica.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Emplear las ecuaciones de los fenómenos de transporte involucrados en el secador de bandeja por lotes a través de balances de materia y energía para la formulación del modelo matemático.
2. Crear un algoritmo computacional a través de un lenguaje de programación para la implementación del modelo matemático que representa al secador de bandejas por lote en el simulador de procesos comercial.

3. Implementar el módulo de secador de bandejas por lotes en el simulador de procesos comercial a través de su modelador personalizado para la verificación del modelo en la simulación del proceso de elaboración de una bebida nutracéutica.

1.4 Marco teórico

Actualmente se realizan investigaciones sobre alimentación funcional para promover la salud y prevenir enfermedades, regresando a lo natural. Estos beneficios se otorgan a componentes fitoquímicos específicos o bioactivos, las cuales provocan una reacción capaz de generar efectos positivos dependiendo de la cantidad o biodisponibilidad de la sustancia y que se hayan en algunos alimentos como por ejemplo antocianinas, betacarotenos, flavonoides, entre otros. La industria nutracéutica moderna se comenzó a desarrollar en Japón a partir de 1980 y los componentes de sus productos son científicamente verificados como funcionales para la salud humana. (Egbuna et al., 2020).

El interés de las personas por la alimentación saludable está en crecimiento, esta tendencia de consumo conlleva a la innovación de la industria alimentaria, creando productos orgánicos y/o con mejor contenido nutricional, por lo cual se propone la producción de una bebida nutracéutica que destaca por su contenido de sustancias bioactivas las cuales disponen de propiedades energizantes. El secado de la materia prima de la bebida nutracéutica como las hojas de Ilex Guayusa, se efectúa con mayor eficiencia en un equipo convencional de bandejas, de forma discontinua, ya que así conserva mejor las propiedades físicas y químicas de interés como lo es el porcentaje de cafeína. (Manzano Santana et al. 2018)

Para la producción de la bebida nutracéutica se requiere identificar la estructura de la planta industrial con sus parámetros de operación, para lo cual es necesario emplear un software de simulación de procesos que fomente el desempeño de los equipos, este tipo de programa permite modelar y optimizar variables que condicionan las operaciones. (Abad Adrián, 2021).

La bebida nutracéutica se realiza a partir de sustancias naturales extraídas de las hojas de Ilex Guayusa, Vernonanthura Patens y de la cáscara de granos de cacao, las cuales cumplen con actividades antioxidantes que ayudan en

situaciones de salud como la regulación de estrés y ralentizar el envejecimiento celular.

La Guayusa es una planta amazónica que se encuentra en el Ecuador, sus propiedades son conocidas hace siglos atrás ya que su cultivo y consumo era parte de la tradición de pueblos ecuatorianos; sin embargo, solo en la actualidad se ha comprobado científicamente sus propiedades altamente antioxidantes. (Ivan Chóez et al. 2021)



Ilustración 1 Hojas de Ilex Guayusa

Fuente: [https://elpais.com/elpais/2018/12/27/album/1545922481_265516.html#foto_gal_1]

La Vernonanthura Patens, conocida como laritaco o flor de cuaresma, es procedente del trópico de Sudamérica en específico es endémica de Ecuador, se trata arbusto de tallo leñoso que tiene usos medicinales y se emplea por su actividad antiinflamatoria, antimalárica u antileishmaniasis. (Martínez, 2016)



Ilustración 2 Vernonanthura Patens

Fuente: [<https://ecosdelbosque.com/plantas/vernonanthura-patens>]

La cascarilla de cacao representa el 11% del desecho industrial en el uso del cacao en el Ecuador, contiene propiedades fito activas gracias a su composición de polifenoles y un valioso aporte de proteína bajo en fibras. Su uso representa el aprovechamiento de nuevas materias primas a partir de la reducción de un residuo industrial. (Tapia, 2015)



Ilustración 3 Teobroma cacao L. (cascarilla de cacao)

Fuente: [<https://cerroverdeorganic.com/product/cascarilla-de-cacao/>]

El uso de tecnologías aumenta junto a la necesidad de herramientas que faciliten la resolución de problemas de ingeniería, en especial con aplicación en las industrias. Esto ha llevado a varias empresas al uso de softwares especializados en la resolución de problemas realizando cálculos complejos y almacenando información. También permite correr simulaciones de procesos con el fin de predecir el comportamiento de operaciones si se llega a implementar a escala industrial ya que estos cálculos se logran realizar de forma rápida y sencilla (Cuevas, 2010).

Algo importante que resaltar de los simuladores de procesos es la disponibilidad de propiedades termodinámicas y de transporte de las corrientes del proceso. Estas propiedades son importantes ya que con ellas se logra llevar a cabo los balances de materia y energía al punto de que si se tiene buenos datos o correlaciones para las propiedades los resultados de la simulación serán confiables (Sifuentes, 2003).

Los programas de simulación comercial operan según una secuencia de pasos que va desde la configuración de la simulación que involucra parámetros de unidades de medida, título y descripción del proyecto, definición de componentes hasta la adición de opciones al diagrama de flujo como son los análisis de

sensibilidad, diseño de especificación, etc. En el paso que prevé la especificación de los equipos se dispone de la paleta de objetos para la selección de estos, sin embargo, la variedad a disposición es limitada ya que no se cuenta con algunos de los equipos que se emplean en los procesos industriales como es el caso del secador de bandeja por lotes. (Claus Reimers, 2018).

La atención a los productos alimenticios es mayor respecto a otros sectores, debido a la naturaleza de estos, que siendo resultado de procesos industriales deben estimular en el consumidor sus cualidades tanto como seguridad de consumo. Este objetivo se consigue, en la mayoría de los casos con la operación de secado, la cual resulta una de las primeras operaciones de conservación de alimentos en la historia, por lo tal ha sido atentamente observada, estudiada y mejorada como técnica industrial. Entre los objetivos principales de secado están:

- La extensión de la vida útil de producto
- La mejora de la calidad
- La condición adecuada para la tolerancia de los siguientes procesos
- Mayor pureza o esterilización del producto.

En el tiempo preindustrial el secado de algunos alimentos como el café, los fideos y otros era limitado ya que se realizaba bajo condiciones atmosféricas o uso de herramientas manuales lo cual podía dar resultados contraproducentes y limitar el comercio o acceso de estos productos, esto evidencia la importancia de la aplicación de estos procesos a gran escala, como también la búsqueda del equilibrio termodinámico al interno del equipo y del intervalo de tiempo idóneo.

En los secadores de bandejas por lotes se aplica el proceso de forma discontinua a determinada cantidad de producto ,dispuestos sobre bandejas que se mantienen estáticas al interno del equipo, para conseguir el objetivo de secado se necesita determinar de forma precisa las variables para así garantizar la homogeneidad del proceso ,por ejemplo la velocidad del flujo de aire que a través de fenómenos de transporte de masa facilitará el paso de la humedad en el alimento al aire saliente del equipo. Los factores de control durante la operación son:

La transferencia de calor que proporciona el calor latente de vaporización.

La transferencia de masa por el vapor de agua desde el alimento hacia el ambiente (Dagde & Nmegbu, 2014).

Los tipos de secadores disponibles en el software de simulación de procesos son: secador aerosol, secadores de lecho fluidizado, secador con transportador de cinta y secador rotatorio. Cada uno opera a diferente nivel de complejidad, por ejemplo, el secador de lecho fluidizado realiza cálculos en donde involucra dimensiones del equipo, rendimiento, curvas de secado de experimentos de pequeña escala, toma en cuenta los fenómenos de transferencia de masa y calor, pero no la cinética experimental ya que se considera constante. El secador de banda en cambio es constituido por un modelo incremental bidimensional, este modelo y similares se pueden implementar a través de ecuaciones abiertas empleando el ACM (Aspen Custom Modeler), es un modelador personalizado, para integrar otros secadores u adicionar aspectos del equipo. (Kemp, Hallas, and Oakley 2004).

Para la realización del proyecto es necesario conocer el concepto del modelo de un fenómeno, el cual, es el conjunto de representaciones formales, que incorpora los distintos conocimientos obtenidos de diferentes fuentes, sobre el fenómeno de interés, con lo cual, dentro del modelo debe estar la especificación formal de los elementos de un sistema, las relaciones entre los mismos y los parámetros, que permiten que el sistema funcione de acuerdo a las características del entorno y las relaciones del sistema del mundo real con el mismo. Este concepto es importante ya que, al usar un modelo, este permite realizar la resolución de un problema usando conocimientos que son válidos (Grupos de investigación Kishurim, 2013).

El modelo empleado para este proyecto es un modelo matemático, el cual es usado para describir fenómenos del mundo real, esto permite tener mejor conocimiento del objeto de estudio. Un ejemplo del uso de un modelo matemático es que, gracias al mismo, se pueden realizar comprobaciones con representaciones matemáticas, partiendo de datos para la formulación del modelo, el cual se analiza con el fin de establecer conclusiones matemáticas, que se interpretan mediante predicciones, las cuales se prueban con datos

reales, en lugar de realizar prácticas en el mundo real. La recolección de datos se realiza con el fin de encontrar información relevante y fundamental para el entendimiento del problema. Se identifican las variables, constantes y relaciones entre ellas como los insumos para la formulación del modelo (Grupos de investigación Kishurim, 2013).

Por otro lado, los modelos matemáticos son usados principalmente en los softwares de simulación ya que estos usan un conjunto de ecuaciones para cada uno de los equipos que se encuentran presentes en los simuladores, y este conjunto de ecuaciones son un modelo matemático que predice el comportamiento de los equipos.

El modelo matemático tomado como referencia para la representación del secador de bandejas por lote, fue realizado desde balances de materia y energía que, de acuerdo con los autores, este se reprodujo para analizar características como tiempos de secado y temperaturas de salida del aire y del sólido en el secado de alimentos tales como papas, manzanas y zanahorias. Finalmente, a través de este modelo se obtuvieron resultados confiables y estables, los cuales fueron verificados a través de la comparación que realizaron con datos experimentales de un secador piloto (Ratti, 2008).

Sistema de ecuaciones:

Balance de materia del aire:

$$\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)_\Lambda = \frac{n_w * a_v * (1 - \epsilon)}{\rho_a * \epsilon} - \frac{1}{S * L_0} * \frac{G_s}{\rho_a * \epsilon} * \frac{\rho_s * (1 - \epsilon)}{\rho_{s,0} * (1 - \epsilon_0)} * \frac{\partial y}{\partial \Lambda} \quad (1.4.1)$$

Balance de material del sólido:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_\Lambda = - \frac{n_w * a_v}{\rho_s} \quad (1.4.2)$$

Balance de energía del sólido:

$$\left(\frac{\partial T_s}{\partial t}\right)_\Lambda = \frac{a_v}{\rho_s * (1 + x) * C_{p,hs}} * (h_g * (T_g - T_s) - n_w * \Delta H_s) \quad (1.4.3)$$

Balance de energía del aire:

$$\left(\frac{\partial T_g}{\partial t}\right)_\Lambda = -\frac{h_g * a_v * (1 - \epsilon)}{\rho_a * \epsilon * C_{pha}} * (T_g - T_s) - \frac{1}{S * L_o} * \frac{G_s}{\rho_a * \epsilon} * \frac{\rho_s * (1 - \epsilon)}{\rho_{s,o} * (1 - \epsilon_o)} * \frac{\partial T_g}{\partial \Lambda} \quad (1.4.4)$$

El modelo prevé la obtención previa de parámetros y propiedades físicas, los cuales se determinan mediante literatura, como la ecuación para calcular el coeficiente de transferencia de masa, o ensayos en laboratorio por ejemplo la densidad del alimento (Ratti, 2008).

El modelo fue desarrollado teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- La distribución del flujo de aire es uniforme en la sección transversal de lecho (Ratti, 2008).
- El sistema es adiabático, por lo tanto, no hay pérdidas de energía a través de las paredes del secador (Ratti, 2008).
- El mecanismo predominante de transferencia de calor para las partículas sólidas es externo (convección) (Ratti, 2008).
- El calentamiento por conducción y la difusión por contacto entre partículas son insignificantes (Ratti, 2008).

Las ecuaciones necesarias para determinar algunos de estos parámetros que intervienen en las ecuaciones diferenciales son las siguientes (Ratti, 2008):

Flujo de agua, n_w :

$$n_w = \frac{k_g * (a_w * p_{ws} - p_{w\infty})}{\left(1 + \left(\frac{\phi}{x_o}\right) * Bi_{md}\right)} \quad (1.4.5)$$

Parámetro generalizado de secado, ϕ :

$$\phi = 0.00532 \left(\frac{x}{x_o}\right)^{-1.079} \quad (1.4.6)$$

Actividad del agua, a_w :

$$a_w = e^{-c_1 * x^{c_2}} + e^{q_1 * \exp(-q_2 * x) * x^{q_3} * \ln p_{ws}} \quad (1.4.7)$$

Calor de sorción, ΔH_s :

$$\Delta H_s = (1 + q_1 * \exp(-q_2 * x) * x^{q_3}) * \Delta H_w \quad (1.4.8)$$

Calor específico del sólido húmedo, $C_{p_{hs}}$:

$$C_{p_{hs}} = A + B * \left(\frac{x}{1+x} \right) \quad (1.4.9)$$

Relación del área y volumen de partícula, a_v :

$$a_v = \left(C + D * \left(\frac{x}{x_o} \right) + E * \left(\frac{x}{x_o} \right)^2 + F * \left(\frac{x}{x_o} \right)^3 \right) * a_{vo} \quad (1.4.10)$$

Porosidad, ε :

$$\varepsilon = 1 - \frac{V}{\left(G + H * \left(\frac{x}{x_o} \right) + J * \left(\frac{x}{x_o} \right)^2 + K * \left(\frac{x}{x_o} \right)^3 \right) * V_{1o}} \quad (1.4.11)$$

Donde:

$c1, c3, q1, q2, q3, A, B, C, D, E, F, G, H, J, K$ (son constantes adimensionales)

La resolución del modelo matemático descrito, se realiza mediante el método de líneas, el cual se implementa de la siguiente forma:

Modelo matemático

Se desea encontrar la función vectorial $p = p(t, x)$ de dimensión 4×1 tal que

$$\frac{\partial p}{\partial t}(t, x) + C(p(t, x)) * \frac{\partial p}{\partial x}(t, x) = f(p(t, x)); \quad (t, x) \in (0, T] \times (0, L], \quad (1.4.12)$$

$$p(0, x) = p^o(x); \quad x \in [0, L], \quad (1.4.13)$$

$$p(t, 0) = p_o(t); \quad t \in [0, T], \quad (1.4.14)$$

Donde C es una función matricial de dimensión 4×4 y f es una función vectorial de dimensión 4×1

Semi – discretización espacial usando el método de las líneas

Sea $M \in \mathbb{N}^*$ dado fijo. Se introduce una partición uniforme del intervalo $[0, L]$ en $M+1$ puntos definidos por

$$x_i = i\Delta x; \quad i = 0, \dots, M, \quad (1.4.15)$$

En donde Δx es el tamaño del paso determinado de la manera siguiente

$$\Delta x = \frac{L}{M} \quad (1.4.16)$$

Se denota $P_i(t)$, para cada $i=0, \dots, M$, la aproximación de $p(x_i, t)$ en todo $t \in [0, T]$ dado fijo. Entonces al emplear el esquema de Euler implícito para aproximar la derivada parcial espacial de p en el punto x_i de la partición, se tiene que

$$\frac{\partial p}{\partial t}(t, x_i) \approx \frac{P_i(t) - P_{i-1}(t)}{\Delta x} \quad (1.4.17)$$

Y el problema (1.4.12) - (1.4.13) – (1.4.14) se transforma en lo siguiente:

Para cada $i=1, \dots, M$ encontrar la función vectorial $P_i(t)$ que es solución del siguiente sistema de problemas de valores iniciales

$$\frac{dP_i}{dt}(t) = F(P_{i-1}(t), P_i(t)); \quad \forall t \in (0, T], \quad (1.4.18)$$

$$P_i(0) = P_i^0 \quad (1.4.19)$$

En donde la función vectorial F viene dada por

$$F(P_{i-1}, P_i) = f(P_i) - C(P_i) \left[\frac{P_i - P_{i-1}}{\Delta x} \right]; \quad i = 1, \dots, M, \quad (1.4.20)$$

Y P_i^0 es un vector de constantes conocidas para cada $i= 1, \dots, M$. En cuanto al punto $x_0= 0$ de la partición, correspondiente al índice $i= 0$, la función vectorial $P_0(t)$ es conocida para todo $t \in [0, T]$.

