DOI: 10.24275/uama.6746.12556

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD AZCAPOTZALCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS

ÍDONEA COMUNICACIÓN DE RESULTADOS

"Estimación Paramétrica y Control del Proceso de Secado de Productos Agroindustriales en un Secador Híbrido Solar-Gas Tipo Túnel"

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería de Procesos

Presenta:

I.Q. MARIO SAMPEDRO CRUZ

Director de Tesis:
Dr. Francisco Beltrán Carbajal

Co-director de Tesis:
Dr. Jorge Ramírez Muñoz

Ciudad de México. Julio 2024

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada quiero agradecer a Dios, por darme salud para poder realizar y completar uno de los objetivos de vida que me había planteado.

También, esta etapa de mi vida no se hubiera podido realizar sin el apoyo de mis padres, el cual siempre ha sido incondicional. Muchas gracias por caminar conmigo en este proceso. Los quiero.

De igual manera, agradezco a mi hermana que siempre ha estado para apoyarme y sacarme de mi zona de confort con la finalidad de mejorar. Muchas gracias te quiero.

A mi abuelita Celia por preocuparse siempre por mi y por seguir apoyandome en todas mis aventuras. Te quiero.

A mis tíos y primos Gonzalo, Ivón, Gonza y Bony por siempre brindarme un consejo y por apoyarme. Los quiero.

A mis amigos de la maestría Dulce, Andy, Clara, Flor, Robert, Fede y Joel que hicieron de este, un proceso más ameno y divertido. Gracias por todos los buenos momentos juntos.

A mis amigos Andrés, David y Cintía por acobijarme durante mi estancia en la maestría y compartir conmigo grandes momentos. De igual manera, a mi amigo Daniel que siempre me dio consejos para mejorar.Gracias.

A mis asesores Dr. Francisco y Dr. Jorge por apoyarme, enseñarme, guiarme, por compartir su tiempo conmigo y exigirme a ser mejor cada día para lograr mi objetivo. Gracias.

A CONAHCYT por bridarme la oportunidad de participar en el programa de Becas de Posgrado.

RESUMEN

El secado se ha vuelto una de las alternativas más importante para aumentar la vida útil de los productos agroindustriales. Se han realizado estudios en los que se modela el proceso con la finalidad de diseñar controladores que permitan mejorarlo. Estos controladores cuentan con una serie de parámetros importantes que se requieren estimar.En esta idónea comunicación de resultados o tesis se abordan los temas de (1) la estimación paramétrica de la cinética de secado desde un enfoque algebraico en el dominio del tiempo, y (2) el control del proceso de secado utilizando planificación de trayectorias.

Para lograr la estimación se utilizó el marco teórico de identificación algebraica propuesta en 2003 por Fliess y Sira la cual no ha sido utilizada en el ámbito del secado. Mientras que, para el control del proceso se implementaron 3 controladores, un control no lineal basado en linealización por retroalimentación de estado, un control de 2 etapas y un control de modo deslizante.

En cuanto a los resultados obtenidos, en la estimación en línea de los parámetros de la cinética de secado se obtuvieron valores con errores menores al 1.5 % en tiempos de 0.2-10 min, permitiendo utilizarlos en el desarrollo de los controladores. Por su parte, la respuesta de los controladores ante el cambio de parámetros fue muy buena, demostrando una gran robustez ante las perturbaciones y logrando seguir las traycetorias planificadas.

ABSTRACT

Drying has become one of the most important alternatives for increasing the shelf life of agro-industrial products. Studies have been conducted to model the process with the aim of designing controllers to improve it. These controllers have several key parameters that need to be estimated. This thesis or communication of results addresses the following topics: (1) the parametric estimation of drying kinetics from an algebraic approach in the time domain, and (2) the control of the drying process using trajectory planning.

To achieve the estimation, the theoretical framework of algebraic identification proposed in 2003 by Fliess and Sira was employed, which has not been used in the drying field. Meanwhile, for the process control, three controllers were implemented: a nonlinear control based on state feedback linearization, a two-stage control, and a sliding mode control.

Regarding the obtained results, in the online estimation of drying kinetics parameters, values with errors less than 1.5 % were obtained in time intervals of 0.2-10 min, allowing their use in the development of controllers. On the other hand, the response of the controllers to parameter changes was very good, demonstrating great robustness against disturbances and successfully following the planned trajectories.

Índice general

Índice de tablas **8**

Índice de figuras **9**

1. Introducción **12**
1.1. Antecedentes 13
1.2. Planteamiento del Problema 15
1.3. Justificación 16
1.4. Hipótesis 17
1.5. Objetivos 17
1.5.1. Objetivo General 17
1.5.2. Objetivos Particulares 18

2. Marco Teórico **19**
2.1. Proceso de secado de productos agrícolas 19
2.1.1. Generalidades 19
2.1.2. Métodos de secado 20
2.1.2.1. Métodos de secado por conducción . . . 21
2.1.2.2. Métodos de secado por radiación 21
2.1.2.3. Métodos de secado por convección . . . 22
2.1.3. Secadores 23
2.1.3.1. Secador a sol abierto 23
2.1.3.2. Secador solar controlado 23
2.1.3.3. Secador solar directo 24
2.1.3.4. Secador solar indirecto 25
2.1.3.5. Secador solar mixto 27
2.1.3.6. Secador solar híbrido 27

2.2. Modelo dinámico de secado 29
2.2.1. Modelos de cinética de secado 32
2.3. Estimación de parámetros 35
2.4. Control del Proceso 39
2.4.1. Estrategias de control 40
2.4.2. Control en secadores de productos agroindustriales 40
2.4.3. Estado del arte 42

3. Modelado y Control del proceso de secado 44
3.1. Modelo dinámico del Proceso de Secado 44
3.1.1. Cinética de Secado 47
3.2. Control del proceso de secado 48
3.2.1. Control no lineal basado en linealización por retroalientación del estado 49
3.2.2. Control en dos etapas para el seguimiento de trayectorias 50
3.2.2.1. Polinomio de Bézier 53
3.2.3. Control de Modo Deslizante 55

4. Identificación paramétrica 57
4.1. Identificación paramétrica en línea 57
4.2. Identificación paramétrica fuera de línea 61
4.3. Métodos Numéricos 62
4.4. Plataforma computacional 64

5. Resultados y Discusión 66
5.1. Estimación de Parámetros 66
5.1.1. Estimación de Parámetros en línea del Kiwi . . . 67
5.1.2. Estimación de Parámetros en línea de productos agroindustriales 69
5.1.3. Estimación de Parámetros fuera de línea de productos agroindustriales 72
5.1.4. Estimación de Parámetros con peturbaciones . . . 77
5.2. Control del proceso de secado 80
5.2.1. Control no lineal basado en linealización por retroalimentación del estado 80
5.2.1.1. Chile 82

5.2.2. Control en dos etapas para el seguimiento de trayectorias 85
5.2.3. Control de Modo Deslizante 87

6. Conclusiones y Trabajo Futuro **90**
6.1. Conclusiones 90
6.2. Trabajo Futuro 91

A. Parámetros del Proceso de Secado **105**

B. Datos experimentales **107**

C. Códigos **109**

D. Congresos y Publicaciones **112**

Índice de tablas

2.1. Comparación de tipos de secadores solares [Masud et al., 2020]. 28
2.2. Principales modelos matemáticos de cinética de secado [Özdemir and Onur Devres, 1999; Ekka and Palanisamy, 2020]. 34

3.1. Nomenclatura del modelo dinámico del proceso de secado 46
3.2. Constantes de cinética de secado. 47

5.1. Estimación de 2 parámetros de la cinética de secado del Kiwi sin control. 67
5.2. Estimación de 3 parámetros de la cinética de secado del Kiwi sin control. 69
5.3. Condiciones iniciales de productos agroindustriales. . . . 70
5.4. Estimación de parámetros con temperatura de operación. 70
5.5. Estimación de parámetros con temperatura ambiente. . . 71
5.6. Estimación de parámetros con temperatura de operación evitando singularidades. 71
5.7. Estimación de parámetros con temperatura ambiente evitando singularidades. 72
5.8. Constante cinética de secado de la Piña. 73
5.9. Constante cinética de secado de la Ñame. 74
5.10. Ecuaciones de la constante cinética de productos agrícolas. 74
5.11. Parámetros estimados en línea. 75
5.12. Parámetros estimados para el chile. 83

6.1. Comparación entre estimación en línea y fuera de línea. . 91

A.1. Calor específico 105

A.2. Propiedades Físicas 106

B.1. Datos experimentales Piña (R. Biswas *et al.*, 2022). . . . 107
B.2. Datos experimentales Ñame (Sahoo *et al.*, 2022). 108

Índice de figuras

2.1. Clasificación de secador solar [Kumar et al., 2016]. . . . 24
2.2. Secador solar directo [Umeshtoshniwal and Karale, 2013]. 24
2.3. Secador solar indirecto [Masud et al., 2020]. 26
2.4. Secador solar mixto [Basunia and Abe, 2001]. 27
2.5. Secador solar híbrido [Hossain et al., 2008]. 28
2.6. Diagrama de bloques del control óptimo propuesto por [Ivanova et al., 2020]. 43

3.1. Esquema de control general del proceso de secado. . . . 48
3.2. Clasificación de Trayectorias [Biagiotti and Melchiorri, 2008]. 53

4.1. Representación gráfica de la estimación de las pendientes [Chapra and Canale, 2006]. 63

5.1. Estimación de Parámetros del Kiwi caso 1. 67
5.2. Estimación de Parámetros del Kiwi caso 2. 68
5.3. Estimación de Parámetros del Kiwi caso 3. 68
5.4. Gráficas de relación de humedad vs tiempo. a) Fruta Piña [Biswas and Lovell, 2008]. b) Tubérculo Ñame Seborg et al. (2011). 73
5.5. Estimación de parámetros de secado de la Piña. 75
5.6. Estimación de parámetros de secado del Ñame. 76
5.7. Contenido de húmedad del piña. a)Valores experimentales. b)Valores estimados. 76
5.8. Contenido de húmedad del ñame. a)Valores experimentales. b)Valores estimados. 77
5.9. Comportamiento de la temperatura promedio durante todo el día en Zacatepec, Morelos. 78

5.10. Comportamiento de la temperatura de la pared en los primeros 10 minutos. 79
5.11. Comportamiento de la temperatura para Kiwi. a) Parámetros con error del 10 %. b) Cambio de parámetros con error $< 1\,\%$. 81
5.12. Comportamiento de la temperatura para Kiwi. a) Parámetros con error del 0.006 %. b) Parámetros con error ≈ 0. . 82
5.13. Resultados caso 1. 1a) Comportamiento de la temperatura. 1b) Cambio de parámetros en controlador. 1c) Comportamiento del contenido de humedad. 1d) Comportamiento del contenido de humedad al cambio de parámetros. . . 83
5.14. Resultados caso 2. 2a) Comportamiento de la temperatura. 2b) Cambio de parámetros en controlador. 2c) Comportamiento del contenido de humedad. 2d) Comportamiento del contenido de humedad al cambio de parámetros. . . . 84
5.15. Comportamiento de la temperatura Caso 1 con B_1. a) Comportamiento completo. b) Ampliación en 5 min. . . . 86
5.16. Comportamiento de la temperatura Caso 2 con B_1. a) Comportamiento completo. b) Ampliación en 5 min. . . . 86
5.17. Comportamiento de la temperatura Caso 2 con B_2. a) Comportamiento completo. b) Ampliación en 5 min. . . . 87
5.18. Comportamiento de la temperatura con SMC Caso 1 con B_1. a) Trayectoria completa. b) Ampliación en 5 min. . . 88
5.19. Comportamiento de la temperatura con SMC Caso 2 con B_1. a) Trayectoria completa. b) Ampliación en 5 min. . . 89

D.1. Constancia de trabajo, AMIDIQ 2023. 112
D.2. Constancia de ponente, CIENERGIA 2023. 113

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se plantea la problemática y los antecedentes que se tienen al diseñar controladores basados en modelos con parámetros desconocidos. De igual manera, se presenta la hipótesis y los objetivos de este trabajo con los que se plantea dar respuesta a la problemática.

En la actualidad existen diversos problemas que están tomando relevancia en la sociedad, entre ellos se encuentran el cambio climático, las contingencias sanitarias, la pobreza y el hambre, este último lo padecen en el mundo aproximadamente un billón de personas [Hopfenberg and Hill, 2018].

El hambre es causada por diferentes aspectos, pero los principales están relacionados con la falta de acceso a la comida y al excesivo crecimiento poblacional. El primero de estos se puede deber a los cambios climáticos, así como el calentamiento global, afectando cultivos, provocando escases y encarecimiento de productos [Folwarczny et al., 2021]. Mientras que, para satisfacer la demanda por el crecimiento poblacional, resulta indispensable que aumente la producción de comida [Flies et al., 2018] Se estima que para el año 2050 se requerirá aumentar la producción de comida entre 85 %-110 % para satisfacer la demanda [Hafez et al., 2022].

En la búsqueda por combatir el hambre, los investigadores se percataron que un tercio de la producción de comida es desperdiciada, lo que representa 1.3 billones de toneladas de comida y se espera que en el año 2050 aumente en un 70 % [Hopfenberg and

Hill, 2018; Van Malderen et al., 2022]. Por lo que, el disminuir el desperdicio sería un gran paso para combatir el hambre, a su vez, permitiría generar ingresos fomentando el crecimiento sostenible [Shrivastava et al., 2021]. Para enfrentar el deterioro de la comida existen técnicas como lo son el curado, la congelación, la ebullición, el encurtido, el enlatado, la gelatinización y el secado [Mandal et al., 2018]. Este último ha tomado gran relevancia ya que tiene un costo bajo de construcción, permite aprovechar la energía solar y se puede implementar fácilmente en zonas rurales.