Para el problema particular que se trata aquí, se tiene que $P_0(t)$ es exactamente igual que la función vectorial $p_0(t)$ que modela la condición de frontera para todo $t \in [0, T]$. De hecho, es una función vectorial constante dada

$$P_0(t) \equiv p_0(t) = (a, b, c, d) \in \mathbb{R}^{4 \times 1}; \quad \forall t \in [0, T] \quad (1.4.21)$$

Por otro lado, la condición inicial P_i^0 es la aproximación de la función vectorial $p^0(x)$, para cada $i=0, \dots, M$. De hecho, para evitar un error en dicha aproximación, la condición inicial se toma exactamente igual al valor $p^0(x_i) \equiv p^0(i\Delta x)$ para todo $i=1, \dots, M$. En este trabajo, la función $p^0(x)$ viene dada por

$$P^0(x) = \left(a * e^{-x \ln(\frac{a}{b})}, b, c, d + (c - d)(2 - x)x \right); \quad \forall x \in [0, L] \quad (1.4.22)$$

Donde las constantes a, b, c y d son las componentes de $p_0(t)$. De aquí, la condición inicial queda como

$$P_i^0(x_i) = \left(a * e^{-x_i \ln(\frac{a}{b})}, b, c, d + (c - d)(2 - x_i)x_i \right); \quad \forall i = 1, \dots, M \quad (1.4.23)$$

Note que para el tiempo $t=0$ y el índice $i=0$, correspondiente al punto $x_0=0$, los datos $P_0(t)$ y P_i^0 son compatibles. Es decir

$$P_0(0) = P_0^0 = (a, b, c, d) \in \mathbb{R}_+^{4 \times 1} \quad (1.4.24)$$

Discretización completa usando el método de Runge Kutta

Ahora se propone una aproximación numérica del sistema de problemas de valores iniciales (2.6.7) - (2.6.8) empleando el método de Runge Kutta de cuarto orden. Para esto se supone dada una partición del intervalo de tiempo $[0, T]$ en $N+1$ puntos

$$0 = t_0 < t_0 < t_1 < \dots < t_j < t_{j+1} < \dots < t_N, \quad (1.4.25)$$

Definidos por

$$t_j = t_{j-1} + \Delta t; \quad \forall j = 1, \dots, N, \quad (1.4.26)$$

En donde Δt es el paso del tiempo

Si se denota por P_i^j al valor de $P_i(t)$ en el tiempo discreto t_j , entonces para cada $i=1, \dots, M$ el esquema de Runge Kutta de cuarto orden aplicado al sistema de problemas de valores iniciales (2.6.7) - (2.6.8) queda de la manera siguiente: Dado el iterado inicial P_i^0 , encontrar

$$\{P_i^j\}_{j=1}^N \quad (1.4.27)$$

Mediante el siguiente esquema: Para cada $j=0, \dots, N$

$$k_{1,i} = \Delta t * F\left(P_{i-1}^j, P_i^j\right); \quad (1.4.28)$$

$$k_{2,i} = \Delta t * F\left(P_{i-1}^j + \frac{k_{1,i}}{2}, P_i^j + \frac{k_{1,i}}{2}\right); \quad (1.4.29)$$

$$k_{3,i} = \Delta t * F\left(P_{i-1}^j + \frac{k_{2,i}}{2}, P_i^j + \frac{k_{2,i}}{2}\right); \quad (1.4.30)$$

$$k_{4,i} = \Delta t * F\left(P_{i-1}^j + \frac{k_{3,i}}{2}, P_i^j + \frac{k_{3,i}}{2}\right); \quad (1.4.31)$$

$$P_i^{j+1} = P_i^j + \frac{1}{6}(k_{1,i} + k_{2,i} + k_{3,i} + k_{4,i}); \quad (1.4.32)$$

Algoritmo

Entrada: $P_0^0 = (a, b, c, d)$; M ; N ; Δx ; Δt

Paso 1: Para $i = 1, \dots, M$ hacer

Paso 2: Calcular $x_i = i\Delta x$

Paso 3: Calcular $P_i^0 = p^0(x_i)$

Paso 4: Para $j = 0, \dots, N$ hacer

$$k_{1,i} = \Delta t * F\left(P_{i-1}^j, P_i^j\right); \quad (1.4.28)$$

$$k_{2,i} = \Delta t * F\left(P_{i-1}^j + \frac{k_{1,i}}{2}, P_i^j + \frac{k_{1,i}}{2}\right); \quad (1.4.29)$$

$$k_{3,i} = \Delta t * F\left(P_{i-1}^j + \frac{k_{2,i}}{2}, P_i^j + \frac{k_{2,i}}{2}\right); \quad (1.4.30)$$

$$k_{4,i} = \Delta t * F\left(P_{i-1}^j + \frac{k_{3,i}}{2}, P_i^j + \frac{k_{3,i}}{2}\right); \quad (1.4.31)$$

$$P_i^{j+1} = P_i^j + \frac{1}{6}(k_{1,i} + k_{2,i} + k_{3,i} + k_{4,i}); \quad (1.4.32)$$

Fin j

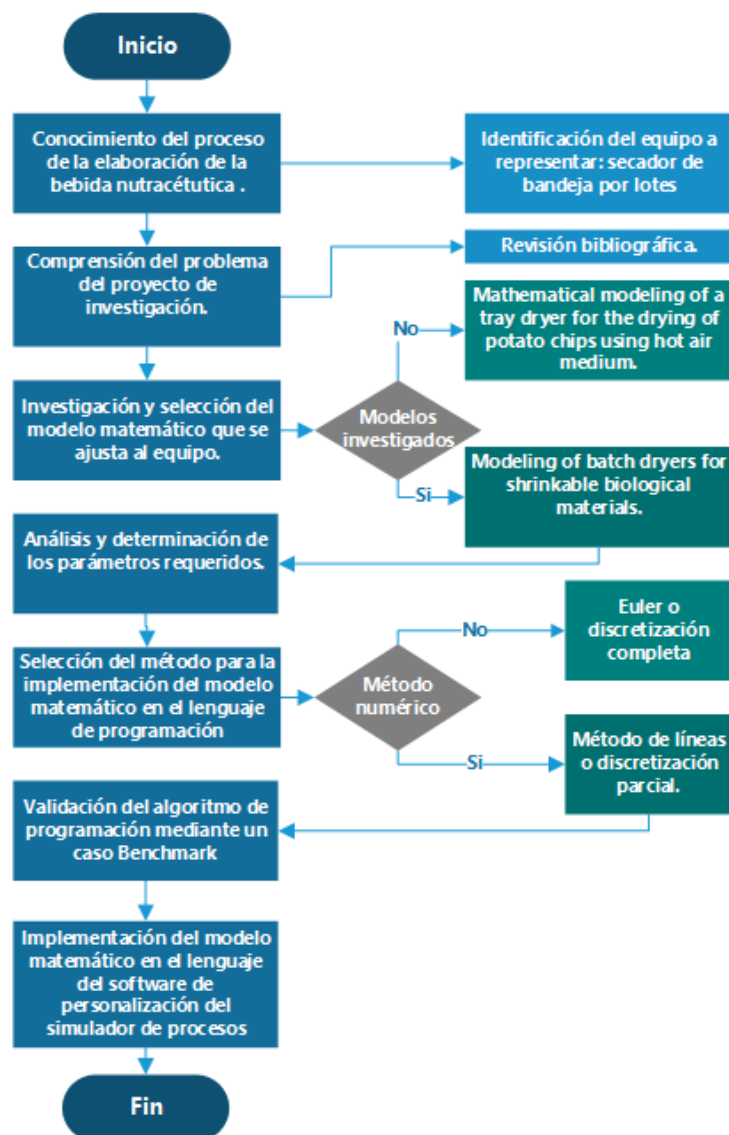
Fin i

Salida: $\{P_i^j\}$ para todo $i = 1, \dots, M$ y todo $j = 0, \dots, N$.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El algoritmo mostrado a continuación indica los pasos a seguir para cumplir con los objetivos del presente proyecto:



Gráfica 2. 1 Flujograma de la metodología

2.1 Revisión del estado del arte del problema

La revisión del estado del arte del problema de este trabajo se llevó a cabo tomando como fuente principal las recomendaciones y sugerencias reportadas en

el trabajo de (Gabela, 2021) y en el trabajo de (Abad, 2021). Los aspectos y necesidades relacionados con la particularidad del problema de secado por lotes en la elaboración de bebidas nutracéuticas fueron consultados en el trabajo realizado previamente por (Ivan Chóez, 2021).

2.2 Revisión de modelos matemáticos sobre el secado por lotes

En esta sección, se realizó una revisión de artículos especializados en secadores de bandejas por lotes con el fin de escoger modelos matemáticos que se adecuen mejor al equipo mencionado en el proceso de elaboración de la bebida nutracéutica. Los principales modelos fueron:

- Modelado de un secador de bandejas por lotes para el secado de papas fritas (Kekpugile, 2014).
- Modelado de un secador por lotes para materiales biológicos con contracción (Ratti, Modeling of Batch Dryers for Shrinkable Biological Materials, 2008).

2.3 Selección del modelo que mejor representa el equipo en la elaboración de la bebida nutracéutica

Para la elección del modelo matemático que se adecue mejor al equipo de interés se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

- Clara visualización de los valores en los ejes de las gráficas que se reportan en el artículo.
- Las ecuaciones que forman el modelo deben estar en estado dinámico
- Un reporte claro de las ecuaciones y variables que intervienen en el modelo

2.4

2.4 Descripción del algoritmo computacional asociado a la discretización del modelo matemático

El algoritmo computacional asociado a la discretización del modelo matemático estuvo basado en el método de líneas que se describió en el marco teórico. Para la implementación en el lenguaje de programación elegido el algoritmo se estructuró de la manera siguiente:

1.- Importación de librerías

- 2.- El proceso de configuración de datos del modelo
- 3.-Ingreso de ecuaciones adicionales
- 4.-Ingreso de ecuaciones diferenciales parciales
- 5.-Las salidas: Gráficas respecto al tiempo y a la longitud del lecho

2.5 Selección del lenguaje de programación

Para seleccionar el lenguaje se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Personalizable e intuitivo con el usuario.
- Lenguaje de programación que se pueda ejecutar en un entorno de desarrollo integrado, fácilmente y en plataforma de acceso libre.
- Existencia de manuales y cursos disponibles de forma libre en internet sobre el lenguaje escogido.
- Lenguaje de programación sobre el cual se tengan conocimientos base.

2.6 Implementación del algoritmo computacional en el lenguaje de programación seleccionado

Para la implementación del algoritmo descrito en el paso 2.4 en el lenguaje de programación elegido se procede de la siguiente manera:

1. Crear dos archivos, en donde el primero contendrá las ecuaciones a resolver y el segundo tendrá los parámetros usados y el algoritmo para mostrar las gráficas.

Para el segundo archivo

1. Importar las librerías que se vayan a usar a lo largo del código junto con la función creada en el segundo archivo.
2. Ingresar las condiciones iniciales de las 4 incógnitas e ingresar los parámetros usados en el modelo, el número de puntos para discretizar la coordenada espacial e ingresar el tiempo inicial y final que se desea para el modelo matemático.
3. Crear un vector que tenga la misma cantidad de los puntos para discretizar y que los valores se encuentren entre 0 y 1.
4. Establecer las condiciones iniciales para dos de las variables de estado dadas mediante una expresión matemática supuesta.

5. Crear dos vectores para las otras dos variables de estado.
6. Asignar una variable a cada vector creado en el paso anterior y multiplicarlo por las condiciones iniciales de las dos variables de estado respectivamente.
7. Determinar un vector de tiempo que vaya desde el tiempo inicial hasta el final.
8. Llamar a la función importada desde el primer archivo y asignarle las variables que necesite.
9. Graficar las 4 variables que se resolvieron, respecto al tiempo y a la coordenada espacial, mostrando curvas para 3 tiempos distintos en las gráficas respecto a la coordenada espacial y mostrando 3 longitudes distintas en las gráficas respecto al tiempo.

Para el primer archivo

1. Importar las librerías usadas a lo largo del código.
2. Ingresar la humedad relativa del aire como parámetro.
3. Crear dos funciones, en donde la primera función tiene como argumentos todos los parámetros que se ingresan en el segundo archivo y la segunda función que se encuentra dentro de la primera tiene como argumentos un vector C y otro vector tiempo.
4. Ingresar las ecuaciones adicionales dentro de ambas funciones e ingresar el sistema de ecuaciones diferenciales parciales (PDE), discretizando la coordenada espacial.
5. Retornar el vector de la segunda función.
6. Dentro de la primera función concatenar las 4 condiciones iniciales y resolver la diferencial respecto al tiempo con la función `solve_ivp`.
7. Retornar las 4 variables que se resolvieron dentro de las funciones y el tiempo en la primera función.

2. Correr la simulación.

2.7 Validación del algoritmo

La validación del algoritmo, se llevó a cabo mediante su aplicación sobre un caso de estudio, relacionado con el proceso de secado de sólidos granulares, reportado en el trabajo de (Angulo, 2021). Posteriormente, el algoritmo se

configuró tanto con el modelo correspondiente al proceso del modelo matemático escogido como al proceso de secado para la elaboración de la bebida nutracéutica.

2.8 Selección del simulador comercial de procesos

Para la elección del simulador se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- No presentar tantas limitaciones respecto a la configuración de los equipos.
- Realizar análisis económico.
- Realizar análisis de seguridad.
- Contar con varios softwares.
- Contar con un modelador personalizado del simulador comercial.

2.9 Procedimiento para migrar el algoritmo computacional del modelo matemático al software escogido en la sección anterior

Se procedió a reproducir los pasos que se siguieron al implementar el modelo matemático al lenguaje de programación, para implementar el mismo en el software y previo a ello, se estudió su manual, con lo cual se siguieron los pasos descritos a continuación:

- 1 Importar las propiedades de los componentes.
- 2 Establecer el nombre y el ícono que represente el modelo.
- 3 Declarar las variables y propiedades.
- 4 Declarar ecuaciones.
- 5 Compilar el código y detectar errores.

2.10 Validación del módulo del secador de bandejas por lotes implementado en un software

Para comprobar la correcta estructura del código se adaptaron los pasos descritos en el punto anterior a un caso Benchmark de un secador rotatorio, con el fin de comparar los resultados con los obtenidos mediante el lenguaje de programación.

1. Ingresar los parámetros necesarios para el modelo, en la ventana de codificación.

2. Clasificar los parámetros introducidos.
3. Discretizar la coordenada espacial con el método que mejor se adecue al modelo, indicando la cantidad de puntos para la discretización.
4. Introducir las condiciones de frontera y las condiciones iniciales.
5. Realizar un lazo for que recorra los valores que se discretizan de la coordenada espacial.
6. Ingresar las ecuaciones diferenciales parciales, teniendo en cuenta que se debe representar la derivada respecto al tiempo con el signo siguiente signo (\$).
7. Introducir las condiciones iniciales.
8. Correr el código.

2.11 Implementación del módulo de secado por lotes en el proceso de elaboración de la bebida nutracéutica

Una vez validado el modelo matemático, se procedió a realizar los mismos pasos descritos en la sección 2.9, pero con datos de la bebida nutracéutica, para analizar el comportamiento del proceso de secado de la bebida nutracéutica.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis del modelo matemático

El modelo matemático escogido fue el secador por lotes para la contracción de materiales biológicos. Este permite estudiar la contracción del sólido en la elaboración de la bebida nutracéutica. Además, el modelo estudia los mecanismos de transferencia de masa por difusión y de calor por convección en estado dinámico, también toma en cuenta parámetros como la porosidad o el área sobre el volumen de la partícula, es decir los balances se dan de forma microscópica.

Todo esto permite estudiar cómo se desarrollaría la operación de secado cuando se implemente el proceso a escala piloto, obteniendo así resultados más exactos.

3.2 Resultados y análisis de la validación del modelo matemático en Python y en Aspen Custom Modeler

Teniendo en cuenta los criterios mencionados en el paso 2.5 de la metodología, se seleccionó Python como lenguaje de programación.

Se realizó una validación del modelo matemático en el lenguaje de programación Python y en ACM.

Lo primero que se hizo fue una recopilación de datos necesarios para implementar el modelo, los datos son los que se muestran en la siguiente tabla

Tabla 3. 1 Parámetros requeridos del modelo matemático

Parámetros	Estimación de parámetros	Referencia bibliográfica
Re número de Reynolds	$Re=1587$	(Ratti, Determination of heat transfer coefficients during drying , 1995)
Flujo de aire por unidad de área G	$G=Gs/A$ $G= 23.31 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$	(Ratti, Determination of heat transfer coefficients during drying , 1995)
Capacidad calorífica del	Se obtuvo del libro de Cengel $Cp=4.18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{°C}$	(Cengel, Termodinámica, 2012)

agua Cp		
Conductividad térmica del agua k	Sacado del libro de Cengel k=0.000582 kw/m°C	(Cengel, Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones , 2006)
Viscosidad del agua μ	Sacado del repositorio de la Universidad Técnica Nacional de Argentina μ=0.000547 kg/m*s	(Norte, 2010)
Difusividad Dab	Se obtuvo del libro de Welty Dab=3.01x10 ⁻⁵ m2/s	(Welty, 1969)
Densidad del agua pagua	ρ=988 kg/m3	(Cengel, Termodinámica, 2012)
Peso molecular del aire Ma	Sacado del libro de Felder Ma=28.9 kg/kmol	(Felder, 2004)
Pbm	Los datos fueron sacados del libro de Cengel Pvapag=2.33 kpa Paire=101.325 Pbm=Pvapag+Paire Pbm=103.66	(Cengel, Termodinámica, 2012)
Kg coeficiente de transferencia de masa	Se determinó con las siguientes ecuaciones: $j_m = 2.25 * Re^{-0.501}$ $j_m = \frac{kg * P_{BM} * M_a}{G} * \left(\frac{\mu}{\rho * D_v}\right)^{\frac{2}{3}}$ $kg = 6.26x10^{-3} \frac{kg}{m^2 * s * kpa}$	(Bradshaw, 1963)
A1	16.3872	(Ness, 1995)
B1	3885.70	(Ness, 1995)
C1	230.170	(Ness, 1995)
pws presión de saturación del agua	Se determinó mediante la ecuación de Antoine $P_{ws} = e^{A1 - (B1/(T(^{\circ}C) + C1))}$	(Ness, 1995)

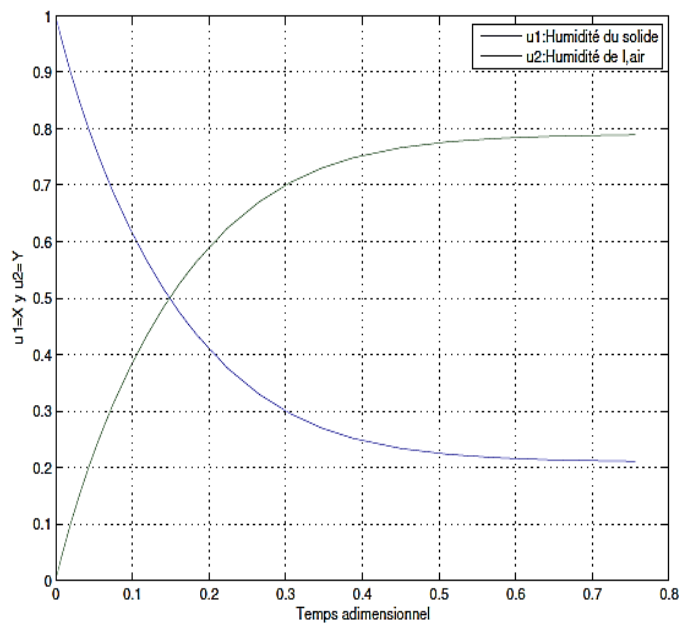
	<p>Donde</p> <p>A1, B1 y C1 son constantes de la ecuación</p> <p>T(°C) es la temperatura del sólido</p>	
Pw [∞]	<p>Se determinó mediante la ecuación de Antoine</p> $P_{ws} = e^{A1 - (B1/(T(^{\circ}C) + C1))}$ <p>Donde</p> <p>A1, B1 y C1 son constantes de la ecuación</p> <p>T(°C) es la temperatura del gas</p>	(Ness, 1995)
h - hg coeficiente de transferencia de calor convectivo	<p>Sacado del artículo científico de Cristina Ratti</p> <p>0.0718 kw/m²*°C</p>	(Ratti, Determination of heat transfer coefficients during drying , 1995)
pa densidad del aire	<p>Sacado de la tabla termodinámica</p> <p>1.092 kg/m³</p>	(Cengel, 2012)
ps densidad del sólido seco	<p>Sacada de la revista Scielo</p> <p>500 kg/m³</p>	(Buitrago, 2004)
Cpha calor del aire húmedo	<p>Sacado de tablas termodinámicas</p> <p>1.006 kj/kg*°C</p>	(Cengel, 2012)
Lc espesor del material	<p>Sacado del artículo guía</p> <p>0.05 m</p>	(Ratti, Modeling of Batch Dryers for Shrinkable Biological Materials, 2008)
ΔHw calor de vaporización:	<p>Sacado de tablas termodinámicas</p> <p>2382 kj/kg</p>	(Cengel, 2012)
V volumen real:	<p>Se calculó de la siguiente forma:</p> $V = \pi * r^2 * h$ <p>Teniendo los datos de diámetro y altura</p> <p>r=0.005</p> <p>h=0.05</p> $V = 3.92 \times 10^{-6} \text{ m}^3$	(Ratti, Modeling of Batch Dryers for Shrinkable Biological Materials, 2008)
V1o volumen de	<p>Se calculó así:</p>	(Ratti, Modeling of Batch Dryers

lecho inicial	$V_{1o} = V \cdot \text{cantidad de cilindros de papa}$ 140 cilindros de papa $V_{1o} = 5.49 \times 10^{-4} \text{ m}^3$	for Shrinkable Biological Materials, 2008)
avo área de la partícula/ volumen inicial	Se calculó así: $avo = A/V$ $A = \pi \cdot r \cdot h$ $A = 0.000785$ $avo = 200 \text{ m}^{-1}$	(Ratti, Modeling of Batch Dryers for Shrinkable Biological Materials, 2008)
Gs flujo de aire	Se sacó del artículo científico de Cristina Ratti 0.0183 kg/s	Simulation of Packed Bed Drying of Foodstuffs with Airflow Reversal (Cristina Ratti 1995)
Lo longitud del lecho inicial	Sacado del artículo científico guía 0.035 m	(Ratti, Modeling of Batch Dryers for Shrinkable Biological Materials, 2008)
S área de sección transversal	Se calcula así $A = V/(1 - \epsilon_o)$ $A = 0.07625 \text{ m}^2$	(Ratti, Modeling of Batch Dryers for Shrinkable Biological Materials, 2008)
ρso densidad inicial del sólido	Sacada de la revista Scielo 530 kg/m ³	(Buitrago, 2004)
εo porosidad inicial:	Sacada del artículo científico de Cristina Ratti 0.9928	(Ratti, Shrinkage During Drying of Foodstuffs , 1994)
Bio Número de Biot	Sacado del artículo científico de Cristina Ratti 0.291	(Ratti, Determination of heat transfer coefficients during drying , 1995)

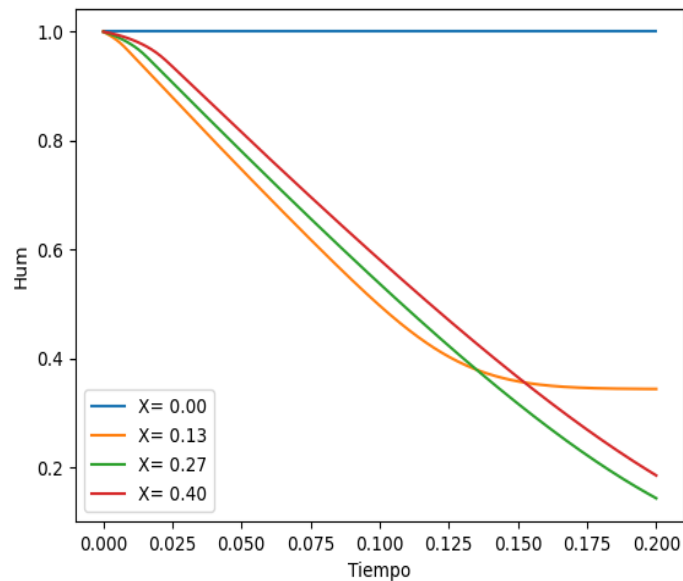
Para la realización del modelo en Python se procedió a crear dos archivos, el primer archivo contiene:

- Los parámetros del modelo
- Número de puntos para discretizar
- Vector que contiene la longitud
- Las condiciones iniciales de las 4 ecuaciones diferenciales parciales de las cuales dos de las condiciones son valores fijos $x=x_0$ y $T_s=T_{s0}$ y las otras dos condiciones son valores que van variando respecto a las iteraciones con ecuaciones que se encuentran descritas en la tabla 3.1.
- Gráficas de las 4 incógnitas respecto al tiempo y a la longitud

Sin embargo, a fin de validar el código realizado en Python se usó un caso Benchmark que ya se encuentra validado similar al modelo de interés.



Gráfica 3. 1 caso Benchmark



Gráfica 3. 2 caso Benchmark validado en Python

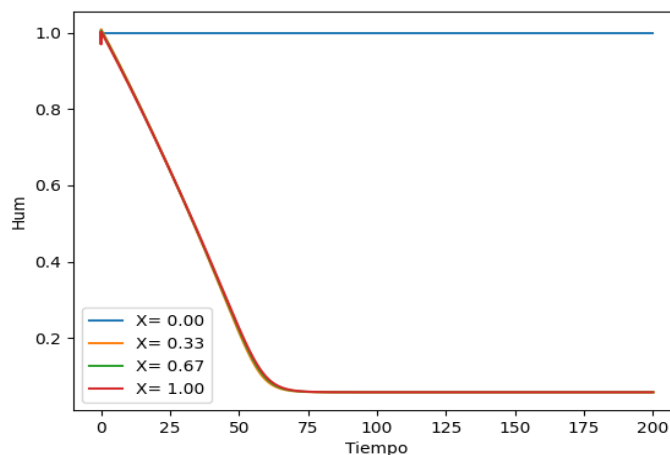
Se observa que la gráfica 3.1 de color verde y 3.2 de color rojo son similares, es decir que el código de Python es correcto, con lo cual se pudo implementar el modelo de interés.

El segundo archivo fue creado con el fin de resolver el sistema de ecuaciones PDE, usando dos funciones, las cuales se resuelven mediante el método de diferencias finitas, la derivada respecto a la coordenada espacial. Luego de ello, para resolver la derivada respecto al tiempo se usó la función solve_ivp de la biblioteca Scipy. Finalmente, se procedió a correr el código y se obtuvieron las gráficas desde la 3.3 hasta 3.6 y desde la 3.9 hasta la 3.12, (El código se encuentra descrito en la sección de apéndices).

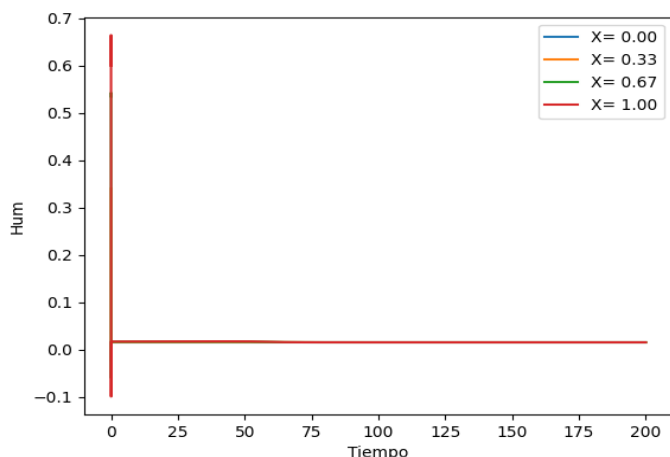
Sin embargo, a fin de validar el código realizado en Python se usó un caso Benchmark que ya se encuentra validado, similar al modelo de interés.