El secado, pese a ser una de las técnicas más utilizadas, presenta una problemática con respecto a las condiciones del proceso. Para atender la problemática se han diseñado controladores, los cuales requieren modelos dinámicos que describan el proceso. Estos modelos contienen parámetros, un claro ejemplo de ellos son los parámetros de la cinética de secado, los cuales necesitan de diversos experimentos para ser estimados. Por lo que, para lograrlo, los investigadores han comenzado a estudiar formas rápidas y precisas para estimar los parámetros para cada producto agroindustrial y así diseñar mejores controladores que permitan mantener las condiciones de operación, obteniendo mejores procesos.

Este trabajo se enfoca en estimar los parámetros de la cinética de secado en línea en forma cerrada y en lazo cerrado considerando el marco teórico de la identificación algebraica elaborada por Fliess and Sira-Ramírez (2003). Esta técnica no ha sido utilizada en procesos de secado; sin embargo, se ha aplicado en diferentes casos con sistemas eléctricos y mecánicos. Con la estimación de parámetros en línea realizada se desarrollan esquemas de control para la regulación del proceso de secado.

1.1. Antecedentes

Hoy en día existen muchas técnicas para poder estimar los parámetros de algún modelo o ecuación cinética, pueden ser en línea o fuera de línea. En los trabajos reportados, la obtención y procesamiento de datos experimentales se realiza mediante estimación fuera de línea.

Algunos de estos trabajos realizados con estimación fuera de línea son, por ejem-

plo, el propuesto por Verma y colaboradores los cuales estimaron los parámetros de la cinética de secado del arroz [Verma et al., 1985]. En 2002, Panchariya y colaboradores hacen la estimación de parámetros para el secado de té negro [Panchariya et al., 2002]. Mientras que en 2015 lo realizan para el secado de kiwi [Darıcı and Şen, 2015].

En la literatura la mayoría de los trabajos se elaboran utilizando una estimación de los parámetros fuera de línea de la cinética de secado, para ello ocupan diversas técnicas matemáticas con las que obtienen ecuaciones que describan el comportamiento del secado de los productos agroindustriales.

Por otro lado, la estimación de parámetros en línea no se ha utilizado en gran medida en el ámbito del secado, son pocos los autores que han desarrollado trabajos de esta manera. Uno de estos trabajos es el desarrollado por Ivanova y su grupo, los cuales estiman los parámetros en línea del agente de secado para la uva. La implementación de la estimación en línea les permitió obtener los parámetros de forma inmediata y a su vez, mejoraron el desempeño del controlador beneficiando las condiciones del proceso y la calidad del producto [Ivanova et al., 2020].

Un procedimiento para estimar los parámetros en línea fue el propuesto por Fliess and Sira-Ramírez (2003), el cual tiene su base en la teoría de módulos, álgebra diferencial y calculo operacional, éste se ha utilizado principalmente en sistemas eléctricos y mecánicos [Beltran-Carbajal and Silva-Navarro, 2017; Beltran-Carbajal et al., 2018, 2019]. Los valores de estos parámetros estimados se aplicaron a controladores con el fin de regular sus tareas.

Para secadores existe una amplia variedad de trabajos en la literatura en el que desarrollan controladores con la finalidad de mejorar el proceso de secado. Actualmente, el controlador más utilizado es el proporcional, integral y derivativo (PID) por su simplicidad para implementarlo. Pero se han probado otros, por ejemplo, la aplicación de un control de modo predictivo a un secador de spray para diversos productos como la leche en polvo y algunos productos agrícolas. En esta investigación comparan su desarrollo con un control PID obteniendo un aumento tanto en la tasa de producción en un 7.9 % y en la eficiencia energética en un 4.1 % [Petersen et al., 2014].

Para el secador utilizado en el presente trabajo, un secador híbrido solar-gas tipo túnel, se han aplicado controladores como el que propuso Abdenouri et al. (2022), el cual es, un control lógico difuso para regular la temperatura y lo compararon con un control Proporcional-Integral (PI), mejorando la respuesta y disminuyendo el consumo de energía convencional en un 11.3 %.

En ese mismo año, Zoukit et al. (2022) desarrollaron un controlador de cascada con la finalidad de regular a diferentes temperaturas el secado mediante la gestión del flujo de gas entregado a los quemadores. Los investigadores observaron el rechazo de perturbaciones durante su funcionamiento, demostrando una buena capacidad para satisfacer el rendimiento del sistema en términos de precisión y la rapidez para ajustar la temperatura en el valor deseado.

Como se ha expuesto previamente, actualmente se sigue buscando mejorar el proceso de secado. Una alternativa implica obtener los parámetros de la cinética de secado en línea y su utilización en un controlador que permita regular de mejor manera la temperatura del producto con la finalidad de conseguir mejores condiciones de producción y una calidad superior, sin afectar el contenido nutricional.

1.2. Planteamiento del Problema

Muchos de los controladores que se desarrollan requieren de modelos que describan el proceso de secado. Los modelos matemáticos que se utilizan para describirlo son desarrollados utilizando balances de matería y energía que simulan los diferentes fenómenos de transporte. En este sentido, el modelo matemático no lineal descrito a continuación por las ecuaciones (1.1)-(1.3), considera varias suposiciones tal cual lo describieron [Pakowski and Mujumdar, 2006].

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \tag{1.1}$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{hA_p(T_A - T_p)}{(Cp_s - Cp_w X)m_s} + \frac{k(X - X_e)((Cp_w - Cp_v)T_p - \Delta h_{v0})}{(Cp_s - Cp_w X)} \tag{1.2}$$

$$\frac{dT_A}{dt} = \frac{m_{fA}(T_{A0} - T_A)}{M_A} + \frac{Q_f}{M_A Cp_A} - \frac{hA_p(T_A - T_p)}{M_A Cp_A} + \frac{h_{AV} k m_s (X - X_e)}{M_A Cp_A} \tag{1.3}$$

La Ecuación (1.1) describe el cambio del contenido de humedad X con respecto al tiempo de la fruta o verdura. La Ecuación (1.2) representa el cambio de la temperatura del producto T_p con respecto al tiempo. Por último, la Ecuación (1.3) describe la variación de la temperatura del aire T_A la cual tiene relación con la transferencia de humedad, la transferencia de calor convectiva y el calor del aire, este modelo se explica a detalle más adelante.

Como se observa en el modelo matemático existen diversos parámetros que influyen en la dinámica no lineal del proceso de secado. Para llevar a cabo la simulación se requiere tener información precisa de estos parámetros. Estos te permiten diseñar e implementar esquemas de control que regulen de manera eficiente el proceso en la condición de operación especificada para los diferentes productos agroindustriales.

Además, con los parámetros que pueden ser variantes con el tiempo, es posible realizar simulaciones numéricas de la dinámica del proceso en lazo cerrado. De igual manera, tener los valores de los parámetros de manera oportuna contribuye a evaluar la eficiencia de técnicas de control y su impacto en la calidad del producto final.

Por estas razones, la estimación de parámetros en tiempo real es actualmente un área de investigación tecnológica relevante, ya que es esencial en el modelado dinámico, diseño, optimización y control de un proceso, permitiendo aumentar el tiempo de vida y la calidad de los productos agroindustriales. Esto puede coadyuvar a combatir el hambre y a tener procesos controlados de forma eficiente, ocupando menos combustibles fósiles y haciéndolos sostenibles.

1.3. Justificación

En la última década se ha intensificado la búsqueda por encontrar la mejor tecnología para secar o deshidratar los productos como frutas, verduras y plantas medicinales con la finalidad de satisfacer la demanda de diferentes industrias [Prakash et al., 2016].

Es importante que en el proceso de secado se tenga una buena calidad de producto y se mantenga su calidad nutricional con un proceso eficiente. Para lograrlo se han

diseñado controladores basados en modelo que tienen parámetros que lo rigen, estos regularmente están vinculados a la cinética de secado, al rendimiento del secador y a la calidad del producto final [Mohammed et al., 2020; Mohana et al., 2020].

Con base en lo anterior, el presente trabajo está enfocado en el problema de estimación de los parámetros en línea, en lazo cerrado y en el dominio del tiempo, de la cinética de secado de frutas y verduras en un secador hibrido solar-gas tipo túnel y en el diseño de esquemas de control que permitan regular o seguir una trayectoria de referencia.

De acuerdo a nuestro conocimiento de la literatura, el presente trabajo resulta relevante ya que es la primera vez que la identificación algebraica se extenderá al problema de estimación de los parámetros del proceso de deshidratación de productos agrícolas. En este contexto, algunos productos que se consideran para este trabajo son: aguacate, chile rojo, kiwi, fresa, plátano, entre otros.

1.4. Hipótesis

La estimación algebraica en línea de los parámetros del modelo dinámico del proceso de secado de frutas y verduras permitirá el desarrollo de controladores que garanticen el cumplimiento de las especificaciones de control de calidad requeridas del producto terminado en un secador híbrido solar-gas tipo túnel, esto en condiciones de operación en donde la incertidumbre paramétrica representa un problema importante.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Proponer un esquema de control para la regulación eficiente del proceso de secado de frutas y verduras en un secador híbrido solar-gas tipo túnel que sea robusto con respecto a perturbaciones de entrada acotadas variantes en el tiempo, el cual se base en la identificación paramétrica algebraica en línea de su modelo dinámico.

1.5.2. Objetivos Particulares

- Seleccionar y analizar un modelo matemático que describa la dinámica no lineal del proceso de secado de frutas y verduras para el desarrollo de técnicas de identificación paramétrica en tiempo real y de control automático, partiendo de balances de materia y energía.
- Desarrollar una plataforma computacional en Python para la simulación numérica de técnicas de control e identificación paramétricas del proceso de secado.
- Obtener fórmulas algebraicas para estimar en línea en forma cerrada y en lazo cerrado los parámetros del proceso de secado en presencia de las perturbaciones potenciales.
- Desarrollar un esquema de control para la regulación del proceso de secado de frutas y verduras basado en el enfoque de identificación paramétrica propuesto.
- Analizar las principales ventajas y diferencias del método del enfoque de identificación algebraica en lazo cerrado propuesto con respecto de otras técnicas de identificación paramétrica reportadas en la literatura.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se presenta el soporte técnico y contextual de la problemática. Se define el secado, se abordan los diferentes tipos de secadores y técnicas de secado. De igual manera, se presentan diversos modelos de la dinámica de secado y de ecuación cinética de secado utilizados para el diseño de controladores. Se concluye el capítulo explicando las diferentes técnicas para la estimación de los parámetros de la cinética de secado y los tipos de controladores utilizados en este proceso.

2.1. Proceso de secado de productos agrícolas

2.1.1. Generalidades

Hoy en día se han buscado diversas alternativas para poder disminuir el desperdicio de los alimentos, este ocurre principalmente al principio de la cadena de valor, especialmente en el manejo y procesamiento posterior a la cosecha de los productos agroindustriales [Udomkun et al., 2020].

Uno de los principales factores que más contribuye a esta pérdida es el contenido de agua que presentan las frutas y verduras. El reducir el contenido de agua impide el crecimiento de microorganismos, aumenta la vida útil y facilita su transporte, lo que permitiría resolver los problemas de hambre y desperdicio [Serpa et al., 2015]. La

técnica más común utiliza calor para retirar el agua; esta es conocida como secado y se ha desarrollado desde la prehistoria.

El secado es una de las operaciones unitarias más antiguas e importantes, consiste en la aplicación de calor a un material para eliminar el agua libre y hacer que el producto sea más estable al reducir su actividad del agua [Mohammed et al., 2022]. No solo consiste en separar agua, también puede separar pequeñas cantidades de algún otro líquido; el secado suele ser la etapa final de una serie de operaciones, por lo tanto, el producto al que se le extrae el líquido mediante el secado está listo para ser empaquetado [McCabe et al., 2007]. Uno de los problemas que tiene este proceso se debe a la transferencia inestable de calor y de masa, o transformaciones físicas o químicas que pueden afectar la calidad del producto [Lingayat et al., 2020; Nukulwar and Tungikar, 2022].

Para lograr que un producto se deshidrate, se requiere de energía que puede provenir de varias fuentes, como lo son los combustibles fósiles, electricidad, gas natural, biomasa y energía solar. Actualmente, la energía utilizada representa entre el 10 y 20 % del consumo total industrial en el mundo desarrollado [Lingayat et al., 2020]. Por lo que la industria busca utilizar el mínimo de energía para llevar acabo el proceso, por ejemplo, algunos países tropicales ocupan la energía solar debido al bajo costo de inversión y accesibilidad.

Para responder a estos problemas, se han estudiado diferentes métodos de secado con la finalidad de tener procesos más sustentables donde se puedan bajar costos de operación, disminuir el uso de combustibles fósiles y mejorar la eficiencia energética de los procesos. Algunos métodos de secado son: secado por conducción, por radiación y por convección [Mohammed et al., 2022].

2.1.2. Métodos de secado

Como se ha mencionado, durante las últimas décadas se han investigado varios métodos de secado para reducir las pérdidas postcosecha y mejorar la calidad del producto. Los métodos se han clasificado de diferentes maneras, pero una de las clasificaciones

más utilizada se basa en el tipo de transferencia de calor, como calentamiento por conducción, por convección, por radiación y dieléctrico. Dentro de esta clasificación hay un caso especial, la liofilización la cual es considerada en calentamiento por conducción [Masud et al., 2020; Pakowski and Mujumdar, 2006]. También se puede clasificar según la utilización de la energía solar en 2 grupos: secado al sol abierto y secado solar controlado [Lingayat et al., 2020]. A continuación, se describen brevemente algunos de estos métodos de secado.