En la gráfica 3.3, la humedad disminuye conforme pasa el tiempo, esto es debido al fenómeno de transferencia de masa ocurre en el proceso de secado, ya que, al pasar el aire caliente dentro del secador, ocurre la difusión del aire en el sólido húmedo y, por ende, el aire atrapa el agua que se encuentra dentro de dicho sólido, quitándole humedad, es decir, los resultados que se observan en la gráfica son correctos.

En la figura 3.4 la humedad del aire va decreciendo respecto pasa el tiempo, lo cual no es correcto, ya que al darse la transferencia de masa, debería aumentar la humedad del aire conforme aumenta el tiempo, esto puede deberse a que los datos recopilados fueron obtenidos de varias fuentes, ya que, en el artículo guía de donde se sacó el modelo los datos estaban incompletos, por ende el resultado de la gráfica es distinto de lo que se espera, también es posible que la función que describe la condición inicial de la humedad del gas, no sea la adecuada para la misma, por lo cual valdría la pena investigar a fondo otra función para y .



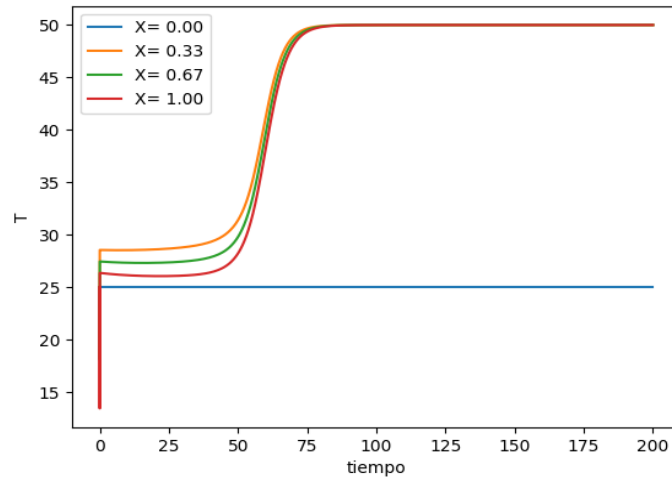
Gráfica 3. 3 Humedad del sólido versus el tiempo de la validación del modelo matemático.



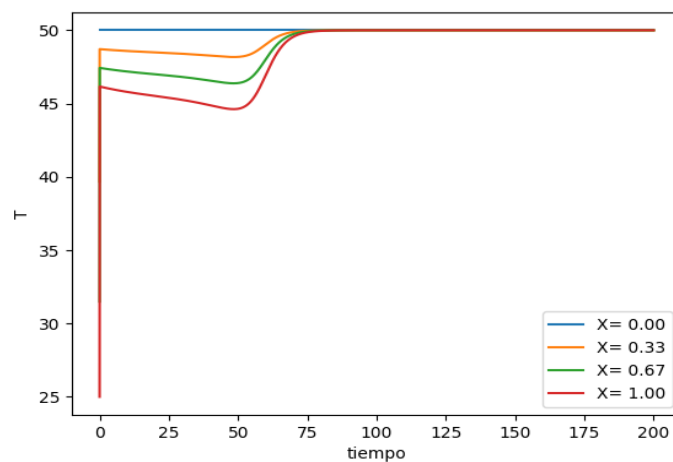
Gráfica 3. 4 Humedad del gas versus el tiempo de la validación del modelo matemático

Según la gráfica 3.5, la temperatura del sólido va aumentando respecto al tiempo y lo mismo sucede en la gráfica 3.6, donde la temperatura del aire va aumentando respecto al tiempo, de igual forma, esto se debe a que dentro del secador se da una transferencia de calor por convección forzada, ya que el aire se está moviendo

dentro del mismo, lo cual hace que tanto el sólido como el aire se calienten, aumentando así su temperatura, por lo tanto el resultado obtenido en ambos gráficos es el correcto.



Gráfica 3. 5 Temperatura del sólido versus el tiempo de la validación del modelo matemático



Gráfica 3. 6 Temperatura del gas versus el tiempo de la validación del modelo matemático

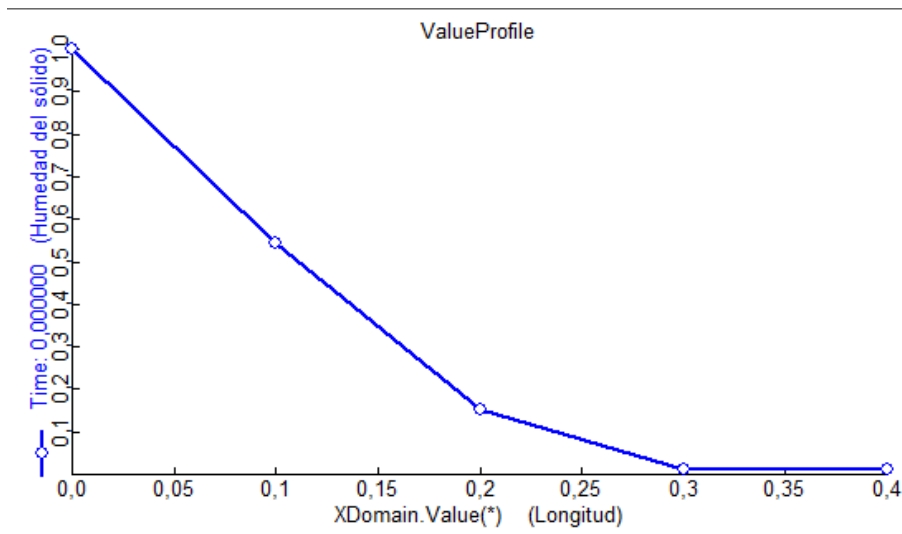
Luego de investigar varios softwares, se escogió el que cumplía con todos los parámetros mencionados en el punto 2.8 de metodología, el cual fue Aspen. Este software contiene un programa denominado Aspen Custom Modeler (ACM), el cual ayuda a implementar una unidad añadida por el usuario de cualquier equipo que se requiera simular, ingresando varios parámetros de este.

Comparación de las gráficas respecto a la longitud obtenidas en Python y en ACM

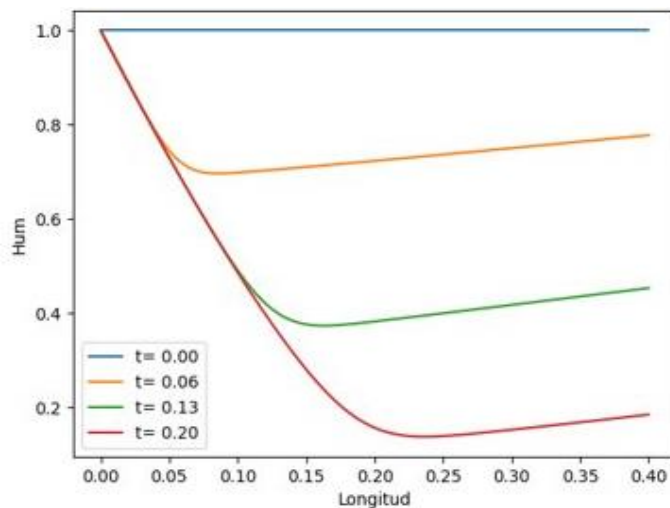
Para la implementación del modelo en el ACM se realizó lo siguiente:

- Se importaron las propiedades de los compuestos desde Aspen Properties.
- Se creó el modelo, dándole un nombre al mismo y agregando el ícono que representa al equipo que deseamos modelar a la ventana principal.
- Se abrió la ventana para ingresar el código, dando clic derecho en el nombre del modelo y dando clic en la opción edit.
- Se procedió a ingresar los parámetros que se necesitan del modelo matemático en la ventana que se abre.
- Se discretizó la coordenada espacial, indicándole el número de puntos para discretizar, el método de discretización e indicando que la coordenada espacial estaba en el dominio de x, esto se indica para que las gráficas salgan con la longitud en el eje x.
- Se indicaron las variables respecto a la coordenada espacial.
- Se ingresaron los ports.
- Se procedió a realizar un lazo for con el fin de recorrer el número de puntos a discretizar de la coordenada espacial y se ingresó el sistema PDE denotando a la variable que este respecto a la coordenada discretizada como (variable (índice del lazo for).ddx) y denotando a la variable respecto al tiempo como (\$variable(índice)).
- Finalmente se ingresaron las condiciones de frontera e iniciales de las 4 incógnitas del sistema PDE; (La codificación se encuentra en la sección de apéndices).

Sin embargo, al no tener la certeza de si el código era correcto, se decidió implementar el caso Benchmark, con el fin de comparar las gráficas respecto a la longitud, realizadas en Python y se obtuvieron las siguientes gráficas.



Gráfica 3. 7 Humedad del sólido respecto a la longitud, caso Benchmark en ACM



Gráfica 3. 8 Humedad del sólido respecto a la longitud, caso Benchmark en Python

Como las gráficas 3.7 y 3.8 tienen tendencias iguales, eso significa que se logró la validación del modelo en ACM, con lo cual, se procedió con la implementación del modelo matemático de interés.

Respecto a las gráficas 3.9 y 3.13 de la humedad del sólido respecto a la longitud del lecho en Python y ACM respectivamente, ambas llevan la misma tendencia, es decir, van decreciendo conforme aumenta la longitud del lecho, esto se debe a que, como el aire va pasando dentro del secador a lo largo de la bandeja, este se va difundiendo en el sólido, lo cual hace que el aire atrape la humedad del sólido produciéndose así el secado, sin embargo, la gráfica de

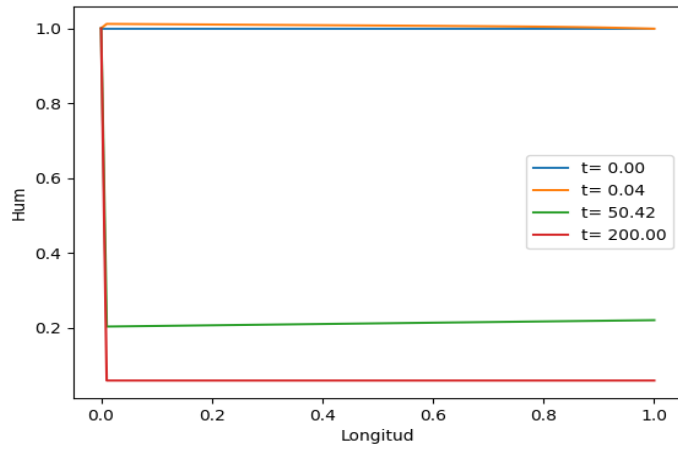
Python decrece de forma diferente que la del ACM, esto es debido a que el método de discretización usado en ambos programas son distintos, por lo cual, los resultados obtenidos pueden variar, pero vemos que la diferencia entre los mismos no es tan drástica, esto significa que los resultados de ambos programas son válidos.

Las gráficas 3.10 y 3.14 de Python y del ACM respectivamente, que representan la humedad del gas respecto a la longitud del lecho, van creciendo conforme aumenta la longitud, es decir tienen la misma tendencia, es importante recalcar, que el crecimiento se observa de mejor forma en la gráfica del ACM 3.14, ya que, el crecimiento es tan pequeño que es casi insignificante, en cambio en la gráfica 3.10, el aumento no es visible, ya que existen varias gráficas que se encuentran a diferentes tiempos.

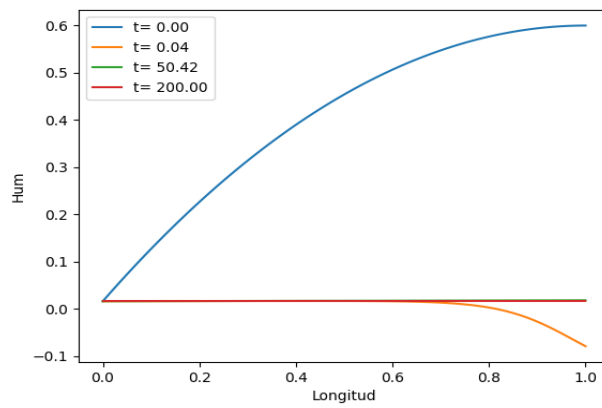
En la gráfica 3.11 de Python, se observa que la temperatura del sólido, tiene un gran aumento en la longitud 0.01 m y luego permanece constante y en el gráfico 3.15 del ACM, se ve un aumento de la temperatura, hasta aproximadamente una longitud del lecho de 0.25 m y posterior a ello la temperatura sigue constante, es decir, que ambos gráficos tienen tendencias similares, sin embargo, crecen a diferentes longitudes, debido a que se aplican distintos métodos de discretización.

En las gráficas 3.12 y 3.16 de Python y ACM respectivamente, se observa como en ambas gráficas la temperatura del aire decrece conforme la longitud aumenta, es decir, son inversamente proporcionales, pero el decrecimiento se visualiza mejor en la gráfica 3.16, debido a que esta muestra más valores en los ejes, en cambio en la 3.12, esto no se observa, debido a que se muestran otras gráficas para varios tiempos distintos.

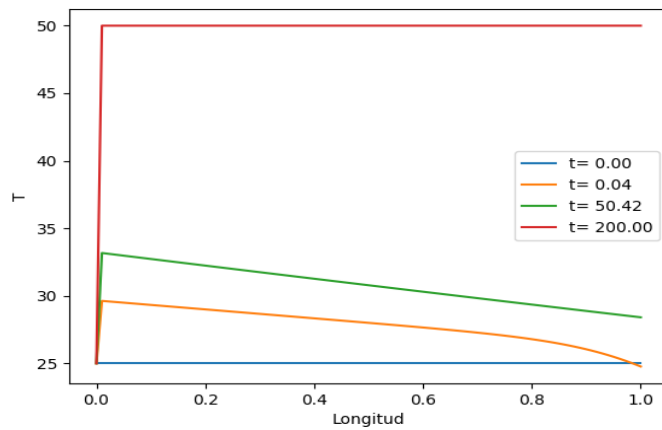
Esta comparación se la realizó para conocer si los resultados que muestra ACM son los correctos, por lo tanto, podemos indicar que las gráficas obtenidas en el programa mencionado si son las esperadas.



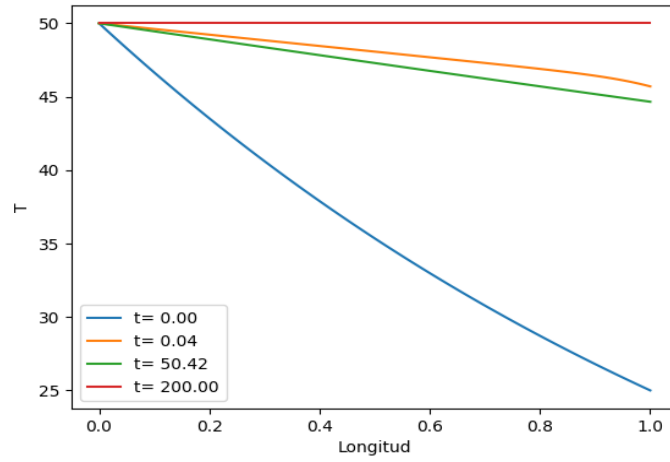
Gráfica 3. 9 Humedad del sólido versus la longitud de la validación del modelo matemático



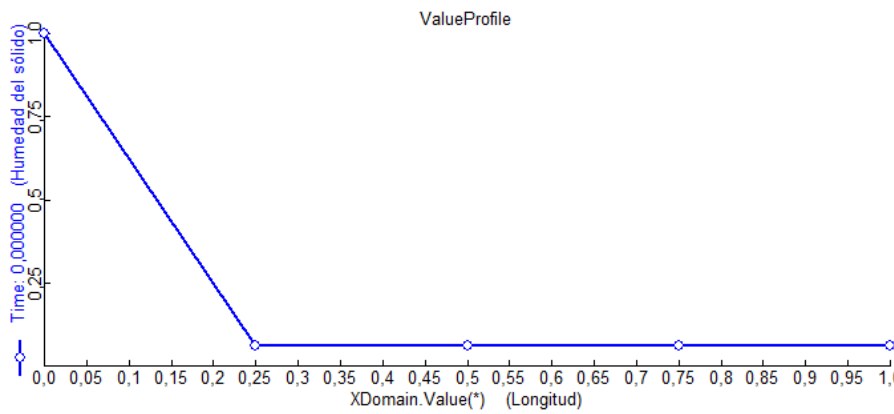
Gráfica 3. 10 Humedad del gas versus la longitud de la validación del modelo matemático



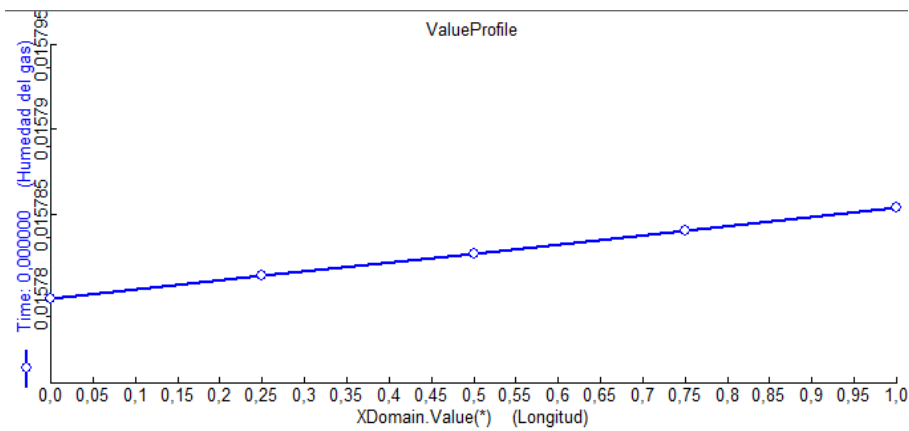
Gráfica 3. 11 Temperatura del sólido versus la longitud de la validación del modelo matemático



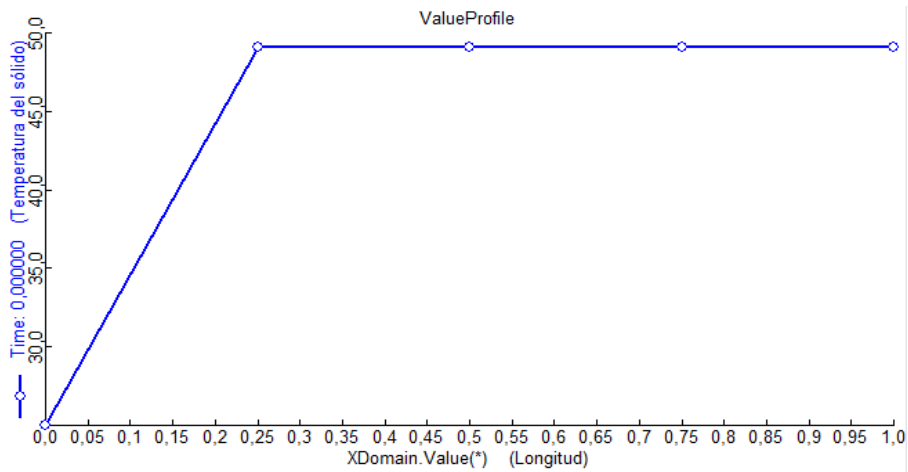
Gráfica 3. 12 Temperatura del gas versus la longitud de la validación del modelo matemático



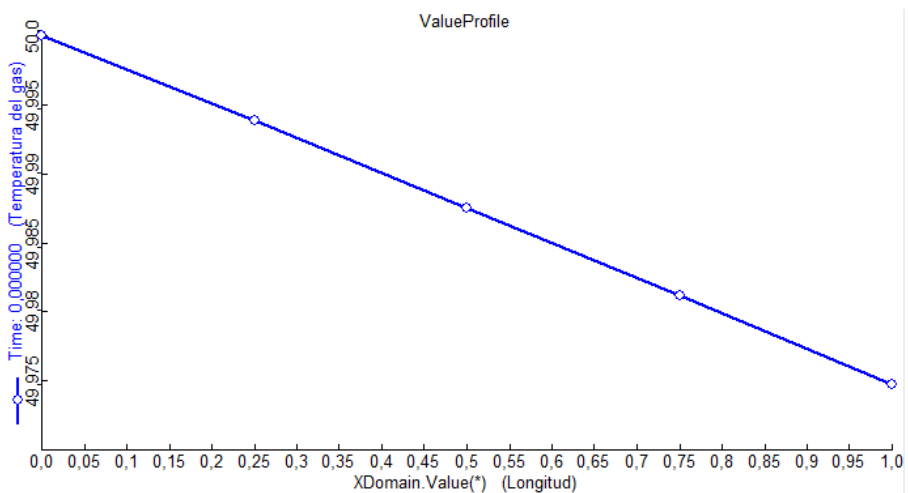
Gráfica 3. 13 Humedad del sólido versus la longitud de la validación del modelo matemático



Gráfica 3. 14 Humedad del gas versus la longitud de la validación del modelo matemático



Gráfica 3. 15 Temperatura del sólido versus la longitud de la validación del modelo matemático



Gráfica 3. 16 Temperatura del gas versus la longitud de la validación del modelo matemático

3.3 Resultados y análisis con datos de la bebida nutracéutica en Python y ACM

Se implementó el modelo matemático ya realizado en el punto anterior, adaptado a la bebida nutracéutica, luego se realizó una recopilación de datos, la información se plasmó en la siguiente tabla

Tabla 3. 2 Datos usados en el modelo matemático para el secador de bandejas por lotes de la bebida nutracéutica

Parámetros	Estimación de parámetros	Método de medición
agua	Sacado del libro de Cengel $\rho_{agua} = 989.8 \text{ kg/m}^3$	(Cengel, 2012)

Viscosidad del agua μ	Sacado del repositorio de la Universidad Técnica Nacional de Argentina $\mu = 0.599 \times 10^{-3} \text{ N*s/m}^2$	(Norte, 2010)
Viscosidad del agua ν	Sacado del repositorio de la Universidad Técnica Nacional de Argentina $\nu = 0.605 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	(Norte, 2010)
Ancho de la bandeja	Sacado del artículo científico de Patricia Manzano Ancho = 0.51 m	(Ivan Chóez, 2021)
Área de la bandeja A	Se calculó de la siguiente forma $A = \text{ancho} * \text{longitud}$ $A = 0.3876$	
Flujo de aire por unidad de área G	Se halló de la siguiente forma $G = G_s / A$ $G = 0.5 \text{ kg/m}^2 * \text{s}$	
Capacidad calorífica del agua C_p	Sacado del libro de Cengel $C_p = 4.18 \text{ kJ/kg} * \text{°C}$	(Cengel, 2012)
Conductividad térmica del agua k	Sacado del libro de Cengel $k = 0.637 \text{ W/m} * \text{°C} - 0.000637 \text{ Kw/m}^2 * \text{°C}$	(Cengel, Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones , 2006)
Difusividad del agua en el aire D_{ab}	Sacado del libro de Welty $D_{ab} = 3.01 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	(Welty, 1969)
Peso molecular del aire M_a	Sacado del libro de Felder $M_a = 28.9 \text{ kg/kmol}$	(Felder, 2004)
P_{bm}	Los datos fueron sacados del libro de Cengel Presión de vapor de agua $P_{vapag} = 2.33 \text{ kpa}$ $P_{aire} = 101.325$ $P_{bm} = P_{vapag} + P_{aire}$ $P_{bm} = 103.66$	(Cengel, Termodinámica, 2012)
Kg coeficiente de transferencia de masa	Con las siguientes ecuaciones: $j_m = 2.25 * Re^{-0.501}$	(Bradshaw, 1963)

	$j_m = \frac{kg * P_{BM} * M_a}{G} * \left(\frac{\mu}{\rho * D_v}\right)^{\frac{2}{3}}$ $kg = 4.78 \times 10^{-3} \frac{kg}{m^2 * s * kpa}$	
A1	16.3872	(Ness, 1995)
B1	3885.70	(Ness, 1995)
C1	230.170	(Ness, 1995)
Pws presión de saturación del agua	<p>Se determinó mediante la ecuación de Antoine</p> $P_{WS} = e^{A1 - (B1/(T(^{\circ}C) + C1))}$ <p>Donde A1, B1 y C1 son constantes de la ecuación T(^{\circ}C) es la temperatura del sólido</p>	(Ness, 1995)
Pw ∞	<p>Se determinó mediante la ecuación de Antoine</p> $P_{W\infty} = e^{A1 - (B1/(T(^{\circ}C) + C1))}$ <p>Donde A1, B1 y C1 son constantes de la ecuación T(^{\circ}C) es la temperatura del gas</p>	(Ness, 1995)
hg coeficiente de transferencia de calor convectivo	<p>Se determinó mediante las siguientes ecuaciones</p> $\frac{j_h}{j_m} = 1.12$ $j_h = 2.733$ $j_h = \frac{h}{G * C_p} * \left(\frac{C_p * \mu}{k}\right)^{\frac{2}{3}}$ <p>hg= 1.99 kw/m2*$^{\circ}$C</p>	(Bradshaw, 1963)
pa densidad del aire	<p>Sacado de la tabla termodinámica</p> <p>1.109 kg/m3</p>	(Cengel, Termodinámica, 2012)
ps densidad del sólido seco	132.73 kg/m3	

Cpha calor del aire húmedo	Sacado de tablas termodinámicas 1.006 kJ/kg*°C	(Cengel, Termodinámica, 2012)
Lc espesor del sólido	0.003 m	
ΔHw calor de vaporización	Sacado de tablas termodinámicas 2394 kJ/kg	(Cengel, Termodinámica, 2012)
V volumen real del sólido	Usamos la siguiente fórmula $V = \frac{4}{3} \pi * r^3$ D=800 um r=0.0004 V=2.68x10 ⁻¹⁰ m3	
V1o volumen de lecho inicial	Usamos la siguiente fórmula V1o=V*cantidad de sólido V1o=V*60 V1o=1.61x10 ⁻⁸	
avo área de la partícula/ volumen inicial	Usamos la siguiente fórmula avo=A/V $A = 4 * \pi * r^2$ A=2.01x10 ⁻⁶ avo=7500	
Gs flujo de aire	0.194 kg/s	(Gabela, 2021)
Lo longitud del lecho inicial	0.85 m	(Abad, 2021)
S área de sección transversal	Se calcula así S=V/(1-εo) S=4.47x10 ⁻¹⁰	
pso densidad inicial del sólido	464.7 kg/m3	
εo porosidad inicial	0.4	

Bio Número de Biot	Se halla de la siguiente forma $\text{Bio} = (h_g \cdot L_c) / k_{\text{sólido}}$ $\text{Bio} = 21.23$ Donde $k_{\text{sólido}} = 0.000325 \text{ kw/m}^\circ\text{C}$ $L_c = 0.003 \text{ m}$	
Condición inicial para x	$x = 0.6$	(Gabela, 2021)
Condición inicial para y	$y = 0.01578$	(Ratti, Modeling of Batch Dryers for Shrinkable Biological Materials, 2008)
Condición inicial para Ts	$T_s = 25^\circ\text{C}$	
Condición inicial para Tg	$T_g = 45^\circ\text{C}$	(Gabela, 2021)
ys	$y_s = 0.48$	
Función para la condición inicial de y	$(y_s - y_0) \cdot (2 - X) \cdot X + y_0$	
Función para la condición inicial de Tg	$T_{g0} \cdot \exp(-X \cdot \log(T_{g0} / T_{s0}))$	

Una vez llenada la tabla anterior, se procedió a ingresar los datos en el modelo matemático, ya realizado en Python, con lo cual se obtuvieron las gráficas desde la 3.17 hasta la 3.24.

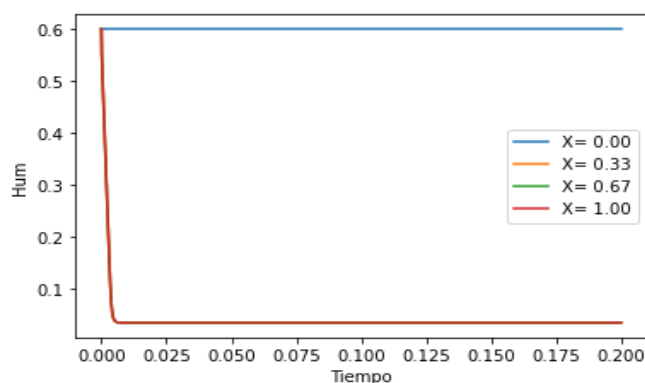
Se visualiza que con los datos de la bebida, las gráficas sufren grandes cambios, en la 3.17, la humedad va disminuyendo respecto al tiempo, lo cual es correcto pero la forma en la que disminuye es abrupta, ya que en el tiempo 0.01, indica que el sólido ya está seco.

En la gráfica 3.18 sucede lo mismo, ya que la humedad del gas disminuye respecto al tiempo, cuando en realidad debe aumentar, pero esto se debe a lo mencionado anteriormente que se mencionó en el anterior punto, es decir, que la función que describe la condición inicial de y, no es la adecuada y también debido a que los datos fueron obtenidos de varias fuentes, sin embargo, en esta gráfica, también se da un cambio grande, ya que en el tiempo 0, la humedad disminuye en su totalidad.

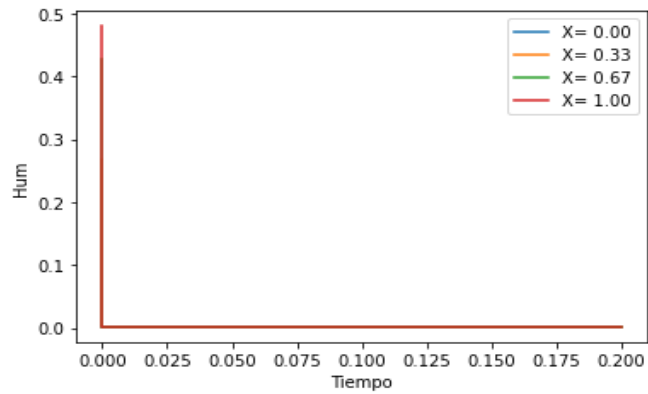
En la gráfica 3.19, en cambio, se da una baja de temperatura y luego sube respecto al tiempo, pero así como en las otras gráficas, sube de forma rápida en el tiempo 0.01 aproximadamente y luego de ello permanece constante en todo el tiempo.