2.1.2.1. Métodos de secado por conducción

Este método tiene su principio en la transferencia de calor por conducción, en el cual el calor para la evaporación es suministrado a través de superficies calientes (estacionarias o móviles) ubicadas dentro del secador. La humedad evaporada es llevada por operación de vacío o por una corriente de gas que es principalmente un portador de humedad. Una ventaja de este método es la eficiencia térmica que es muy alta. Algunos secadores que utilizan este método son secadores de paletas, secadores rotativos con tubos de vapor internos y secadores de tambor [Pakowski and Mujumdar, 2006].

2.1.2.2. Métodos de secado por radiación

Otro método es por transferencia de calor por radiación, en donde la radiación apenas penetra la capa del material, la cual absorbe solo una parte de la radiación incidente en función de su longitud de onda. La radiación infrarroja es a menudo utilizada en el secado, así como la radiación solar. La energía es absorbida selectivamente por las moléculas de agua: a medida que el producto se seca, se utiliza menos energía. Esta técnica es útil para secar productos de alto valor unitario o para la corrección final del perfil de humedad en el que solo se eliminan pequeñas cantidades de humedad difícil de obtener [Mujumdar and Pakowski, 2020].

2.1.2.3. Métodos de secado por convección

El método por convección es posiblemente la estrategia más común, más rápida y más antigua para secar productos agrícolas [Masud et al., 2020]. En esta técnica el calor es suministrado por aire o gas caliente que fluye sobre la superficie del sólido. El calor se suministra por convección a la superficie expuesta del material y la humedad evaporada se la lleva el medio de secado [Pakowski and Mujumdar, 2006].

Este método se compone de diferentes etapas, la primera etapa es conocida como secado basado en la superficie o de humedad constante, en esta etapa la superficie toma la temperatura correspondiente al aire. Cuando la velocidad de remoción de humedad constante se ve obstruida, se pasa a la siguiente fase conocida como la primera etapa de tasa decreciente, o también como contenido de humedad crítica, en esta fase la temperatura de los sólidos se aproxima a la temperatura del medio. Por último, existe otra etapa identificada como la segunda etapa de tasa decreciente. Debido al gradiente de concentración presente entre la superficie y la región central, se produce una difusión dentro del tejido alimentario que posteriormente da como resultado la migración de la humedad desde el centro hacia la superficie. En esta fase se tiene un 10 % de humedad y el tiempo que lleva removerla es equivalente al 90 % de la humedad ya removida [Masud et al., 2020; Pakowski and Mujumdar, 2006].

Este método es el más utilizado en la industria, alrededor de un 85 % de los procesos de secado lo utiliza, por eso los investigadores han desarrollado más secadores ocupando este tipo de transferencia de calor como los secadores de lecho fluidizado, instantáneos, por aspersión, cama empacada y secadores de túnel [Pakowski and Mujumdar, 2006; EL-Mesery et al., 2023].

Al ser el método más utilizado en la industria y el que se ocupa en este trabajo, resulta necesario describir algunos tipos de secadores que se emplean con mayor frecuencia para el secado de productos agroindustriales.

2.1.3. Secadores

2.1.3.1. Secador a sol abierto

Uno de los diversos secadores que han surgido para obtener un producto de calidad con bajos costos de operación es el secador a sol abierto, este es el más antiguo y tradicional que suelen utilizar los agricultores [Nukulwar and Tungikar, 2022]. Sus principales ventajas son:

- Bajo costo de inversión.
- Bajo costo de operación.
- Independiente de otras fuentes de energía.
- No requiere mano de obra calificada.

Mientras que sus grandes desventajas son:

- Mayor periodo de secado.
- Pérdidas por falta de uniformidad o secado insuficiente durante el proceso.
- Degradación de la calidad del producto por viento, lluvia, insectos y animales. [Kumar et al., 2016; Tomar et al., 2017; EL-Mesery, 2022].

Por estas razones se han buscado otras opciones para poder satisfacer la calidad del producto sin elevar el costo de inversión y el tiempo de operación.

2.1.3.2. Secador solar controlado

Una alternativa al secador a sol abierto es el secador solar controlado, esto tipo de secador tiene una serie de ventajas como la obtención de productos de buena calidad, menor período de secado, productos libres de polvo y productos a gran escala [Lingayat et al., 2020]. A su vez este tipo se clasifica dependiendo del tipo de convección que utilice como se muestra en la **Fig. 2.1**.

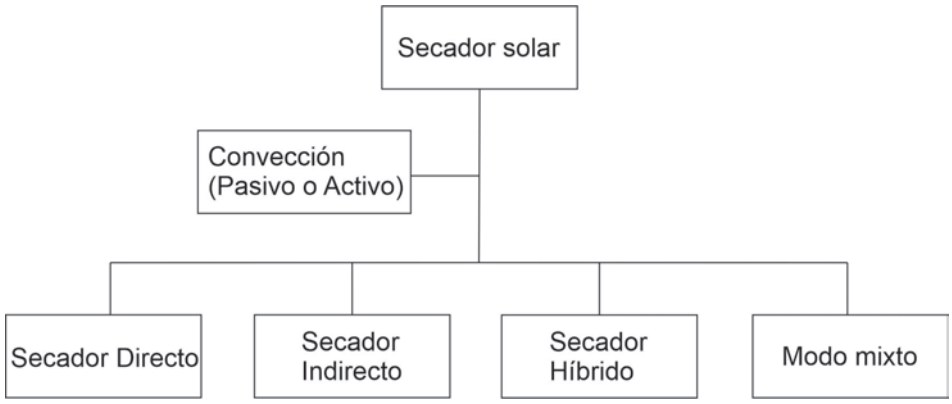

Figura 2.1: Clasificación de secador solar [Kumar et al., 2016].

2.1.3.3. Secador solar directo

Este secador es conocido así debido a que se utilizan vidrios transparentes para transmitir la radiación solar directamente a los productos alimenticios [Ampratwum and Dorvlo, 1998]. Algunos secadores solares son tipo caja, de gabinete o de techo de vidrio [Rathore and Panwar, 2010] como se muestra en la **Fig. 2.2**.

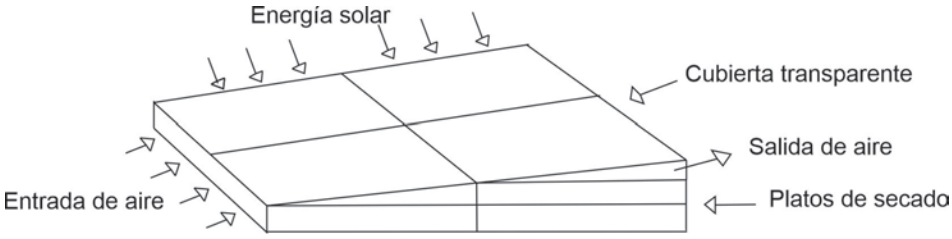

Figura 2.2: Secador solar directo [Umeshtoshniwal and Karale, 2013].

El secador tiene una construcción sencilla y económica que protege el producto de secado del polvo, la lluvia, los desechos, etc. [Kumar et al., 2016]. Sus principales ventajas son:

- Baja contaminación en el producto.
- Protección contra lluvia, rocío, etc.
- Mejor calidad de producto.

Mientras que sus principales desventajas son:

- La calidad y el color del producto se deterioran cuando el producto es expuesto directamente a la luz.
- La eliminación inadecuada de la humedad del vapor da velocidades de secado más lentas.
- La transmisividad de la cubierta del vidrio se reduce después de un tiempo a medida que la humedad produce condensación dentro de la cubierta de vidrio [Lingayat et al., 2020].

A esta clasificación, muchos autores suelen agregar una división más al secador tipo directo, lo clasifican en activo y pasivo, esto depende del tipo de convección, si es convección natural se le denomina secador solar directo pasivo como lo son algunos gabinetes y los invernaderos en los cuales el aire calentado circula por fuerzas de flotabilidad o como resultado de la presión del aire [Tiwari et al., 2016; Tomar et al., 2017].

Por otra parte, los secadores solares directos activos son los que tienen un sistema de ventilación para hacer circular el aire caliente dentro de la cámara de secado o desde el colector solar hacia la cámara de secado, esto con la finalidad de disminuir los tiempos de secado y así poder usarlos a gran escala [Tiwari et al., 2016; Tomar et al., 2017].

2.1.3.4. Secador solar indirecto

Los secadores solares indirectos, a diferencia de los secadores directos, tienen un colector solar y una unidad de secado independiente. La unidad de colector solar es útil para lograr valores de temperatura más altos con caudales de aire controlados [Kumar et al., 2016].

Este tipo de secador tiene una cámara de secado opaca en la cual contiene un producto colocado en bandejas. La cámara de secado se calienta mediante la circulación de aire, el cual es calentado por un colector solar de calentamiento de aire de baja caída de presión [Tomar et al., 2017], como se muestra en la **Fig. 2.3**.

Sus principales ventajas son:

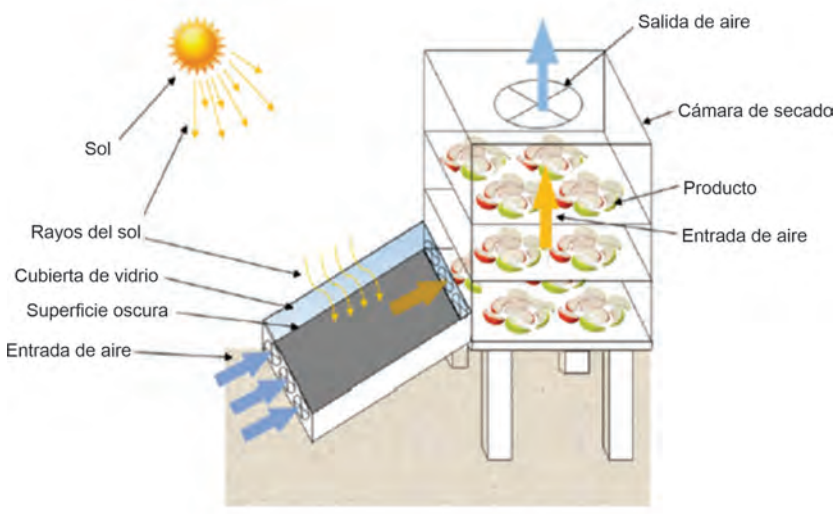

Figura 2.3: Secador solar indirecto [Masud et al., 2020].

- Mantiene buena calidad de producto.
- Se puede reducir el tiempo de secado.
- El producto se puede conservar durante mucho tiempo, además, se vuelve extremadamente liviano.
- Ayuda a preservar las vitaminas y el color debido a que la radiación no es directa [Lingayat et al., 2020; Udomkun et al., 2020].

Este método también se puede clasificar en indirecto activo e indirecto pasivo. El indirecto activo sigue el mismo principio que el directo activo, en el cual se usa un ventilador o soplador para forzar el aire, esto ayuda porque es posible controlar la tasa de secado. Algunos de estos tipos son el secador solar con colector invernadero y el secador tipo túnel con colector integral [Yadav et al., 2018; Tedesco et al., 2019].

Mientras que el secador indirecto pasivo (natural) es reconocido por la circulación natural del aire. Los alimentos se calientan por aire y luego la humedad sale por la chimenea que se coloca en la parte superior. Por ejemplo, el secador indirecto con chimenea y con sistema de almacenamiento de calor [Yadav et al., 2018; Tedesco et al., 2019; Lingayat et al., 2020].

2.1.3.5. Secador solar mixto

En estos secadores se ocupan tanto los rayos del sol como el aire caliente de los colectores solares para impulsar el proceso de secado. Mientras que los rayos del sol se imponen directamente sobre los alimentos, el aire caliente del colector solar se transfiere a través de los alimentos para aumentar la velocidad de secado, esto se logra mediante sopladores o ventiladores [Tomar et al., 2017; Masud et al., 2020] un ejemplo de este secado se muestra en la **Fig. 2.4**.

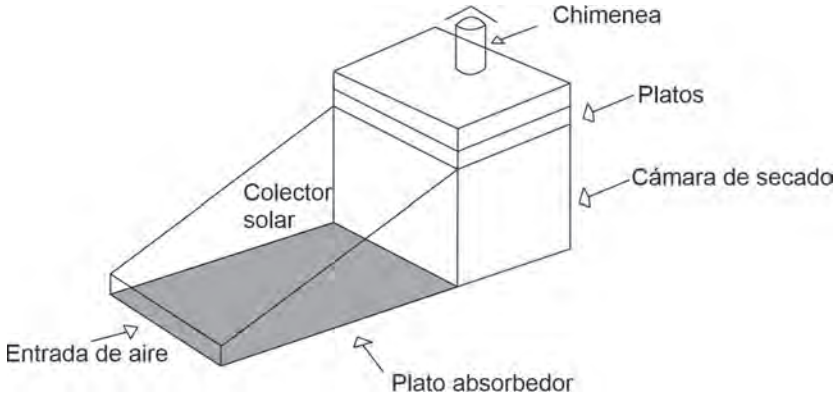

Figura 2.4: Secador solar mixto [Basunia and Abe, 2001].

2.1.3.6. Secador solar híbrido

En este tipo de tecnología, los materiales agrícolas se secan bajo radiación solar y/o energía de respaldo o calor almacenado en ausencia de luz solar. El aire es precalentado por otra fuente de energía auxiliar, como un módulo solar fotovoltaico, electricidad, gas LP, diésel o biomasa [Udomkun et al., 2020] como se muestra en la **Fig. 2.5**.

Con los diversos estudios realizados, se ha encontrado que este tipo de secador reduce la infestación microbiana en los productos. Se obtien un menor tiempo de secado, así como también un mejor color, aroma y textura en comparación con el secador a sol abierto [Queiroz et al., 2004; Ferreira et al., 2007]. Además, es uno de los secadores que más se ocupan en la industria y la agricultura.

Para poder elegir correctamente un secador, es importante conocer las condiciones

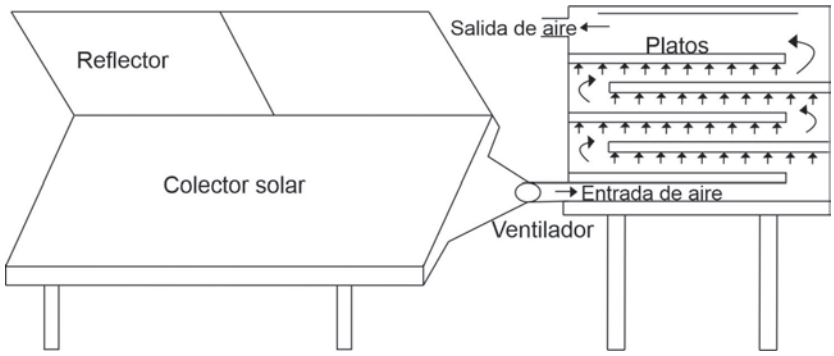

Figura 2.5: Secador solar híbrido [Hossain et al., 2008].

que tienen cada uno de ellos, como el tiempo de secado, el costo, la velocidad de secado, entre otros, en la **Tabla 2.1** se pueden observar de manera resumida algunas de estas condiciones.

Tabla 2.1: Comparación de tipos de secadores solares [Masud et al., 2020].

Tipo de Secador	**Velocidad de Secado**	**Tiempo de Secado**	**Calidad de Secado**	**Costo**	**Efectos Ambientales**
Secador solar activo	Bajo[a]	Alto	Bajo	Bajo	Bajo
Secador solar pasivo	Medio[b]	Medio	Medio	Medio	Medio
Secador solar modo mixto	Alto[c]	Bajo	Alto	Alto	Medio
Secador solar híbrido	Alto	Bajo	Alto	Medio	Bajo

[a]Crítico
[b]Aceptable
[c]Ideal

Como se observa en la **Tabla 2.1**, uno de los secadores que más beneficios tiene es el secador tipo híbrido, este secador es el que se encuentra en la planta del parque científico y tecnológico del estado de Morelos en Xochitepec, del cual surge este trabajo.

Después de definir el tipo de secador, es importante ocupar herramientas matemáticas para modelar el proceso y así predecir las condiciones ideales de trabajo dependiendo del producto que se va a secar. Obteniendo el modelo, se diseña el controlador, por lo que, en la siguiente sección, se expondrán los diferentes modelos termodinámicos que se han estudiado para el secado de las diferentes frutas y verduras.

2.2. Modelo dinámico de secado

El avance tecnológico ha permitido ocupar herramientas computacionales con diversos enfoques que han facilitado el diseño, control y descripción de los diferentes procesos. Con este avance se han construido dispositivos o equipos que han permitido elaborar productos con la calidad deseada y eficientando los recursos energéticos para obtener procesos sustentables. Esto se ha logrado gracias al desarrollo de diferentes modelos que caracterizan el proceso, los cuales describen los fenómenos físicos que suceden durante la operación.

Los modelos dinámicos describen y predicen el comportamiento de sistemas cuyo estado evoluciona con el tiempo. El proceso que representan suele estar sujeto a varios tipos de cambios en la entrada y lo que se busca es obtener una representación matemática de ello. Tal representación solo provee conocimiento acerca del comportamiento idealizado del proceso, a pesar de eso, se ha comprobado que son muy útiles en el entendimiento y en la caracterización del comportamiento real [Figueroa, 2012]. Muchos modelos se desarrollan mediante los diferentes balances de materia y energía que suceden en el proceso.

En el caso del secado es importante conocer el tipo de proceso que se lleva a cabo, este puede estar en estado estacionario o en estado no estacionario (batch). La diferencia entre éstas, consiste en poder observar fácilmente en forma de ecuación el balance general de una entidad dada para un volumen específico de espacio. En los procesos de estado estacionario, el término de acumulación se desvanece y cuando es tipo batch, el término de acumulación es distinto de cero y la ecuación de balance se convierte en una ecuación diferencial ordinaria con respecto al tiempo [Pakowski and Mujumdar, 2006].

Para desarrollar el modelo es importante considerar e identificar todos fenómenos físicos, se tiene que describir cada fenómeno que sucede durante el proceso, considerando los flujos de calor, contenido de humedad y temperatura, así como otros flujos de energía que sean necesarios.

Pakowski y Mujmdar en su libro Handbook of Industrial Drying proponen las si-

guientes ecuaciones y relaciones para el modelo de un sistema de secado [Pakowski and Mujumdar, 2006];

- Ecuaciones de balance: En ellas se representan la ley de la conservación (materia y energía).
- Ecuaciones constitutivas (ecuaciones cinéticas): Conectan los flujos en el sistema a las respectivas fuerzas motrices.
- Relaciones de equilibrio: Estas son necesarias si existe un límite de fase en alguna parte del sistema.
- Ecuaciones de propiedades: Algunas propiedades pueden considerarse constantes.
- Relaciones geométricas: Por lo general, son necesarias para convertir los caudales presentes en las ecuaciones de equilibrio en flujos presentes en ecuaciones constitutivas.

En la literatura están reportados diversos modelos dinámicos del secado que contienen las relaciones antes expuestas, teniendo como base los balances de materia y energía con diversas variables de estado. Uno de los primeros modelos dinámicos fue el que propusieron Ferguson and Turner (1996) en el cual modelaron el secado de madera. Este modelo considera varias suposiciones para poder ser desarrollado, consta de 3 ecuaciones diferenciales parciales acopladas altamente no lineales que tienen como variables independientes el contenido de humedad X, la temperatura T y la presión P. Como se muestra en las siguientes ecuaciones en donde los coeficientes A_{ij} y K_{ij} agrupan la capacidad y la cinética respectivamente:

$$A_{11}\frac{\partial X}{\partial t} + A_{12}\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K_{11}\nabla X) + \nabla(K_{12}\nabla T) + \nabla(K_{13}\nabla P) \tag{2.1}$$

$$A_{21}\frac{\partial X}{\partial t} + A_{22}\frac{\partial T}{\partial t} + A_{23}\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla(K_{21}\nabla X) + \nabla(K_{22}\nabla T) + \nabla(K_{23}\nabla P) \tag{2.2}$$

$$A_{31}\frac{\partial X}{\partial t} + A_{32}\frac{\partial T}{\partial t} + A_{33}\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla(K_{31}\nabla X) + \nabla(K_{32}\nabla T) + \nabla(K_{33}\nabla P) \tag{2.3}$$

A su vez se desarrolló un modelo para describir el secado convectivo en estado

estacionario y no estacionario, logrando imitar con precisión la cinética de secado determinada experimentalmente para los dos casos. Este modelo permite un examen de la respuesta del cuerpo seco a las condiciones de secado que son cambiantes al tiempo [Kowalski and Pawłowski, 2010].

Mientras que Oueslati et al. (2012) modelaron el proceso de secado para un secador hibrido tipo túnel Solar-Gas realizando las siguientes suposiciones:

- La densidad del aire es constante.
- La distribución de la velocidad de aire en el secador es uniforme.
- El vapor de agua y el aire son considerados como gases ideales.
- El encogimiento del producto es rechazado.
- La condensación dentro del secador es rechazada.
- Se supone que la habitación es impermeable.
- Las superficies de intercambio aire-producto permanecen constantes.
- Todos los productos son considerados homogéneos.
- Se consideran parámetros concentrados, que tiene una temperatura uniformemente distribuida.

Con estas suposiciones elaboraron el siguiente modelo que consta de 5 variables de estado, humedad del producto (X), humedad de aire (Y), temperatura del aire (T_a), temperatura del producto (T_{pr}) y temperatura de la pared (T_{wa}) [Oueslati et al., 2012].

$$m_{pr}\frac{dX}{dt} = -m_{fv} \tag{2.4}$$

$$m_a\frac{dY}{dt} = -m_{fai}Y_{in} + m_{fv} - m_{fao}Y \tag{2.5}$$

$$m_{pr}Cp_{pr}\frac{dT_{pr}}{dt} = -m_{fv}L_v + A_{pr}h_{c1}(T_A - T_{pr}) \tag{2.6}$$

$$\begin{aligned}\rho_a V_a Cp_a\frac{dT_a}{dt} &= m_{fai}Cp_aT_{ai} - m_{fao}Cp_aT_a + m_{fv}Cp_vT_a \\ &\quad - h_{c1}(T_a - T_{pr})A_{pr} - h_{c2}(T_a - T_{wa})A_{wa}\end{aligned} \tag{2.7}$$

$$\rho_{wa}V_{wa}Cp_{wa}\frac{dT_{wa}}{dt} = h_{c3}(T_a - T_{wa})A_{wa} - h_d(T_{wa} - T_{am})A_{wa} \tag{2.8}$$

Existen también en la literatura modelos que fueron desarrollados para poder simular el secado solar de frutas en específico, como el modelo que Ramos y colaboradores presentaron, el cual fue desarrollado para simular el secado de uvas en un secador solar, que ocupa los balances de materia y energía considerando un proceso de transferencia de masa de difusión controlada [Ramos et al., 2015].

Como se observa, en los modelos dinámicos antes presentados una parte primordial para una buena descripción del proceso es la cinética de secado, por lo cual los investigadores han destinado recursos para identificar qué tipo de modelo describe mejor la cinética de estos productos. En el apartado que continúa se especifican los principales modelos utilizados.

2.2.1. Modelos de cinética de secado

Para lograr un buen desempeño de los controladores es importante conocer los parámetros idóneos con los que se pueda llegar a la calidad deseada. Una alternativa es la construcción de procesos de secado efectivos y seguros basados únicamente en estudios experimentales, pero esta es una tarea larga y costosa [Kowalski and Pawłowski, 2010]. Por lo que otra opción son los modelos de simulación los cuales son útiles para diseñar sistemas de secado nuevos, mejorar los existentes o para el control de la operación del secado [Tôgrul and Pehlivan, 2004; Oueslati et al., 2012].

La parte esencial del desarrollo de estos modelos es la determinación de la cinética de secado k, que describe los mecanismos y la influencia que tienen las variables del proceso en los procesos de eliminación de humedad [Kiranoudis et al., 1997].

Por ejemplo, en el desarrollo de modelos de secado de capa delgada para productos agrícolas, generalmente se mide el contenido de humedad del material en cualquier momento después de haber estado sujeto a condiciones constantes de temperatura y humedad relativa y se correlacionan con los parámetros de secado [Tôgrul and Pehlivan, 2004]. Por lo que durante las últimas décadas, la mayoría de los trabajos describen experimentos de secado en capa fina con modelos matemáticos adecuados que pueden ser teóricos, semiempíricos y puramente empíricos, siendo los modelos semiempíricos los más utilizados [Madamba et al., 1996].

Los modelos teóricos tienen en cuenta solo la resistencia interna a la transferencia de humedad, estableciendo las ecuaciones de los fenómenos de transporte. Mientras que los modelos semiempíricos se derivan generalmente mediante la simplificación de la solución general en serie de la segunda ley de Fick o la modificación de modelos simplificados. Por último, los modelos empíricos derivan una relación directa entre el contenido de humedad promedio y el tiempo de secado, descuidando los fundamentos del proceso de secado. Sus parámetros no tienen significado físico y para obtenerlos se utilizan los datos de los diversos experimentos de secado [Kiranoudis et al., 1997; Özdemir and Onur Devres, 1999].

En la **Tabla 2.2** se muestran algunos modelos que se ocupan para describir el secado de diferentes frutas y verduras.

En la actualidad existen muchos trabajos que describen la cinética de secado de diferentes frutas y verduras en donde los principales modelos que ocupan para ajustar la cinética son modelos semiempíricos como Newton, Page y Midilli-Kucuk, estos modelos tienen diversos parámetros como k, n, a, etc. En este trabajo se utiliza el modelo de Newton en donde k se representa mediante un polinomio.

Tabla 2.2: Principales modelos matemáticos de cinética de secado [Özdemir and Onur Devres, 1999; Ekka and Palanisamy, 2020].