Por último la gráfica 3.20, que muestra la temperatura del aire respecto al tiempo, tuvo un resultados similar a la gráfica 3.19, la diferencia radica en que en esta, no existe la baja de temperatura, esta gráfica sube a 50°C en el tiempo 0, lo cual también es un cambio extraño.

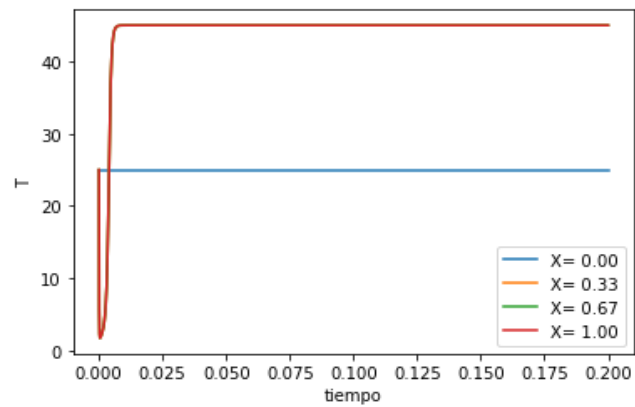
En todas las gráficas surgieron cambios abruptos respecto al tiempo, existen varias razones por las cuales se dan estos cambios, una de ellas es la toma de datos de diferentes fuentes bibliográficas, debido a que en el artículo guía, no indican varios datos y tampoco de donde toman los datos que no están presentes en el mismo, otra de las razones es que, por debido a la falta de condiciones iniciales en el artículo, se opto por realizar dos funciones, que describan las condiciones iniciales de y y de T_g y para x y T_s se tomaron valores fijos, sin embargo, las dos condiciones que son funciones están sujetas a error, ya que fueron supuestas, por lo cual, valdría realizar experimentación para las condiciones de T_g y y , con el fin de hallar dos funciones óptimas que se adecuen a las variables mencionadas.



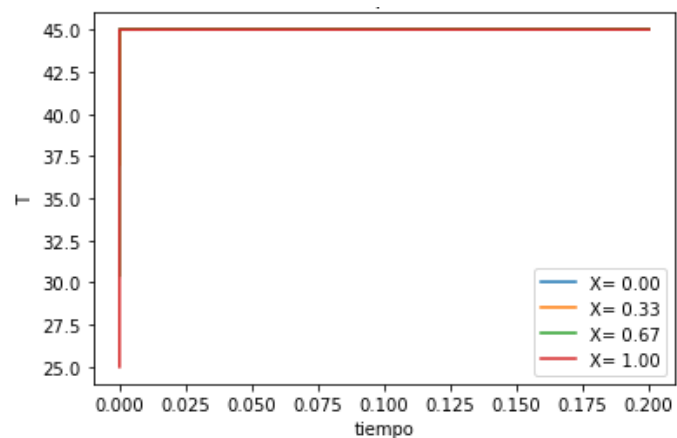
Gráfica 3. 17 Humedad del sólido versus el tiempo para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.



Gráfica 3. 18 Humedad del gas versus el tiempo para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.



Gráfica 3. 19 Temperatura del sólido versus el tiempo para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.



Gráfica 3. 20 Temperatura del gas versus el tiempo para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.

Comparación de las gráficas realizadas respecto a la longitud en Python y ACM

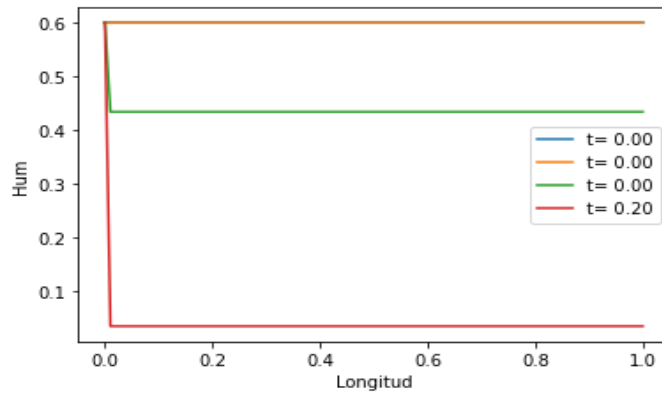
Como podemos ver las gráficas 3.21 y 3.25, la humedad del sólido respecto a la longitud del lecho va disminuyendo en ambos casos, es decir, tienen la tendencia correcta, pero existe un ligero cambio en la del ACM, ya que esta a partir de la longitud 0.13 permanece constante, en cambio en la del Python a partir de la longitud 0.01 permanece constante.

Esto también sucede con las gráficas 3.23 y 3.27, ya que, la temperatura del sólido aumenta respecto a la longitud en ambas gráficas, sin embargo, el punto a partir del cual permanece constante la temperatura, es distinto, ya que en la 3.23 es constante en la longitud 0.03, en cambio la 3.27 se vuelve constante a partir del valor 0.13 de longitud, pero en ambos casos las gráficas tienen la misma tendencia, por lo cual ambas son correctas.

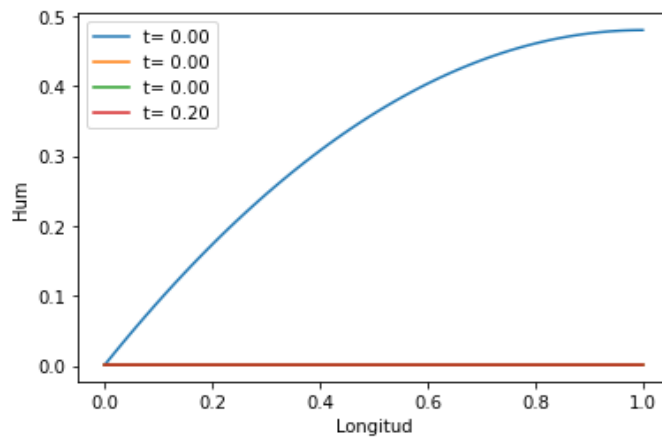
Es importante resaltar que, en los dos casos descritos anteriormente la ligera diferencia entre las gráficas, es normal ya que el método usado para resolver el sistema PDE, es distinto en ambos programas.

En las gráficas 3.22 y 3.26, la humedad del gas respecto a la longitud permanece constante en ambos casos, es decir que las gráficas son correctas, lo mismo sucede con las gráficas 3.24 y 3.28, ya que la temperatura del gas sigue una tendencia constante en ambas gráficas.

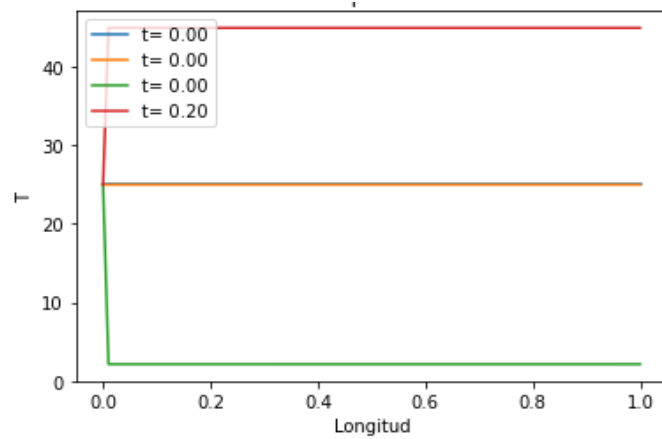
Esta comparación es importante, porque demuestra ya que muestra si el código reproducido que estamos reproduciendo en ACM es correcto, ya que al ser un lenguaje de programación nuevo, se corre peligro de que haya equivocación, en cuanto a la codificación para la resolución del sistema PDE. En cambio, en Python se tiene la certeza de que la codificación es la correcta, debido a que se tiene conocimiento previo de este lenguaje. Y, como la comparación entre ambas gráficas son bastante similares, esto indica que los resultados obtenidos en ACM y Python, son los correctos.



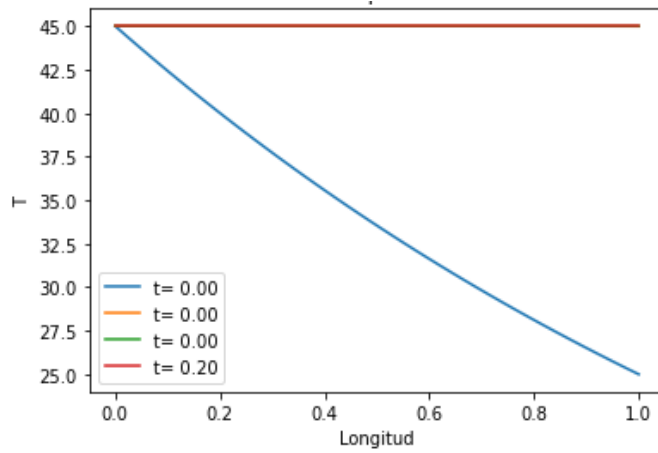
Gráfica 3. 21 Humedad del sólido versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.



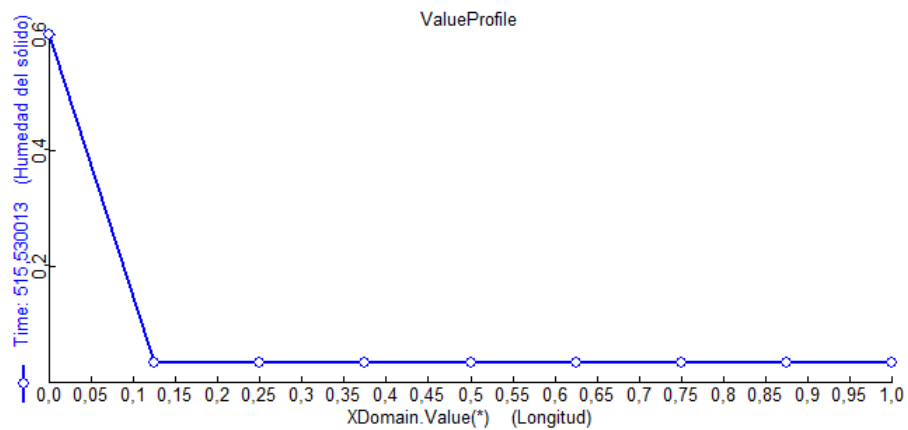
Gráfica 3. 22 Humedad del gas versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.



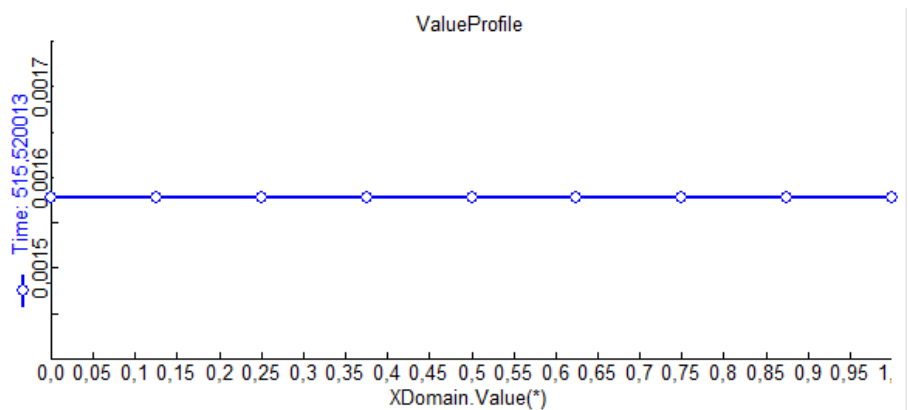
Gráfica 3. 23 Temperatura del sólido versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.



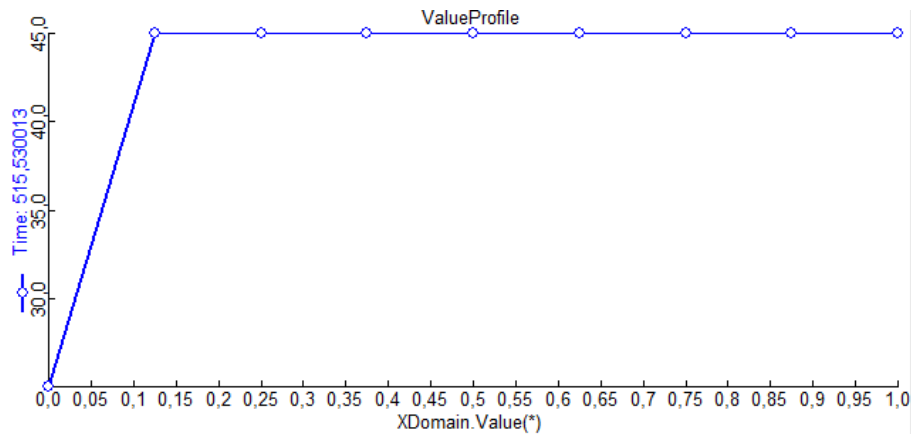
Gráfica 3. 24 Temperatura del gas versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.



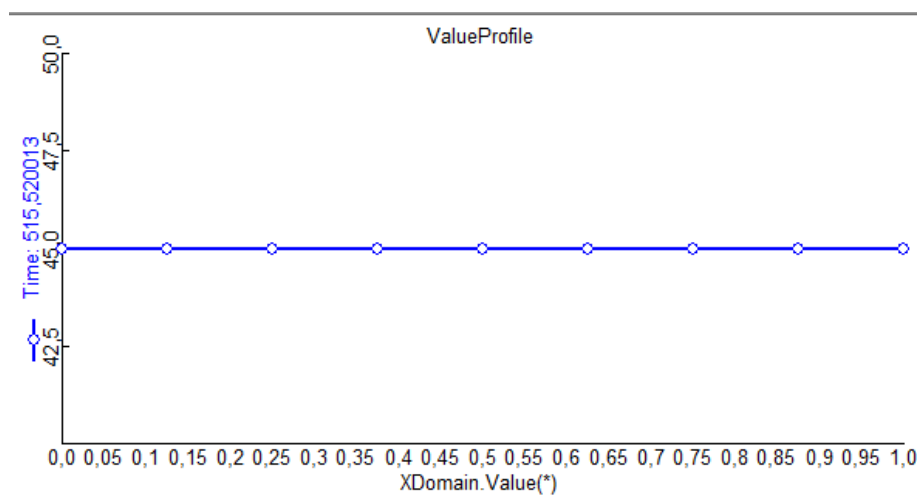
Gráfica 3. 25 Humedad del sólido versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.



Gráfica 3. 26 Humedad del gas versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.



Gráfica 3. 27 Temperatura del sólido versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.



Gráfica 3. 28 Temperatura del gas versus la longitud para el modelo con datos de la bebida nutracéutica.