Modelo	**Expresión matemática**
Newton	$MR^a = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Page modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$
Henderson & Pabis	$MR = a\exp(-kt)$
Logarítmico	$MR = a\exp(-kt) + c$
Midilli & Kucuk	$MR = a\exp(-kt) + bt$
Dos términos	$MR = a\exp(-kt) + b\exp(-k_1 t)$
Dos términos exponenciales	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$
Verma	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$
Wang & Sing	$MR = a + at + bt^2$
Thompson	$t = aln(MR) + b(\ln(MR))^2$

[a]Moisture Ratio

Un ejemplo de estos trabajos sobre la cinética de secado es el que se realizó en 2006, en él se obtuvo la cinética de secado de la manzana golden. El mejor modelo que predice la cinética fue el de Midilli-Kucuk. También, presentaron su ecuación (Ec. 2.9), en donde T es la temperatura del aire, V es la velocidad del aire y t es el tiempo [Menges and Ertekin, 2006]:

$$MR = (1{,}4678 - 0{,}0067T)exp(-1{,}0835V^{0{,}1316}t^{0{,}8867}) + 0{,}0030t \tag{2.9}$$

Mientras que, [Ceylan et al., 2007] trabajaron en la ecuación de cinética del kiwi, plátano y aguacate obteniendo diversas ecuaciones para los modelos de Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis, Wang y Singh y logarítmico. Obteniendo el mejor ajuste con los modelos de Newton y Page. Las ecuaciones obtenidas con el modelo de Newton son las que se utilizaron para verificar la técnica de estimación desarrollada en este trabajo. Esta cinética tiene una forma polinomial de 3 parámetros, dos multiplicados por las variables de velocidad V y temperatura del aire T y un parámetro independiente.

$$MR_{\text{kiwi}} = \exp((2{,}97128 - 0{,}3536V - 0{,}07407T)t) \tag{2.10}$$

$$MR_{\text{aguacate}} = \exp((-4{,}625 + 0{,}01758V + 0{,}11532T)t) \tag{2.11}$$

$$MR_{\text{plátano}} = \exp((-2{,}58116 - 0{,}00381V + 0{,}06437T)t) \tag{2.12}$$

Existen numerosos ejemplos como los modelos antes presentados para diferentes productos. Para obtener una representación correcta, se debe seleccionar el modelo que mejor describa el comportamiento de secado con intervalos amplios de las variables del proceso. Uno de los modelos más utilizados es el de Newton, mismo modelo que se utiliza en este trabajo. Una vez que que se determina el modelo, es fundamental obtener los parámetros que conforman a k. Existen diferentes maneras para estimar dichos parámetros, las cuales se discuten en el siguiente apartado.

2.3. Estimación de parámetros

Con el avance computacional, los investigadores han desarrollado técnicas para estimar con precisión los parámetros de los sistemas estudiados. Un claro ejemplo es la industria aeroespacial la cual ha buscado estrategias para determinar los parámetros conforme su variación en el tiempo.

Actualmente, en el ámbito agroindustrial se ha buscado la manera de estimar los parámetros involucrados en el secado. Estos juegan un rol importante para identificar, controlar, diseñar y optimizar secadores con el propósito de entregar un producto de calidad. Para esto se han desarrollado diversos modelos matemáticos dinámicos que cuentan con una serie de parámetros que son importantes en el desarrollo y ejecución de ellos.

La estimación e identificación de parámetros son uno de los pasos involucrados en la formulación y validación de los modelos matemáticos que describen los procesos de interés. La estimación de parámetros se refiere al proceso de obtención de valores de los parámetros a partir de la comparación entre los valores calculados basados en el modelo

y el conjunto de mediciones (datos). A diferencia de la identificación de parámetros, la cual implica el desarrollo de un modelo solo a partir de datos de entrada/salida [Englezos and Kalogerakis, 2001].

Estos modelos matemáticos dinámicos pueden dividirse en 2 categorías importantes de acuerdo a si está en función relativa a la entrada y salida o en función a estados internos del sistema. En el primer caso, los parámetros del modelo se incluyen explícitamente, y en el segundo de forma implícita, esto se deriva en la siguiente clasificación [Isermann and Münchhof, 2011]:

- Modelos paramétricos (modelos con estructura y número finito de parámetros).
- Modelos no paramétricos (modelos sin estructura específica y un número infinito de parámetros).

El modelo estudiado en este trabajo es el paramétrico. Para encontrar sus parámetros existen dos enfoques básicos en la estimación: 1) estimación estadística basada en los datos disponibles y 2) utilización de estimaciones de parámetros genéricos basados en estudios previos [SNL & NRC, U. S.]. Aunado a estos enfoques, también se puede abordar con una estrategia convencional de 2 pasos, primero se identifican los parámetros del proceso en una configuración fuera de línea y luego se usa el modelo identificado para la estimación en tiempo real [Yang et al., 2020].

Cuando se habla de configuración fuera de línea (acoplamiento indirecto), se dice que los datos adquiridos o medidos son almacenados y posteriormente evaluados mediante software especializado. Mientras que cuando se refiere a configuración en línea (acoplamiento directo entre computadora y proceso), la identificación se realiza de forma paralela al experimento, los datos se procesan inmediatamente que están disponibles [Isermann and Münchhof, 2011].

Existen diversos métodos para determinar los parámetros de los modelos matemáticos dinámicos, estos deben de ser elegidos de acuerdo a su estructura con la finalidad de que los resultados obtenidos sean lo más precisos. Aquí se presentan los más relevantes y utilizados:

- Determinación de valores característicos: este es el método más simple y se basa en las respuestas de impulso o paso medido, para calcular los parámetros de modelos simples, se utilizan tablas y diagramas [Isermann and Münchhof, 2011].

- Estimación de parámetros: este es uno de los modelos más utilizados, en este método se ajustan los datos experimentales a una expresión matemática como pueden ser polinomios, ecuaciones lineales, exponenciales, etc., con el fin de obtener los valores de los parámetros que minimizan el sumatorio de los residuales al cuadrado.

- Métodos de optimización iterativa: este método pueden ocuparse con sistemas no lineales, para esto es necesario emplear técnicas de optimización no lineal [Isermann and Münchhof, 2011].

- Métodos basados en subespacios: este es un método que se utiliza en gran medida ya que tiene gran éxito para la estimación de parámetros. En este método se utilizan relaciones lineales entre variables, lo que permite simplificar el análisis del sistema. La complejidad es proporcional al orden del sistema, siempre se tiende a obtener modelos con bajo orden como sea posible. En la identificación del subespacio, el modelo reducido se puede obtener directamente, sin tener que calcular primero el modelo de orden superior, y esto directamente a partir de los datos de entrada y salida [Van Overschee and De Moor, 1996].

- Redes neuronales: Este es uno de los nuevos métodos que se están ocupando para la estimación de parámetros debido a la gran capacidad de aprender y generalizar, se han obtenido buenos resultados. Una red neuronal es un modelo matemático que se asemeja a la red neuronal biológica, la cual está compuesto por un gran número de elementos procesales organizados en niveles [Cuatle, 2018].

- Filtro de Kalman: Teóricamente, se le conoce como estimador de mínimos cuadrados medios lineales porque minimiza el error de estimación cuadrático medio para un sistema estocástico lineal o estimador cuadrático lineal porque minimiza una función cuadrática de error de estimación para un sistema dinámico lineal.

Es utilizada para estimar los estados del sistema dinámico permitiendo hacerlo de manera paralela [Grewal and Andrews, 2008].

Con algunos de estos métodos se han calculado parámetros relacionados con la humedad, con el aire y con la transferencia de calor [Oueslati et al., 2012; Ekka and Palanisamy, 2020]. En la literatura casi no existe estimación de parámetros en línea para el proceso de secado, en su mayoría los trabajos reportados estimaron los parámetros fuera de línea, es decir, con los datos experimentales que obtuvieron y procesaron. A continuación, se presentan algunos de estos trabajos enfocados en diversos aspectos del secado.

En 1984 se realizaron experimentos para obtener parámetros cinéticos a partir de datos experimentales utilizando 2 métodos, regresión múltiple lineal y regresión lineal, en el primer caso supusieron una concentración inicial constante mientras que en el segundo una concentración inicial variable [Arabshahid and Lund, 1985].

Haralampu et al. (1985) realizaron un estudio para estimar los parámetros del modelo de Arrenhius utilizando 3 métodos diferentes: Regresión lineal separada, regresión lineal múltiple y regresión no lineal de mínimos cuadrados, siendo este último el que mejor proporciona una estimación imparcial y precisa de los parámetros.

El método que más se ha utilizado para problemas de respuesta única es mediante minimizar la desviación estándar media entre los valores experimentales y calculados. Para conocer parámetros de diferentes frutas ocuparon el método no lineal de Levenberg-Marquard en la forma del algoritmo de la subrutina ZXSSQ/IMSL [Kiranoudis et al., 1997].

Por otra parte, Tôgrul and Pehlivan (2004) utilizaron análisis de regresión lineal múltiple para obtener los valores de los parámetros como la temperatura superficial y la humedad relativa de la superficie exterior para uvas, chabacano y duraznos.

Mientras que en 2020, el grupo de Ivanova diseñaron un esquema de control el cual estaba acoplado al proceso para estimar los parámetros del agente de secado en línea para la uva en función de la temperatura y el contenido de humedad del aire ambiente,

la humedad actual del material y la calidad deseada del producto [Ivanova et al., 2020].

Como se observa, en la literatura existen más trabajos sobre la estimación de parámetros para productos agroindustriales fuera de línea que en línea. Por lo que, este trabajo tiene relevancia ya que hacer la estimación de parámetros de la cinética de secado con forma polinomial en línea trae grandes beneficios al proceso como la rápida respuesta al cambio de condiciones o un mejor control.

2.4. Control del Proceso

El control de proceso hoy en día se ha vuelto indispensable en todas las industrias debido a la alta exigencia de calidad y demanda de los productos. Las empresas han invertido en sistemas tecnológicos que permitan controlar y automatizar sus plantas con la finalidad de satisfacer los requerimientos y aumentar su capacidad.

El uso y estudio de técnicas de control de procesos comenzó desde el siglo XVIII por James Watt´s. A partir de esa época se han desarrollado diferentes teorías de control clasificadas en control clásico, control moderno y control robusto. A su vez, también se puede clasificar por las técnicas usadas en: control continuo, control digital y control de eventos discretos [Lewis and Yang, 1999; Seborg et al., 2011].

El control clásico o control convencional está basado principalmente en los métodos de respuesta de frecuencia y del lugar de las raíces, fue aplicado primeramente para sistemas en donde solo hay una entrada y una salida, ya que en sistemas con más entradas y salidas su efectiva se vuelve limitada provocando que fuera difícil mantenerlo [Ogata, 2010].

El control moderno se basa en el análisis de la variación de las variables del sistema a lo largo del tiempo. La teoría de control moderna simplificó el diseño de los sistemas de control porque la teoría se basa en un modelo de un sistema de control real, el cual tiene múltiples entradas y salidas. Se ha orientado en control óptimo de sistemas tanto determinísticos como estocásticos [Perez et al., 2007; Ogata, 2010].

Una teoría que ha tomando relevancia es la de control robusto, la cual utiliza la

suposición de que los modelos que usamos en el diseño de sistemas de control tienen errores de modelado. La gran diferencia que tiene con la teoría de control moderno es que supone que existe una incertidumbre o error entre la planta real y su modelo matemático, incluyendo dicha incertidumbre o error en el proceso de diseño del sistema de control, lo que permite mejorar la precisión del control [Ogata, 2010].

2.4.1. Estrategias de control

Los investigadores con apoyo de la tecnología e innovaciones en el diseño de controladores han buscado mejorar los procesos de manera en la que se disminuya el costo de producción, incrementando el rendimiento y manteniendo el producto con su calidad deseada. Para eso han diseñado, probado y mejorado los controladores con la finalidad de cumplir con ese objetivo.

En el proceso de secado se han utilizado en su mayoría controladores con consigna (set point); es decir, controladores que mantienen su referencia durante todo el proceso o solo cambian si se requiere alcanzar otro valor, estos son muy utilizados para regular temperaturas, velocidad y humedad.

Por otra parte, existen los controladores de seguimiento de trayectorias los cuales no han sido utilizados en el proceso de secado, pero sí en otros procesos como el movimiento de un robot o vehículo autónomo, sistemas de levitación magnética [Beltran-Carbajal et al., 2015; Li et al., 2023; Yan et al., 2024]. Este enfoque tiene ventajas, ya que al hacer que se ajuste constantemente a una trayectoria especificada, permite obtener una mayor uniformidad en el secado lo que conlleva a una mejor calidad del producto y a su vez, puede mejorar la eficiencia energética.

2.4.2. Control en secadores de productos agroindustriales

Después de la creación del controlador PID en 1942, pasaron 37 años para la primera aplicación real al proceso de secado, ya que Liapis y Litchfield observaron los beneficios que tendría la industria si se controlaba el secador para mejorar la calidad del producto y disminuir el consumo energético, entre otras cosas [Dufour, 2006]. A partir de esto,

se comenzaron a realizar investigaciones para diferentes tipos de secadores y de plantas secadoras con la finalidad de encontrar y probar controladores que mejoraran el proceso de secado.

En la última década se han realizado diversas investigaciones para controlar el proceso del secado, por ejemplo, el trabajo que realizó Reyes et al. (2014) en donde desarrollaron un controlador multivariable con lógica difusa para un secador hibrido solar. Ellos regularon la apertura de cada válvula de aire ubicada después del panel solar y del acumulador solar. Logrando mejorar la eficiencia térmica del proceso y obteniendo un tiempo de secado de 11 h para los champiñones.

En 2016, en busca de mejorar la eficiencia térmica de los secadores híbridos solar-gas propusieron un controlador PI para regular el flujo de gas y mantener la temperatura de secado en el rango de 45°C, 50°C y 55°C. El tiempo de respuesta para alcanzar la temperatura deseada fue de alrededor de 5 min y para estabilizarlo en el valor requirieron de aproximadamente 100 min Zoukit et al. (2016).

Abdullah et al. (2020), diseñaron un control inferencial basado en modelos no lineales de la humedad de leche de coco, utilizando un enfoque empírico con entrada exógena y red neuronal para predicción rápida y precisa de la respuesta de salida del control. En donde, obtuvieron buena respuesta en condiciones operativas de proceso más amplias y un rechazo de perturbaciones aceptable. El único inconveniente es que el rendimiento de este controlador depende netamente de las reglas de sintonización utilizadas.

Mientras que en 2022, se realizó e implementó un enfoque de control cascada para controlar la temperatura de secado regulando el flujo de gas de acuerdo a la energía solar recibida para un secador hibrido solar-gas por lo que diseñaron 2 controladores PI no lineales. Este enfoque mostró buena respuesta al rechazo de perturbaciones durante el proceso y satisfizo el rendimiento deseado del sistema en términos de precisión [Zoukit et al., 2022].

Así mismo, Abdenouri et al. (2022) compara un controlador PI con un controlador lógico difuso para un secador híbrido solar-eléctrico indirecto. Logrando reducir el con-

sumo de energía en un 11.3 % y recuperando el rendimiento del secador en menos de 8 minutos después de una perturbación en la temperatura.

Como se presentó en esta sección, el estudio por encontrar un controlador que permita mejorar el proceso de secado sigue siendo de gran importancia, ya que se siguen desarrollando investigaciones para conseguirlo. Realizar la estimación de parámetros desconocidos de la cinética de secado en línea para poder emplearlos en el diseño e implementarlos en un controlador puede ayudar a obtener una mejor y más rápida respuesta del control, con la finalidad de aumentar la producción manteniendo la calidad.

2.4.3. Estado del arte

Conforme a la revisión de la literatura que se ha realizado, solo se ha encontrado un trabajo en el cual estimen los parámetros de la cinética de secado en línea para el modelo de Lewis, mismo que se ocupa en este trabajo. Así mismo, se aplica un control óptimo para mejorar el proceso de secado de las uvas. El diagrama de control se muestra en la **Fig. 2.6**, en donde los parámetros del contenido de humedad se calculan según el modelo del proceso de secado para después utilizarlos en la obtención de los parámetros óptimos de temperatura y velocidad ($T(n)$ y $v(n)$).

De la revisión realizada en la literatura se puede concluir que no existe mucha información de procesos que estimen los parámetros de la cinética de secado en línea para utilizarlos en controladores de referencia y trayectoria. Por lo que este trabajo toma gran relevancia ya que contribuye en el desarrollo de procesos que permitan disminuir su consumo energético manteniendo la calidad tanto física como nutricional.

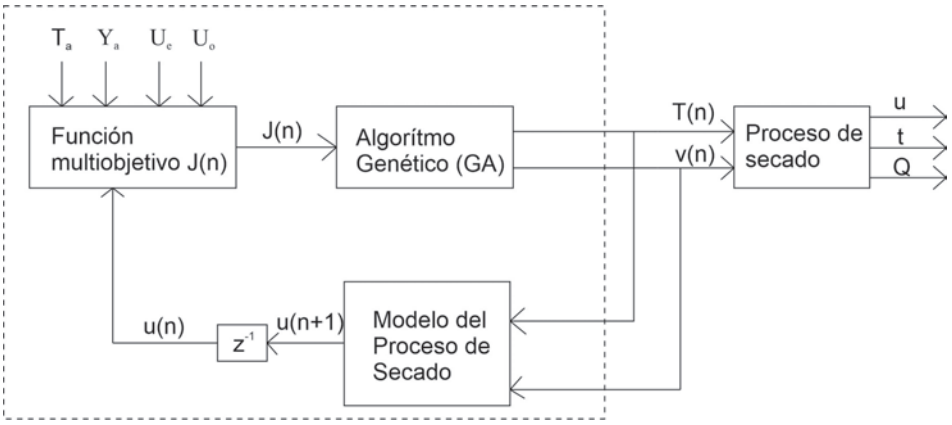

Figura 2.6: Diagrama de bloques del control óptimo propuesto por [Ivanova et al., 2020].

Capítulo 3

Modelado y Control del proceso de secado

En este capítulo se desarrolla y análiza el modelo dinámico del proceso de secado utilizado en este trabajo para un secador híbrido solar-gas. Por otra parte, se presenta el fundamento teórico y el desarrollo de los 3 diferentes controladores que se utilizaron para este proceso. Se aplicaron dos controladores para realizar seguimiento de trayectoria, el primero fue el control en dos etapas y el segundo el control de modo deslizante. Con la finalidad de probar la técnica de estimación de parámetros desarrollada en controladores por consigna, se implementó un control no lineal basado en linealización por retroalimentación del estado.

3.1. Modelo dinámico del Proceso de Secado

Como se describió en el marco teórico, la parte importante para diseñar un controlador que permita regular las condiciones del proceso y mejorar su operación, es mediante el desarrollo de un modelo matemático que describa el proceso de secado el cual se elabora con los balances de materia y energía.

Para lograr desarrollar un modelo matemático es importante realizar ciertas suposiciones que permitan simplificar algunos fenómenos que suceden en el proceso, ya que no

es posible desarrollar un modelo que describa exactamente el proceso. En este modelo se realizaron las siguientes suposiciones:

- El contenido de humedad del producto es uniforme en cualquier punto.
- Las rebanadas se consideran uniformes dentro del secador.
- Se desprecia la transferencia de masa y de energía desde el exterior del secador.
- Se desprecia la transferencia de calor entre las paredes del túnel, las bandejas y el aire de secado.
- Las propiedades termodinámicas y de transporte son considerados constantes.

Tomando en consideración las suposiciones anteriores para la descripción del modelo y considerando el trabajo de Pakowski and Mujumdar (2006), quienes mediante balances de materia y energía, desarrollaron un modelo para describir el proceso de secado con respecto a la cantidad de agua contenida en el producto. Esto llevo a obtener la siguiente ecuación la cual describe un proceso continuo de secado

$$m_{fA1}X_{A1} - m_{fA2}X_{A2} - W_D A = m_s \frac{dX}{dt} \tag{3.1}$$

En donde m_{fA1} y m_{fA2} son el flujo másico del aire de entrada y salida respectivamente. X_{A1}, X_{A2} corresponden al contenido de humedad del aire tanto en la entrada como en la salida y X es el contenido de humedad del producto. Mientras que, m_s es la masa del producto seco y $W_D A$ describe la velocidad de secado.

Para fines de este trabajo, se considera el proceso de la planta de secado INNOCACY ubicada en el estado de Morelos en Xochitepec. Este proceso se lleva a cabo de manera intermitente o batch debido al tiempo que requieren los productos agroindustriales para secarse. Por lo que, en la ecuación anterior, no se considera la entrada y salida del aire, solo el término de la velocidad de secado del producto agroindustrial, quedando de la siguiente manera.

$$m_s \frac{dX}{dt} = -W_D A \tag{3.2}$$

con

$$W_D A = k m_s (X - X_e) \tag{3.3}$$

En donde X y X_e son el contenido de humedad en el tiempo y el contenido de humedad de equilibrio del producto, a su vez, k es la constante de la cinética de secado. La ecuación final que describe al contenido de humedad se representa como:

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \tag{3.4}$$

Junto con la ecuación anterior, Pakowski and Mujumdar (2006) realizaron balances de energía al proceso, con los cuales se obtuvieron dos ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de la temperatura del producto (Tp) y la temperatura del aire (T_A) con respecto al tiempo. En la **Tabla 3.1** se presenta el significado de cada parámetro que representa a las propiedades físicas y fisicoquímicas utilizadas en el modelo. Mientras que los valores de las constantes mencionadas se pueden observar en las **Tablas A.1-A.2** en la sección de apéndice.

$$\frac{dTp}{dt} = \frac{hA_p(T_A - Tp)}{(Cp_s - Cp_w X)m_s} + \frac{k(X - X_e)((Cp_w - Cp_v)Tp - \Delta h_{V0})}{(Cp_s - Cp_w X)} \tag{3.5}$$

$$\frac{dT_A}{dt} = \frac{m_{fA}(T_{A0} - T_A)}{M_A} + \frac{Q_f}{M_A Cp_A} - \frac{hA_p(T_A - Tp)}{M_A Cp_A} + \frac{h_{AV} k m_s (X - X_e)}{M_A Cp_A} \tag{3.6}$$

Tabla 3.1: Nomenclatura del modelo dinámico del proceso de secado

Símbolo	**Descripción**
Cp_A	*Calor específico del aire*
Cp_w	*Calor específico del agua*
Cp_v	*Calor específico del vapor de agua*
Cp_s	*Calor específico del sólido*
m_{fA}	*Flujo másico del aire*
M_A	*Masa del aire*
h	*Coeficiente convectivo de transferencia de calor*
A_p	*Área de transferencia de calor*
Q_f	*Flujo de calor aplicado*
Δh_{V0}	*Calor latente de vaporización*
h_{AV}	*Entalpía de vapor que emane del sólido*

La entalpía de vapor que emane del sólido h_{AV}, se calcula con la siguiente expresión (3.7).

$$h_{AV} = Cp_v Tp + \Delta h_{V0} \tag{3.7}$$

Estas tres ecuaciones diferenciales (3.4 - 3.6) junto con la ecuación de la cinética de secado que es representada mediante un polinomio, permiten simular el modelo de la dinámica del proceso de secado para diferentes productos agroindustriales.

3.1.1. Cinética de Secado

Como ya se comentó, una parte importante para el modelo dinámico antes expuesto es la cinética de secado de los diversos productos agroindustriles la cual puede estar representada como una ecuación de Newton, de Page, Logarítmica, etc. En este trabajo se utilizan cinéticas que tienen la estructura de la ecuación de Newton en forma polinomial. Algunas ecuaciones utilizadas en este trabajo son las siguientes:

Tabla 3.2: Constantes de cinética de secado.

Autor	**Producto**	**Constante cinética**	**Rango de operación**
[Ceylan et al., 2007]	Kiwi	$MR = \exp((2{,}97128 - 0{,}03536 \cdot V - 0{,}07407 \cdot T_A)\, t)$	$V = 0{,}03 - 0{,}39\,\text{m/s}$, $T_A = 39{,}8 - 40{,}2\,^\circ\text{C}$
[Ceylan et al., 2007]	Aguacate	$MR = \exp((-4{,}625 + 0{,}01758 \cdot V + 0{,}11532 \cdot T_A)\, t)$	$V = 0{,}03 - 0{,}39\,\text{m/s}$, $T_A = 39{,}8 - 40{,}2\,^\circ\text{C}$
[Ceylan et al., 2007]	Plátano	$MR = \exp((-2{,}58116 - 0{,}00381 \cdot V + 0{,}06437 \cdot T_A)\, t)$	$V = 0{,}03 - 0{,}39\,\text{m/s}$, $T_A = 39{,}8 - 40{,}2\,^\circ\text{C}$
[Kaleemullah and Kailappan, 2006]	Chile Rojo	$MR = \exp((-7{,}6x10^{-3} + 2x10^{-4} \cdot T_A)\, t)$	$V = 1\,\text{m/s}$, $T_A = 45 - 65\,^\circ\text{C}$
[El-Beltagy et al., 2007]	Fresa	$MR = \exp((5{,}26x10^{-3} + 5{,}7x10^{-4} \cdot T_A)\, t)$	$T_A = 35 - 46{,}8\,^\circ\text{C}$

Con el modelo dinámico del proceso de secado y la cinética de secado se pueden desarrollar diversos controladores que permitan mantener las condiciones de operación. Los siguientes controladores fueron elegidos debido a la gran respuesta que han tenido en sistemas mecánicos y eléctricos en nuestro grupo de trabajo.

3.2. Control del proceso de secado

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron varias técnicas de control para el proceso de secado, con la finalidad de observar cómo afecta la estimación de parámetros en el desarrollo del control. Se utilizó un controlador por consigna ya utilizado por el grupo de trabajo el cual presentó buena respuesta ante los diversos escenarios. A su vez, se probaron controladores para seguimiento de trayectoria con la finalidad de evaluar su desempeño.

En cada controlador probado, la entrada de control es el calor suministrado Q_f tanto para la consigna como para el seguimiento de trayectoria. Por otra parte, la salida de control es la temperatura del producto T_p. El esquema de control general para el proceso de secado es el que se muestra en la **Fig. 3.1**, en donde Z incluye las variables de salida. Para el estimador las variables de salida son el contenido de humedad, la temperatura del aire y del producto. Mientras que para el controlador solo la temperatura del producto. Es importante recalcar que mediante la temperatura del aire es como se eleva la temperatura del producto, ya que el calor se suministra al aire.

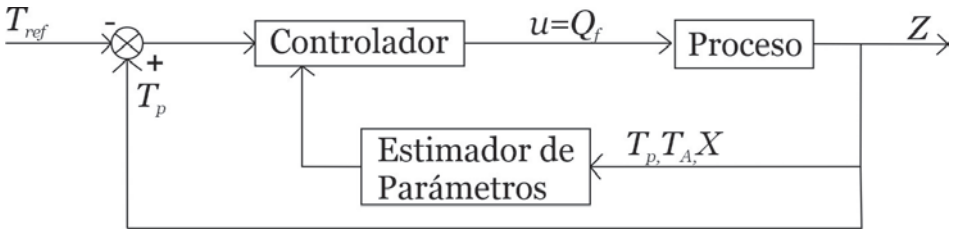

Figura 3.1: Esquema de control general del proceso de secado.

3.2.1. Control no lineal basado en linealización por retroalientación del estado

Este controlador fue probado en el grupo de trabajo mostrando un gran comportamiento para diferentes productos agroindustriales como el kiwi, plátano y aguacate [Vázquez, 2023].

El fundamento teórico de este control indica que se debe derivar la salida del sistema con respecto al tiempo las veces necesarias para obtener una ecuación diferencial que relacione la salida de control y con la entrada de control u, en donde, $y = T_p$ y $u = Q_f$.