Es importante mencionar que se tuvieron varias limitaciones al implementar el modelo matemático tanto a Python como al ACM, las principales fueron: la dispersión y falta de información del artículo guía, ya que se usaron varias fuentes bibliográficas para completar los datos necesarios del modelo, la falta de condiciones iniciales para las 4 incógnitas, por lo cual se necesita realizar experimentación con el fin de determinar las condiciones iniciales y las funciones que describen las condiciones iniciales para y y T_g óptimas para el modelo, ya que las funciones que se tienen para ambas incógnitas son supuestas, es decir pueden no ser las más adecuadas para el modelo.

A pesar de las limitaciones, hemos observado que el modelo es válido e ingresando los parámetros adecuados, funcionará correctamente proporcionando resultados más exactos del comportamiento del secador de bandejas por lotes.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se eligió un modelo matemático para el secador de bandejas por lotes que cumple con el uso de los fenómenos de transporte de masa y de calor, determinados por balances de materia y energía donde se considera también la contracción de la sustancia a secarse, lo cual viene establecida por una coordenada espacial.
- Gracias al modelo matemático, compuesto por ecuaciones diferenciales parciales, se obtuvieron las variaciones de la humedad y temperatura del aire, así como también de la humedad y temperatura del sólido a secar respecto al tiempo y a la coordenada espacial.
- Para la resolución del modelo matemático, se empleó el método de líneas, el cual se realizó como una semi discretización, en donde la parte discretizada fue la derivada que comprende la contracción del alimento.
- El algoritmo computacional, se estructuró a través de la función de método de líneas en donde constan las ecuaciones adicionales al modelo, las ecuaciones del modelo; la función exterior del secador en donde se ingresaron las condiciones iniciales y finalmente los parámetros definidos previamente, necesarios para la resolución de las funciones.
- Durante la validación del modelo seleccionado a través de la ejecución del algoritmo en Python y la comparación de los resultados obtenidos, las tendencias de las gráficas obtenidas fueron semejante, sin embargo, los datos en las gráficas no fueron equiparables.
- Los resultados del modelo matemático, previamente validado, con los datos de la bebida nutracéutica no fueron los esperados, ya que la tendencia de la curva de humedad del sólido tuvo un cambio considerable que no refleja la realidad, es decir los tiempos de secado o de variación de humedad del sólido en el tiempo, no se acercan a los datos obtenidos en ensayos de laboratorio conocidos de estudios previos.

- Se consiguió transferir el algoritmo computacional creado al software Aspen Custom Modeler, donde se verificó los resultados mediante la comparación de las gráficas resultantes de las variables del modelo respecto a la coordenada espacial.
- A pesar de no obtener gráficas cercanas a la realidad del proceso de secado estos resultados servirán como base para continuar mejorando el módulo añadido, hasta conseguir la implementación completa del mismo.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda la revisión de las condiciones iniciales del secado, así como de las dos funciones que se supusieron para las mismas y así tener mejores resultados del modelo, ajustado a los datos del equipo de interés.
- Investigar a fondo el uso del ACM, con el fin de realizar la conexión de la unidad añadida por el usuario con el simulador comercial y de mejorar la codificación del módulo.
- Revisar los datos usados en el modelo, con el fin de localizar los que más le afecten e investigar los mismos, para que se ajusten mejor al modelo y obtener resultados óptimos.

BIBLIOGRAFÍA

5. BIBLIOGRAFÍA

Abad Adrián, P. J. (2021). *Escalamiento de un proceso para la elaboración de una bebida con propiedades nutraceuticas a escala piloto utilizando como materia prima Vernonanthurra patens, Ilex guayusa y residuos de cacao.*

Angulo, W. (2021). *Modelo sintético para la presión de vapor.* Guayaquil: ESPOL.

Bradshaw, R. D. (1963). Heat and Mass Transfer in Fixed and Fluidized Beds of Large Particles. *A.I.C.H.E.*, 590 - 595.

Buitrago, G. (2004). Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. *Scielo* , 103 - 110.

Cárdenas, A. (Julio de 2005). *Repositorio Universidad Regional Autónoma de los Andes.* Obtenido de Repositorio Universidad Regional Autónoma de los Andes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22170/u262181.pdf?sequence=1>

Cengel, Y. (2012). Termodinámica. En Y. Cengel, *Termodinámica* (págs. 907 - 997). México : McGraw - Hill.

Cuevas, M. (2010). Simulación de prácticas de laboratorio de la asignatura "Experimentación en Ingeniería Química" mediante el uso del simulador de procesos Hysys.Plant. *Universidad de Jaén*, 1 - 5.

Claus Reimers. (2018). *Use Advanced Simulation to Improve Processes Involving Solids.*

Dagde, K., & Nmegbu, G. (2014). Mathematical Modeling of a Tray Dryer for the Drying of Potato Chips Using Hot Air Medium. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, 3, 104–107. <https://doi.org/10.13140/2.1.3257.1522>

Egbuna, C., Tupas, G., Onyekere, P., Akram, M., Olatunde, A., Gupta, E., Ezzat, S., Munir, N., Daniyal, M., & Găman, M.-A. (2020). *Functional Foods and Nutraceuticals*.

Gabela, Erick, and Pablo Villa. 2021. “Caracterización de Las Materias Primas Vernonanthura Patens, Ilex Guayusa y Residuos de Cáscara de Cacao En Un Simulador Comercial Para La Elaboración de Una Bebida Con Propiedades Nutracéuticas.” Guayaquil.

Grupos de investigación Kishurim, T. T. (2013). El Modelamiento Matemático en la Formación del Ingeniero . En T. T. Grupos de investigación Kishurim, *El Modelamiento Matemático en la Formación del Ingeniero* (págs. 38 - 160). Colombia : Fundación Universidad Central .

Ivan Chóez, R. V. (2021). Effect of solvent-solvent partition on antioxidant activity and GC-MS profile of Ilex guayusa Loes. *Natural Product Research*, 6.

Manzano Santana, Patricia, María Quijano-Avilés, Iván Choez-Guaranda, Ana Barragán Lucas, Rafael Viteri Espinoza, Daysi Martínez, Cinthia Camacho, and Migdalia Miranda Martínez. 2018. “Effect of Drying Methods on Physical and Chemical Properties of Ilex Guayusa Leaves.” *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 71(3). doi: 10.15446/rfnam.v71n3.71667.

Martínez, J. (2018). SIMULADORES DE PROCESOS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA . *Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería* , 1 - 7.

Martínez, M. (2016). Algunos parámetros farmacognósticos de Vernonanthura patens. *Endémica de Ecuador*.

Kemp, Ian, Nicholas Hallas, and David Oakley. 2004. "Developments in Aspen Technology Drying Software." Proceeding's 14th International Drying Symposium, Brazil.

Perry, R. (2001). *Manual del Ingeniero Químico* . Buenos Aires: McGraw - Hill.

Rakicka-Pustułka, M., Mirończuk, A. M., Celińska, E., Białas, W., & Rymowicz, W. (2020). Scale-up of the erythritol production technology – Process simulation and techno-economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120533.

Ratti, C. (1994). Shrinkage During Drying of Foodstuffs . *Elsevier* , 91 - 104.

Ratti, C. (1995). Determination of heat transfer coefficients during drying . *Journal of Food Process Engineering* , 41 - 53.

Ratti, C. (2008). Modeling of Batch Dryers for Shrinkable Biological Materials. *Springer Science* , 248 - 256.

Robles, M. G. (1986). *Repositorio Universidad de Sonora (Tesis)*. Obtenido de Repositorio Universidad de Sonora (Tesis): <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/5637/Capitulo1.pdf>

Salgado, C. (2009). EXPERIENCIA EN LA INTEGRACIÓN DE PROCESOS EN LA INDUSTRIA PAPELERA, UTILIZANDO EL ASPEN PLUS. *Tecnología Química* , 70 - 80.

Sienko, M. (2009). *Fundamentos de Termodinámica* . México : Reverté.

Sifuentes, V. H. (2003). Simulación de Procesos en Ingeniería Química. En V. H. Sifuentes, *Simulación de Procesos en Ingeniería Química* (págs. 30 - 35).

Tapia, C. (2015). “*APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES, CASCARILLA DE CACAO (Theobroma cacao L.) VARIEDAD ARRIBA Y CCN51 PARA LA ELABORACIÓN DE UNA INFUSIÓN*”. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11981/1/AL%20574.pdf>

Trujillo, L. (2014). Diseño de una intervención docente para la enseñanza-aprendizaje de operaciones básicas de ingeniería química mediante el uso de la simulación por ordenador. *Afinidad*, 101 - 107.

APÉNDICES

```
9 import numpy as np
10 import matplotlib.pyplot as plt
11 from secsolve import dryer_mol
12
13 ##### Condiciones iniciales
14 x00 = 0.6 #x
15 y0 = 0.001578 #y
16 Ts0 = 25.#0.21333 #Ts
17 Tg0 = 45.#-0.83076 #Tg
18 ##### Longitud total del secador
19 Xtotal = 1.#0.4
20 ##### Parámetros físicos
21 kg = (0.00478 * 60.)*28.9 # coeficiente de transferencia de masa en kg/m2*s*kpa
22 Al=16.3872#6.53247#16.54
23 Bl=3885.70#3985.439#39.85
24 Ccl=230.170
25 h = 1.99*60#0.00325*60#*****0.0718 * 60. # coeficiente de transferencia de calor convectivo en kw/m2*C
26 pa = 1.109 #1.092 # densidad del aire en kg/m3
27 ps = 132.73 #530 # densidad del sólido en kg/m3
28 Cpha = 1.006 # calor del aire húmedo en kj/kg*C
29 k = 0.0005641 * 60. # conductividad térmica de la papa en kw/m*C
30 Lc = 0.05 # espesor de la papa en m
31 delta_Hw = 2394#2382 # calor de vaporización en kj/kg
32 V =0.00000000268 #0.00000392 # volumen real en m3
33 V1o = 1.61*10**-8#0.000549 # volumen de lecho inicial en m3
34 avo = 7500#200. # área de la partícula/ volumen inicial (rodaja de papa) en m-1
35 c1 = 0.0267 # constante adimensional
36 c3 = -1.656 # constante adimensional
37 q1 = 0.0107 # constante adimensional
38 q2 = 1.287 # constante adimensional
39 q3 = -1.513 # constante adimensional
40 A = 1.612 # constante adimensional
41 B = 3.114 # constante adimensional
42 Ce = 2.175 # constante adimensional
43 D = -3.194 # constante adimensional
44 E = 3.661 # constante adimensional
45 F = -1.661 # constante adimensional
46 G = 0.339 # constante adimensional
47 H = 1.246 # constante adimensional
48 J = -1.385 # constante adimensional
49 K = 0.792 # constante adimensional
50 Bio = 21.23#0.291#número de Biot
```

```

51 Gs = 0.194*60#0.0183 * 60. # flujo de aire kg/s
52 Lo = 0.85#0.035 # longitud del lecho inicial en m
53 S = 4.47*10**10#0.07625 # área de sección transversal
54 pso = 467.4#500. # densidad del sólido inicial
55 eo = 0.4 # porosidad inicial
56 sigma=1.
57
58 ys = 0.48 #0.6#0.015 #Ye=0.5838*****
59
60 ##### INTERVALO DE TIEMPO
61 t0 = 0.
62 tf = 0.2
63
64 ##### NÚMERO DE PUNTOS PARA DISCRETIZAR LA LONGITUD DEL SECADOR EN %%%%%%%%%%
65 N = 100
66
67 ##### ELEMENTOS DE LONGITUD DISCRETIZADA, EN FORMA DE COLUMNA %%%%%%%%%%
68 X = np.linspace(0.,Xtotal,N)
69
70 # Funcion de la condición inicial de y
71 def initial_y(x):
72     return (ys-y0)*(2.-X)*X+y0#(y0-ys)*(2.-X)*X+y0
73 # Funcion de la condición inicial de Tg
74 def initial_Tg(x):
75     return Tg0 * np.exp(-X * np.log(Tg0 / Ts0)) #Tg0*np.exp(-X*np.log(Tg0/Ts0)) #(Ts0-Tg0)*(2-Ag)*Ag+Tg0
76
77 ##### CONDICIONES INICIALES SOBRE TODO PUNTO ESPACIAL %%%%%%%%%%
78 initx = x00*np.ones((N,))
79
80 inity = initial_y(X)
81
82 initTs = Ts0*np.ones((N,))
83
84 initTg = initial_Tg(X)
85
86
87 ##### Intervalo de tiempo de la simulación %%%%%%%%%%
88 tspan = [t0,tf]
89
90 ##### Solución del modelo usando el método de las líneas %%%%%%%%%%
91 args =(kg,A1, B1, Cc1, sigma, Ts0, h, pa, ps, Cpha, k, Lc, delta_Hw,
92 V, V1o, avo, c1, c3, q1, q2, q3, A, B, Ce, D, E, F, G, H,
93 J, K, pso,Gs, eo, Lo, Bio, S, x00)
94 t, xn, y, Ts,Tg = dryer_mol(X, tspan, initx, inity, initTs, initTg, args=args )
95
96 ##### Temperatura del sólido %%%%%%%%%%
97 T_S =Ts
98
99 ##### Temperatura del gas %%%%%%%%%%
100 T_G = Tg
101
102 ##### PLOTs profile in time for some space
103 nt1 = int(N/3) # first third
104 nt2 = int(2*N/3) # second third
105
106 plt.plot(t, xn[0,:], t, xn[nt1, :], t, xn[nt2, :], t, xn[-1, :])
107 plt.title('Gráfica de Humedad del Sólido')
108 plt.ylabel('Hum')
109 plt.xlabel('Tiempo')
110 plt.legend(['X= {:.2f}'.format(X[0]), 'X= {:.2f}'.format(X[nt1]),
111 'X= {:.2f}'.format(X[nt2]),'X= {:.2f}'.format(X[-1])])
112 plt.show()
113
114 plt.plot(t, y[0,:], t, y[nt1, :], t, y[nt2, :], t, y[-1, :])
115 plt.title('Gráfica de Humedad del Gas')
116 plt.ylabel('Hum')
117 plt.xlabel('Tiempo')
118 plt.legend(['X= {:.2f}'.format(X[0]), 'X= {:.2f}'.format(X[nt1]),
119 'X= {:.2f}'.format(X[nt2]),'X= {:.2f}'.format(X[-1])])
120 plt.show()
121
122 plt.plot(t, T_S[0,:], t, T_S[nt1,:], t, T_S[nt2,:], t, T_S[-1,:])
123 plt.title('Gráfica de Temperatura del Sólido')
124 plt.ylabel('T')
125 plt.xlabel('tiempo')
126 plt.legend(['X= {:.2f}'.format(X[0]), 'X= {:.2f}'.format(X[nt1]),
127 'X= {:.2f}'.format(X[nt2]),'X= {:.2f}'.format(X[-1])])
128 plt.show()
129
130 plt.plot(t, T_G[0,:], t, T_G[nt1,:], t, T_G[nt2,:], t, T_G[-1,:])
131 plt.title('Gráfica de Temperatura del Gas')
132 plt.ylabel('T')
133 plt.xlabel('tiempo')
134 plt.legend(['X= {:.2f}'.format(X[0]), 'X= {:.2f}'.format(X[nt1]),
135 'X= {:.2f}'.format(X[nt2]),'X= {:.2f}'.format(X[-1])])