Para desarrollar el controlador, primero se considera una salida de control auxiliar ν_c (regulador del error) que considere la entrada de control ec. (3.8) [Correa, 2016; Serón and Braslavsky, 2001]. Para utilizar la salida de control auxiliar se define la dinámica de la temperatura del producto mediante su segunda derivada, ya que en esta derivada se obtiene la entrada de control u.

$$\nu_c = f + \gamma u \tag{3.8}$$

$$\frac{d^2 T_p}{dt^2} = \nu_c \tag{3.9}$$

Con la dinámica lineal a lazo cerrado descrita en (3.9), la señal de regulación puede diseñarse de forma que la salida tienda a la referencia, por lo que, se define la ecuación de la siguiente forma:

$$\nu_c = -\alpha_2 \dot{e} - \alpha_1 e - \alpha_0 \int_{t_0}^{t} e dt \tag{3.10}$$

en donde e corresponde al error entre la salida del controlador y el valor de referencia.

$$e = T_p - T_{ref}$$

La ecuación (3.10) se iguala con la segunda derivada de la ecuación del error y se derivan. Se obtiene la dinámica del error ec. (3.11). Para seleccionar las ganancias del controlador se propone un polinomio característico de Hurwitz, con el cual se garantice

que el error tienda a 0 ec. (3.12).

$$\dddot{e} + \alpha_2\ddot{e} + \alpha_1\dot{e} + \alpha_0 e = 0 \tag{3.11}$$

$$P(s) = s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 \tag{3.12}$$

Para obtener los parámetros de α_i con $i = 0, 1, 2$, se expresa el polinomio de Hurwitz de la siguiente manera:

$$P(s) = (s+p)^3 = s^3 + 3ps^2 + 3p^2 s + p^3 \tag{3.13}$$

en donde $\alpha_2 = 3p, \alpha_1 = 3p^2, \alpha_0 = p^3$, p es la ganancia del controlador.

3.2.2. Control en dos etapas para el seguimiento de trayectorias

Partiendo del modelo del proceso de secado explicado en la **sección 3.1**, se realiza una manipulación algebraica con la finalidad de que quede agrupado, permitiendo que constantes y variables se observen a simple vista. A su vez, se hace un cambio de variables quedando de la siguiente forma.

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \tag{4.14a}$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \dot{\varphi_1} = g_1\varphi_1 + g_2\varphi_2 + \xi(X, \varphi_1) \tag{4.14b}$$

$$\frac{dT_A}{dt} = \dot{\varphi_2} = \gamma u + \rho(X, \varphi_1, \varphi_2) \tag{4.14c}$$

en donde γ, g_1 y g_2 son diferentes de 0 y constantes. ξ y ρ son los términos que dependen de las diferentes variables del proceso.

$$g_1 = -\frac{hA_p}{m_s(Cp_s + Cp_w X)}; \quad g_2 = \frac{hA_p}{m_s(Cp_s + Cp_w X)}$$

$$\xi = \frac{k(X - X_e)((Cp_w - Cp_v)\varphi_1 - \Delta h_{v0})}{(Cp_s + Cp_w X)}$$

$$\rho = \frac{\dot{m}_A(T_{A0} - \varphi_2)}{M_A} - \frac{hA_p(\varphi_2 - \varphi_1)}{M_A Cp_A} + \frac{h_{AV} k m_s (X - X_e)}{M_A Cp_A}$$

$$\gamma = \frac{1}{M_A Cp_A}; \quad u = \dot{Q}$$

Para seguir la trayectoria (y_1^*) en este controlador, se define el error de seguimiento como:

$$e_{\varphi_1} = \varphi_1 - y_1^* \tag{3.15}$$

$$\varphi_1 = e_{\varphi_1} + y_1^*$$

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{e}_{\varphi_1} + \dot{y}_1^* \tag{3.16}$$

Por lo tanto, tenemos que

$$\dot{e}_{\varphi_1} + \dot{y}_1^* = g_1\varphi_1 + g_2\varphi_2 + \xi \tag{3.17}$$

Con la ecuación anterior se comienza la primera etapa del controlador en donde se obtendrá la dinámica del error de seguimiento de referencia. Para esto, se propone una entrada que permita que el error tienda a 0:

$$\dot{e}_{\varphi_1} = g_1\varphi_1 + g_2\varphi_2 + \xi - \dot{y}_1^* = -\alpha e_{\varphi_1} \tag{3.18}$$

De la ecuación (3.18) se despeja φ_2 y se obtiene el controlador para el seguimiento de trayectoria de referencia de φ_2.

$$\varphi_2 = \frac{1}{g_2}(\dot{y}_1^* - \alpha e_{\varphi_1} - g_1\varphi_1 - \xi) \tag{3.19}$$

en donde $\alpha > 0$. Para la segunda etapa del control consideramos que:

$$y_2^* = \frac{1}{g_2}(\dot{y}_1^* - \alpha e_{\varphi_1} - g_1\varphi_1 - \xi) \tag{3.20}$$

$$\dot{y}_2^* = \frac{1}{g_2}(\ddot{y}_1^* - \alpha \dot{e}_{\varphi_1} - g_1\dot{\varphi}_1 - \dot{\xi}) \tag{3.21}$$

Como se realizó en la ecuación (3.15), se define el error de seguimiento de trayectoria para la temperatura del aire.

$$e_{\varphi_2} = \varphi_2 - y_2^* \tag{3.22}$$

$$\varphi_2 = e_{\varphi_2} + y_2^*$$

$$\dot{\varphi}_2 = \dot{e}_{\varphi_2} + \dot{y}_2^*$$

Con la ecuación (3.22) se realiza el mismo procedimiento utilizado en la etapa 1 para obtener la siguiente expresión.

$$\dot{e}_{\varphi_2} = \gamma u + \rho(X, \varphi_1, \varphi_2) - \dot{y}_2^* \tag{3.23}$$

Se impone la siguiente dinámica de referencia para el error

$$\ddot{e}_{\varphi_2} + \beta_1 \dot{e}_{\varphi_2} + \beta_0 e_{\varphi_2} = 0, \tag{3.24}$$

con β_1 y $\beta_0 > 0$.

Se integra una vez la ecuación (3.24) para poder igualarla con la ecuación (3.23) y se obtiene la expresión matemática (3.25).

$$\dot{e}_{\varphi_2} = \gamma u + \rho(X, \varphi_1, \varphi_2) - \dot{y}_2^* = -\beta_1 e_{\varphi_2} - \beta_0 \int_{t_0}^{t} e_{\varphi_2} dt \tag{3.25}$$

Para obtener la entrada de control, se despeja de la ecuación anterior u.

$$u = \frac{1}{\gamma}[\dot{y}_2^* - \rho(X, \varphi_1, \varphi_2) - \beta_1 e_{\varphi_2} - \beta_0 \int_{t_0}^{t} e_{\varphi_2} dt] \tag{3.26}$$

Por último, para obtener el valor de los parámetros de diseño para la dinámica del error de seguimiento β_1 y β_0, se propone un polinomio característico estable (Hurwitz).

$$P_{\varphi_2}(s) = s^2 + \beta_1 s + \beta_0 \tag{3.27}$$

$$P_{d\varphi_2}(s + p)^2 = s^2 + 2ps + p^2 \tag{3.28}$$

con $\beta_1 = 2p, \beta_0 = p^2$ y $p \gg \alpha$.

3.2.2.1. Polinomio de Bézier

En este trabajo se utilizó la planificación de trayectorias, estas suelen expresarse como una función paramétrica del tiempo en las que se proporciona en cada instante la temperatura deseada. Se puede clasificar como se muestra en la **Fig. 3.2** [Biagiotti and Melchiorri, 2008].

En el caso de esta investigación se utilizó una trayectoria unidimensional de multipuntos, el método utilizado es la interpolación ya que se espera que se siga la trayectoria exactamente. Existen diversas curvas que utilizan interpolación, pero se centro en el uso de curvas de Bézier, ya que son curvas suaves y solo requieren de una pequeña cantidad de puntos para calcular el resto de los puntos a lo largo de la curva [Guo et al., 2012].

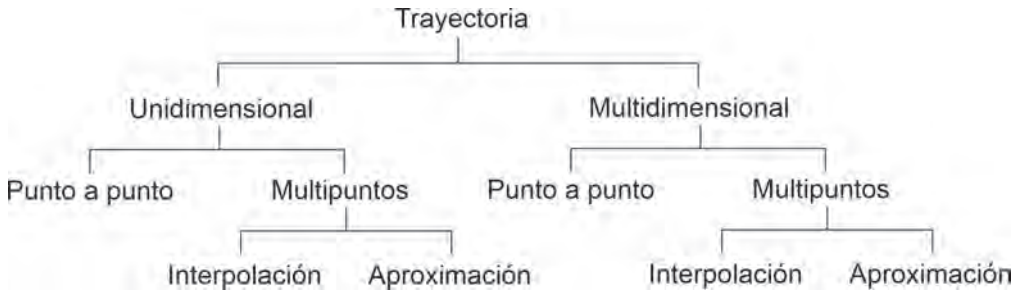

Figura 3.2: Clasificación de Trayectorias [Biagiotti and Melchiorri, 2008].

Este tipo de curvas tiene varias propiedades atractivas como [Biswas and Lovell, 2008]:

- Siempre se interpolan los puntos de control finales, y la línea que une 2 puntos consecutivos en cada extremo es una tangente a la curva en ese punto final.
- Tienen la propiedad de disminuir la variación, es decir, no exhiben ningún comportamiento oscilante sobre ninguna línea con mas frecuencia que una secuencia de líneas que unen los puntos de control.
- Tienen la propiedad de independencia de eje, es decir, el dibujo de la curva no depende de ningún eje.

- Son invariantes afines.
- La determinación del orden polinomial al dibujar una curva es fácil y directa. Siempre es un orden menos que el número de vértices o puntos de control de la curva.

La ecuación con la que se pueden obtener los polinomios de Bézier es la siguiente, esta ya se encuentra normalizada [Biagiotti and Melchiorri, 2008; Beltran-Carbajal et al., 2023]:

$$B = \sum_{i}^{m} r_i \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right)^i \tag{3.29}$$

$$r_i = \frac{m!}{(m-i)!} \sum_{j}^{i} \frac{(-1)^{j+i}}{j!(i-j)!} P_j \tag{3.30}$$

donde m es el grado del polinomio y P_j son los puntos de control.

Por lo tanto, la planificación de la trayectoria de referencia basada en la curva de Bézier $y^*(t)$ para el control de temperatura del producto desde una temperatura inicial $\bar{y}_i$ hasta la temperatura de operación $\bar{y}_f$ en el intervalo de tiempo $[T_1, T_2]$ queda de la siguiente manera:

$$y^*(t) = \begin{cases} \bar{y}_i, & \text{si } 0 \leq t \leq T_1 \\ \bar{y}_i + (\bar{y}_f - \bar{y}_i)B, & \text{si } T_1 \leq t \leq T_2 \\ \bar{y}_f, & t > T_2 \end{cases} \tag{3.31}$$

En este trabajo se utilizaron las siguientes trayectorias con estructura de polinomios de Bézier que han sido aplicadas en diversos campos y en el grupo de trabajo [Beltran-Carbajal et al., 2015, 2023].

$$r_1 = 252; \quad r_2 = 1050; \quad r_3 = 1800; \quad r_4 = 1575; \quad r_5 = 700; \quad r_6 = 126$$

$$\begin{aligned} B_1 = \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right)^5 \Bigg[& r_1 - r_2 \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right) + r_3 \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right)^2 \\ & - r_4 \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right)^3 + r_5 \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right)^4 - r_6 \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right)^5 \Bigg] \end{aligned} \tag{3.32}$$

$$r_1 = 10; \quad r_2 = -15; \quad r_3 = 6;$$

$$B_2 = \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1}\right)^3 \left[r_1 + r_2 \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1}\right) + r_3 \left(\frac{t - T_1}{T_2 - T_1}\right)^2\right] \tag{3.33}$$

3.2.3. Control de Modo Deslizante

Este tipo de controladores ha tomado gran relevancia en la industria debido a ser uno de los diseños sistemáticos de controladores robustos para sistemas dinámicos no lineales en condiciones de incertidumbre. En donde la ventaja más importante es su insensibilidad a las variaciones y perturbaciones de los parámetros una vez en el modo deslizante [Camacho, 2005].

Para desarrollar este controlador es importante recordar que se compone de dos partes, una parte continúa y otra parte discontinúa.

$$u(t) = u_C(t) + u_D(t) \tag{3.34}$$

Lo primero que se hace en el desarrollo del controlador es elegir una superficie deslizante $S(t)$. En este caso, se utiliza la presentada por Slotine and Li (1991), una ecuación proporcional integral-diferencial de segundo orden:

$$S(t) = \frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int_{t_0}^{t} e(t)dt \tag{3.35}$$

donde $e(t)$ es el error de seguimiento de la planificación de trayectoria y λ_1 y λ_0 son parámetros de sintonización del controlador. Para continuar con el desarrollo del controlador, se utiliza la condición de deslizamiento, la cual es primordial para la parte continua.

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0$$

Considerando la condición de deslizamiento, se deriva la superficie deslizante elegida previamente (Ec. 3.35).