```

```

138 ##### PLOTS profile in space for some time
139 ntime = len(t)
140 nt1 = int(ntime/3) # first third
141 nt2 = int(2*ntime/3) # second third
142
143 plt.plot(X, xn[:,0], X, xn[:, nt1], X, xn[:, nt2], X, xn[:, -1])
144 plt.title('Gráfica de Humedad del Sólido')
145 plt.ylabel('Hum')
146 plt.xlabel('Longitud')
147 plt.legend(['t= {:.2f}'.format(t[0]), 't= {:.2f}'.format(t[nt1]),
148           't= {:.2f}'.format(t[nt2]), 't= {:.2f}'.format(t[-1])])
149 plt.show()
150
151 plt.plot(X, y[:,0], X, y[:, nt1], X, y[:, nt2], X, y[:, -1])
152 plt.title('Gráfica de Humedad del Gas')
153 plt.ylabel('Hum')
154 plt.xlabel('Longitud')
155 plt.legend(['t= {:.2f}'.format(t[0]), 't= {:.2f}'.format(t[nt1]),
156           't= {:.2f}'.format(t[nt2]), 't= {:.2f}'.format(t[-1])])
157 plt.show()
158
159 plt.plot(X, T_S[:,0], X, T_S[:, nt1], X, T_S[:, nt2], X, T_S[:, -1])
160 plt.title('Gráfica de Temperatura del Sólido')
161 plt.ylabel('T')
162 plt.xlabel('Longitud')
163 plt.legend(['t= {:.2f}'.format(t[0]), 't= {:.2f}'.format(t[nt1]),
164           't= {:.2f}'.format(t[nt2]), 't= {:.2f}'.format(t[-1])])
165 plt.show()
166
167 plt.plot(X, T_G[:,0], X, T_G[:, nt1], X, T_G[:, nt2], X, T_G[:, -1])
168 plt.title('Gráfica de Temperatura del Gas')
169 plt.ylabel('T')
170 plt.xlabel('Longitud')
171 plt.legend(['t= {:.2f}'.format(t[0]), 't= {:.2f}'.format(t[nt1]),
172           't= {:.2f}'.format(t[nt2]), 't= {:.2f}'.format(t[-1])])
173 plt.show()
174

```

```

9 import numpy as np
10 from scipy.integrate import solve_ivp
11
12 Tfactor = 1000. / (60. ** 2)
13 h_relativ=0.033
14 def dryer_mol(X, tspan, initx, inity, initTs, initTg, args):
15     def method_of_lines( t, C ):
16
17         dCdt = np.zeros((N4,))
18         ### Orden de las variables en C=[x, y, Ts, Tg]
19         # dfx = np.diff( C[0:N1] )
20         dfy = np.diff( C[N1:N2] )
21         # dfTs = np.diff( C[N2:N3] )
22         dfTg = np.diff( C[N3:] )
23         dfX = np.diff(X)     ### Delta space
24
25         x_inner = C[1:N1]
26         x0 = x_inner/x00
27         x02 = x0**2
28         x03 = x0**3
29         Ts_inner = C[N2+1:N3]
30         Tg_inner = C[N3+1:]
31
32         aux1 = q1*np.exp( -q2*x_inner )*( x_inner**q3 )
33         pws=np.exp(A1-(B1/((Ts_inner)+Cc1)))
34         pwinf=h_relativ*np.exp(A1-(B1/((Tg_inner)+Cc1)))
35         aw=np.exp( -c1 *( x_inner**c3 ) + aux1*np.log(pws) )
36         prueb=(aw*pws-pwinf)
37
38         delta_Hs = ( 1 + aux1 )*delta_Hw
39         Cphs = A + B * ( x_inner / (1. + x_inner) )
40         av = ( Ce + D*x0 + E*x02 + F*x03 )** avo          #*Obs: ec. depende de x0
41         e = 1 - ( V/( ( G + H * x0 + J * x02 + K*x03 )*V1o ) ) #*Obs: ec. depende de x0
42         fi = 0.00532*( x0**(-1.079) )
43         nw = kg * ( aw*pws - pwinf )/( 1. + (fi / x00 )*Bio )
44
45         dCdt[0:N1] = np.concatenate(( [0.], #x no cambia con el tiempo, en la entrada del secador
46                                     -nw*av/ps
47                                     ))
48

```

```

48
49     dCdt[N1:N2] = np.concatenate(([0.], #y no cambia con el tiempo, en la entrada del secador
50         ((nw * av * (1 - e)) / (pa * e)) - ((Gs*ps*(1-e))/(S*Lo*pa*e*pso*(1-eo))*(dfy/dfX))
51     ))
52
53     dCdt[N2:N3] = np.concatenate(( [0.], #Ts no cambia con el tiempo, en la entrada del secador
54         ( av/( ps*( 1. + x_inner ) * Cphs ) ) *
55         ( h*( Tg_inner - Ts_inner ) - nw*delta_Hs )
56     ))
57
58     #print(dCdt[N2:N3])
59     dCdt[N3:] = np.concatenate(([0.], #Tg no cambia con el tiempo, en la entrada del secador
60         -(((h*av*(1-e))/(pa*e*Cpha))*( Tg_inner-Ts_inner))-((1*Gs*(ps*(1-e))/(S*Lo*pa*e*pso*(1-eo)))
61         *(dfTg/dfX)
62     ))
63     return dCdt
64
65     kg,A1, B1, Cc1, sigma, Ts0 , h, pa, ps, Cpha, k, Lc, delta_Hw, V, V1o, avo, c1, c3, q1, q2, q3, A, B, Ce, D
66     , E, F, G, H, J, K, pso, Gs, eo, Lo, Bio, S, x00 = args
67
68     N = len(X)
69
70     N1 = N
71     N2 = 2*N
72     N3 = 3*N
73     N4 = 4*N
74     ### Orden de las variables en C=[x, y, Ts, Tg]
75     init = np.concatenate((initx, inity, initTs, initTg))
76
77     rtol = 1.E-8
78     atol = 1.E-8
79
80     sol = solve_ivp( method_of_lines, tspan, init, atol=atol, rtol=rtol, method='LSODA' )
81
82     t = sol.t[:]*#*****
83
84     xn = sol.y[ :N1 , :]
85     y = sol.y[ N1:N2 , :]
86     Ts = sol.y[ N2:N3 , :]
87     Tg = sol.y[ N3: , :]
88
89     return t, xn, y, Ts, Tg

```

Gráfica 3. 29 Algoritmo computacional realizado en el lenguaje de programación interpretado.

```

1  = Model batch_dryer
2      kg as RealVariable (spec:Fixed, 0.00478*60*28.9); //coeficiente de transferencia de masa
3      hg as RealVariable(spec:Fixed, 1.99*60); //coeficiente de transferencia de calor convectivo
4      pa as RealVariable (spec:Fixed, 1.109); //densidad del aire ***hecho
5      ps as RealVariable (spec:Fixed, 132.73); //densidad del sólido***hecho
6      Cpha as RealVariable (spec:Fixed, 1.006); //calor del aire húmedo ***hecho
7      delta_Hw as RealVariable (spec:Fixed, 2394);// ***hecho
8      V as RealVariable (spec:Fixed, 2.68*10^(-10)); //volumen real ***hecho
9      Vlo as RealVariable (spec:Fixed, 1.61*10^(-8)); //volumen del lecho inicial***hecho
10     avo as RealVariable (spec:Fixed, 7500);//área de la partícula/volumen inicial***hecho
11     Gs as RealVariable (spec:Fixed, 0.194*60);//flujo de aire***hecho
12     Lo as RealVariable (spec:Fixed, 0.85);//longitud de lecho inicial***hecho
13     S as RealVariable (spec:Fixed, 4.47*10^(-10));//área de sección transversal***hecho
14     pso as RealVariable (spec:Fixed, 464.7);//densidad inicial del sólido***hecho
15     eo as RealVariable (spec:Fixed, 0.4);//porosidad inicial***hecho
16     Bio as RealVariable (spec:Fixed, 21.23);//número de biot***hecho
17     cl as RealVariable (spec:Fixed, 0.0267);//constante adimensional
18     c3 as RealVariable (spec:Fixed, -1.656);//constante adimensional
19     ql as RealVariable (spec:Fixed, 0.0107);//constante adimensional
20     q2 as RealVariable (spec:Fixed, 1.287);//constante adimensional
21     q3 as RealVariable (spec:Fixed, -1.513);//constante adimensional
22     A as RealVariable (spec:Fixed, 1.612);//constante adimensional
23     B as RealVariable (spec:Fixed, 3.114);//constante adimensional
24     C as RealVariable (spec:Fixed, 2.175);//constante adimensional
25     D as RealVariable (spec:Fixed, -3.194);//constante adimensional
26     E as RealVariable (spec:Fixed, 3.661);//constante adimensional
27     F as RealVariable (spec:Fixed, -1.661);//constante adimensional
28     G as RealVariable (spec:Fixed, 0.339);//constante adimensional
29     H as RealVariable (spec:Fixed, 1.246);//constante adimensional
30     J as RealVariable (spec:Fixed, -1.385);//constante adimensional
31     K as RealVariable (spec:Fixed, 0.792);//constante adimensional
32     xo as RealVariable (spec:Fixed, 0.6);//constante adimensional
33     yo as RealVariable (spec:Fixed, 0.001578);//constante adimensional
34     Tso as RealVariable (spec:Fixed, 25);//constante adimensional
35     Tgo as RealVariable (spec:Fixed, 45);//constante adimensional
36     ys as RealVariable (spec:Fixed, 0.48);//humedad de saturación del aire
37     Al as RealVariable (spec:Fixed, 16.3872);
38     Bl as RealVariable (spec:Fixed, 3885.70);
39     Ccl as RealVariable (spec:Fixed, 230.170);
40     hum_rel as RealVariable (spec:Fixed, 0.033);
41
42     ///////////////Discretización
43     L as LengthDomain(Length: 1, DiscretizationMethod:"BFD2", HighestOrderDerivative:1, SpacingPreference: 1
44     x as Distribution1D(XDomain is L) of realvariable;
45     y as Distribution1D(XDomain is L) of realvariable;
46     Ts as Distribution1D(XDomain is L) of realvariable;
47     Tg as Distribution1D(XDomain is L) of realvariable;
48
49     Input1 as Input Main;
50     Output1 as Output Main;
51
52     x(0)=Input1.x;
53     y(0)=Input1.y;
54     Ts(0)=Input1.Ts;
55     Tg(0)=Input1.Tg;
56     Output1.x=x(L.EndNode);
57     Output1.y=y(L.EndNode);
58     Output1.Ts=Ts(L.EndNode);
59     Output1.Tg=Tg(L.EndNode);

```

```

75 = for j in [L.Interior + L.EndNode] do
76     //Sistema de ecuaciones diferenciales parciales
77     //Ecuación del balance de masa del sólido
78     $x(j) = -(((kg * ((exp(-c1 * x(j) ^ (c3) + (q1 * exp(-q2 * x(j)) * x(j) ^ (q3) * loge(exp(A1
79     - (Bl/((Ts(j) + Ccl)))))) * (exp(A1 - (Bl/((Ts(j) + Ccl)))) -
80     (hum_rel*exp(A1 - (Bl/((Tg(j) + Ccl)))))) / (1 + ((0.00532 *
81     ((x(j)/xo) ^ (-1.079))) / xo * Bio))) * ((C + D * (x(j)/xo) + E * (x(j)/xo) ^ (2)
82     + F * (x(j)/xo) ^ (3)) * avo) / ps;
83
84     //Ecuación del balance de masa del aire
85     $y(j) = (((kg * ((exp(-c1 * x(j) ^ (c3) + (q1 * exp(-q2 * x(j)) * x(j) ^ (q3)
86     * loge(exp(A1 - (Bl/((Ts(j) + Ccl)))))) * (exp(A1 - (Bl/((Ts(j) + Ccl))))
87     - (hum_rel*exp(A1 - (Bl/((Tg(j) + Ccl)))))) / (1 + ((0.00532 * ((x(j)/xo) ^ (-1.079)))
88     / xo) * Bio))) * ((C + D * (x(j)/xo) + E * (x(j)/xo) ^ (2) + F * (x(j)/xo) ^ (3)) * avo)
89     * (1 - (1 - (V / ((G + H * (x(j)/xo) + J * (x(j)/xo) ^ (2) + K * (x(j)/xo) ^ (3)) * Vlo))))))
90
91     //Ecuación de balance de energía del sólido
92     $Ts(j) = (((C + D * (x(j)/xo) + E * (x(j)/xo) ^ (2) + F * (x(j)/xo) ^ (3)) * avo) / (ps * (1 + x(j))
93     * (A + (B * (x(j) / (1 + x(j)))))) * ((hg * (Tg(j) - Ts(j))) - (((kg * ((exp(-c1
94     * x(j) ^ (c3) + (q1 * exp(-q2 * x(j)) * x(j) ^ (q3) * loge(exp(A1 - (Bl/((Ts(j) + Ccl))))))
95     * (exp(A1 - (Bl/((Ts(j) + Ccl)))) - (hum_rel*exp(A1 - (Bl/((Tg(j) + Ccl))))))
96     / (1 + ((0.00532 * ((x(j)/xo) ^ (-1.079))) / xo) * Bio))) * ((1 + (q1 * exp(-q2 * x(j)
97     * x(j) ^ (q3))) * delta_Hw)))));
98
99     //Ecuación del balance de energía del aire
100     $Tg(j) = -(((hg * ((C + D * (x(j)/xo) + E * (x(j)/xo) ^ (2) + F * (x(j)/xo) ^ (3)) * avo) *
101     (1 - (1 - (V / ((G + H * (x(j)/xo) + J * (x(j)/xo) ^ (2) + K * (x(j)/xo) ^ (3)) * Vlo))))))
102     / (pa * (1 - (V / ((G + H * (x(j)/xo) + J * (x(j)/xo) ^ (2) + K * (x(j)/xo) ^ (3)) * Vlo)))));
103 Endfor
104 //Condiciones de frontera
105 x(0)=xo;
106 y(0)=yo;
107 Ts(0)=Tso;
108 Tg(0)=Tgo;
109 //Condiciones iniciales
110 = For l in [L.Interior + L.EndNode] do
111     x(l): xo, initial;
112     y(l): (ys-yo)*(2-l)*1+yo, initial;
113     Ts(l):Tso, initial;
114     Tg(l):Tgo*EXP(-1*Loge(Tgo/Tso)), initial;
115 Endfor

```

Gráfica 3. 30 Algoritmo computacional realizado en el lenguaje de programación interpretado.