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{d^2e(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{de(t)}{dt} + \lambda_0 e(t) = 0 \tag{3.36}$$

con $e(t) = T_p - y_1^*(t)$. Sustituyendo para el modelo dinámico de secado, se obtiene la ecuación (3.37)

$$\frac{d^2T_p}{dt^2} - \frac{d^2y_1^*(t)}{dt^2} + \lambda_1\left(\frac{dT_p}{dt} - \frac{dy_1^*(t)}{dt}\right) + \lambda_0(T_p - y_1^*(t)) = 0 \tag{3.37}$$

Considerando que

$$\frac{d^2T_p}{dt^2} = f(X, T_p, T_A) + g(X, T_p, T_A)u(t) \tag{3.38}$$

Por lo tanto, la parte continúa del controlador se expresa de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} u(t) = \frac{1}{g(X, T_p, T_A)}\Bigg[&\frac{d^2y_1^*(t)}{dt^2} - f(X, T_p, T_A) \\ &- \lambda_1\left(\frac{dT_p}{dt} - \frac{dy_1^*(t)}{dt}\right) - \lambda_0\left(T_p - y_1^*(t)\right) + u_D(t)\Bigg] \end{aligned} \tag{3.39}$$

Mientras que, para la parte discontinúa del controlador se propone la siguiente expresión con la finalidad de que el sistema de control pueda reaccionar rápidamente y con fuerza para contrarrestar las perturbaciones.

$$u_D(t) = -K_D sign(S(t)) \tag{3.40}$$

en donde K_D es una constante de ganancia, si el valor de K_D es muy grande puede provocar "chattering".

Finalmente, la entrada de control es representada para este trabajo de la siguiente forma.

$$\begin{aligned} u(t) = \frac{1}{g(X, T_p, T_A)}\Bigg[&\frac{d^2y_1^*(t)}{dt^2} - f(X, T_p, T_A) \\ &- \lambda_1\left(\frac{dT_p}{dt} - \frac{dy_1^*(t)}{dt}\right) - \lambda_0\left(T_p - y_1^*(t)\right) - K_D sign(S(t))\Bigg] \end{aligned} \tag{3.41}$$

con $y_1^*(t)$ representada por la planificación de la trayectoria expuesta en la **sección 3.2.2.1**.

Capítulo 4

Identificación paramétrica

En este capítulo se desarrolla la técnica utilizada para la estimación en línea de la cinética de secado. Se presentan las fórmulas algebraicas y su método de resolución. De igual manera, se desarrolla el método de estimación fuera de línea que se ha utilizado ampliamente en la literatura. Por último se muestran los métodos numéricos utilizados para resolver el sistema y se explica brevemente la función de la plataforma computacional.

4.1. Identificación paramétrica en línea

Una parte esencial de este trabajo es la implementación de una técnica de estimación para obtener los parámetros de la cinética de secado de los productos agroindustriales.

Existen diversas técnicas para estimar los parámetros como se menciona en el apartado de estimación de parámetros. Para esta investigación se propuso usar una identificación paramétrica desde un enfoque algebraico en el dominio del tiempo para sistemas lineales en lazo cerrado, la cual estima parámetros en tiempo real en diversos sistemas mecánicos y eléctricos [Beltran-Carbajal and Silva-Navarro, 2017; Beltran-Carbajal et al., 2018, 2019], el fundamento teórico fue establecido por Fliess and Sira-Ramírez (2003), el cual se basa principalmente en 3 herramientas matemáticas.

1. Teoría de Módulos: Es una rama de la álgebra que utiliza conceptos de álgebra

lineal y teoría de grupos.

2. Álgebra Diferencial: Rama de la álgebra que estudia las estructuras con operaciones de derivación.

3. Cálculo Operacional: Se enfoca en resolver los problemas con ténicas algebraicas.

Para obtener las ecuaciones algebraicas se puede seguir 2 métodos diferentes: uno es mediante el cálculo operacional de Mikunsinkis y el otro es usando integrales, el desarrollo de cada método llega al mismo resultado. A continuación, se desarrolla el método mediante cálculo operacional de Mikunsinkis.

Para desarrollar el método se toma la ec. (4.1) correspondiente a la cinética de secado que tiene forma de polinomio y se sustituye en la ec. (3.4) del contenido de humedad con respecto al tiempo donde Z representa las diferentes variables que pueden afectar a la cinética de secado como lo pueden ser humedad relativa, temperatura del aire, del producto, velocidad del aire, etc. y $\hat{a}_n$ - $\hat{a}_{n+j}$ son los parámetros a estimar, con esto se obtiene la ec. (4.2) con n como el número de parámetros a estimar y j el número de parámetro final.

$$\hat{k} = (\hat{a}_n Z_n(t) + \hat{a}_{n+1} Z_{n+1}(t) + \hat{a}_{n+2} Z_{n+2}(t) + ... + \hat{a}_{n+j} Z_{n+j}(t)) \tag{4.1}$$

$$\frac{dX}{dt} = -(\hat{a}_n Z_n(t) + \hat{a}_{n+1} Z_{n+1}(t) + \hat{a}_{n+2} Z_{n+2}(t) + ... + \hat{a}_{n+j} Z_{n+j}(t))(X - X_e) \tag{4.2}$$

Se realiza un cambio a notación de cálculo operacional de Mikunsinkis para obtener la ec. (4.3). Con la finalidad de eliminar la dependencia de las condiciones iniciales desconocidas en el momento $X(t_0)$ de la expresión obtenida , la cual es considerada como una perturbación, se deriva una vez con respecto a s [Sira-Ramírez et al., 2002].

$$\begin{aligned} sX(s) - X(t_0) = -(&\hat{a}_n Z_n(s) + \hat{a}_{n+1} Z_{n+1}(s) + \hat{a}_{n+2} Z_{n+2}(s) \\ &+ \ldots + \hat{a}_{n+j} Z_{n+j}(s))(X(s) - X_e) \end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\frac{d}{ds}sX(s) = -(\hat{a}_n\frac{d}{ds}Z_n(s) + \hat{a}_{n+1}\frac{d}{ds}Z_{n+1}(s) + \hat{a}_{n+2}\frac{d}{ds}Z_{n+2}(s) + \ldots + \hat{a}_{n+j}\frac{d}{ds}Z_{n+j})(X(s) - X_e) \tag{4.4}$$

$$X(s) + s\frac{d}{ds}X(s) = -(\hat{a}_n\frac{d}{ds}Z_n(s) + \hat{a}_{n+1}\frac{d}{ds}Z_{n+1}(s) + \hat{a}_{n+2}\frac{d}{ds}Z_{n+2}(s) + \ldots + \hat{a}_{n+j}\frac{d}{ds}Z_{n+j})(X(s) - X_e) \tag{4.5}$$

El enunciado ya derivado (4.5) se multiplica por s^{-1} para evitar derivaciones con respecto al tiempo y la ecuación obtenida (4.6) se regresa al dominio del tiempo como se muestra en la ecuación (4.7):

$$s^{-1}X(s) + \frac{d}{ds}X(s) = -s^{-1}\left(\hat{a}_n\frac{d}{ds}Z_n(s) + \hat{a}_{n+1}\frac{d}{ds}Z_{n+1}(s) + \hat{a}_{n+2}\frac{d}{ds}Z_{n+2}(s) + \ldots + \hat{a}_{n+j}\frac{d}{ds}Z_{n+j}\right)(X(s) - X_e) \tag{4.6}$$

$$\begin{aligned}\int_{t_0}^{t} X\,dt - (\Delta t)X = (-\hat{a}_n\int_{t_0}^{t}(\Delta t)Z_n\,dt - \hat{a}_{n+1}\int_{t_0}^{t}(\Delta t)Z_{n+1}\,dt \\ -\hat{a}_{n+2}\int_{t_0}^{t}(\Delta t)Z_{n+2}\,dt - ... - \hat{a}_{n+j}\int_{t_0}^{t}(\Delta t)Z_{n+j}\,dt)(X(t) - X_e)\end{aligned} \tag{4.7}$$

donde $\Delta t = t - t_0$ y t_0 es el tiempo inicial.

Después de integrar se genera el siguiente sistema de ecuaciones lineales para obtener los parámetros. Utilizando la expresión matemática $A\theta = B$ en donde A representa la matriz de coeficientes, θ es el vector de los parámetros a estimar y B la matriz de los valores independientes.

$$A = \begin{bmatrix} \eta_{n,n} & \eta_{n,n+1} & \cdots & \eta_{n,n+j} \\ \eta_{n+1,n} & \eta_{n+1,n+1} & \cdots & \eta_{n+1,n+j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \eta_{n+j,n} & \eta_{n+j,n+1} & \cdots & \eta_{n+j,n+j} \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \hat{a}_n \\ \hat{a}_{n+1} \\ \vdots \\ \hat{a}_{n+j} \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_n \\ b_{n+1} \\ \vdots \\ b_{n+j} \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

En donde los componentes de la matriz A y B son η y b que están dadas por los términos de lado derecho y del lado izquierdo de la ec. (4.7) respectivamente:

$$\eta_{n,n} = -\int_{t_0}^{t} (t - t_0) Z_n (X(t) - X_e)\, dt$$

$$\eta_{n,n+1} = -\int_{t_0}^{t} (t - t_0) Z_{n+1} (X(t) - X_e)\, dt$$

$$\vdots$$

$$\eta_{n,n+j} = -\int_{t_0}^{t} (t - t_0) Z_{n+j} (X(t) - X_e)\, dt$$

$$\eta_{n+1,n} = -\int_{t_0}^{t} \eta_{n,n}(t)\, dt,\ \eta_{n+1,n+1} = -\int_{t_0}^{t} \eta_{n,n+1}(t)\, dt,\ \ldots,\ \eta_{n+1,n+j} = -\int_{t_0}^{t} \eta_{n,n+j}(t)\, dt$$

$$b_n = (t - t_0)X - \int_{t_0}^{t} X(t)\, dt,\ b_{n+1} = \int_{t_0}^{t} b_n\, dt,\ \ldots,\ b_{n+j} = \int_{t_0}^{t} b_{n+j-1}\, dt$$

Se despeja θ y se resuelve mediante la inversa de A multiplicado por B como se observa en la siguiente expresión:

$$\theta = A^{-1}B = \frac{1}{detA} Adj(A)B \tag{4.11}$$

Como se comentó, para resolver el sistema se utilizó un método numérico, es decir, un método iterativo, por lo que, se pueden presentar singularidades por puntos donde la función no esta definida o por divisiones por cero durante su estimación, para evitarlo,

se realiza lo siguiente:

$$\theta = \begin{bmatrix} \hat{a}_n \\ \hat{a}_{n+1} \\ \vdots \\ \hat{a}_{n+j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta_1}{\Delta} \\ \frac{\Delta_2}{\Delta} \\ \vdots \\ \frac{\Delta_n}{\Delta} \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

En donde si se considera $\hat{a}_n > 0$, para evitar las divisiones por 0, se obtiene:

$$|\hat{a}_n \Delta| = |\Delta_n|| \tag{4.13}$$

Por lo que se integra una vez con respecto al tiempo y se despeja el parámetro $\hat{a}_n$, asegurando que sus magnitudes sean positivas evitando las fluctuaciones negativas. Esto busca la estabilidad numérica y evitar las divisiones por números cercanos a 0:

$$\hat{a}_n = \frac{\int_{t_0}^{t} |\Delta_n| dt}{\int_{t_0}^{t} |\Delta| dt} \tag{4.14}$$

4.2. Identificación paramétrica fuera de línea

Para cumplir con los objetivos de este trabajo es importante estimar los parámetros como lo han realizado los investigadores durante todo este tiempo y comparar los resultados con la estimación en línea. Se hizo una estimación fuera de línea, es decir, una estimación en la que se procesan los datos después de realizar una serie de experimentos. Con relación a este trabajo al no contar con los datos experimentales suficientes para poder procesarlos, se optó por extraerlos de los gráficos reportados en la literatura.

Para realizar esta estimación fuera de línea se realizan los siguientes pasos:

1. Se recaban los datos de los experimentos a diferentes temperaturas, velocidades u otras variables.

2. Se ajustan los datos al modelo de Newton de acuerdo a su temperatura, velocidad u otra variable para obtener las diferentes constantes cinéticas k de acuerdo a las variables manipuladas.

3. Se realiza la relación de los parámetros con las variables con la finalidad de obtener el polinomio representativo a la constante cinética de secado para un rango de temperatura, velocidad u otra variable.

Para comprobar la calidad del ajuste se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio ($RMSE$) como lo realizaron diversos autores [Madamba et al., 1996; Özdemir and Onur Devres, 1999; Sawhney et al., 1999; Menges and Ertekin, 2006]. Cabe recalcar que el ajuste fue realizado en Python en donde MR_{exp} es el contenido de humedad experimental, MR_{pre} es el contenido de humedad predicho y N el número de observaciones.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})}{\sum \left(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp,i}\right)} \tag{4.15}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \left(MR_{\mathrm{exp},i} - MR_{\mathrm{pre},i}\right)^2} \tag{4.16}$$

4.3. Métodos Numéricos

Para resolver las ecuaciones que se generan tanto para describir el modelo dinámico y las generadas para la estimación de parámetros y el control del proceso de secado, se utilizaron dos métodos numéricos para aproximar sus soluciones. Se eligieron de acuerdo al buen ajuste que tienen con la solución.

El primero es el método numérico más popular de Runge-Kutta, el método de Runge-Kutta de cuarto orden. Este simula la precisión del método de taylor de cuarto orden usando solo evaluaciones de la función con la finalidad de mantener los errores de truncamiento [Chapra and Canale, 2006; Zill and Wright, 2011].

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \tag{4.17}$$

$$k_1 = f(x_n, y_n) \tag{4.18}$$

$$k_2 = f(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hk_1) \tag{4.19}$$

$$k_3 = f(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hk_2) \tag{4.20}$$

$$k_4 = f(x_n + h, y_n + hk_3) \tag{4.21}$$

El método permite evaluar el punto y_{n+1} conociendo el valor de y_n más el producto del intervalo h por una ponderación de pendientes k_1, k_2, k_3 y k_4, esto se puede observar en la **Fig. 4.1**.

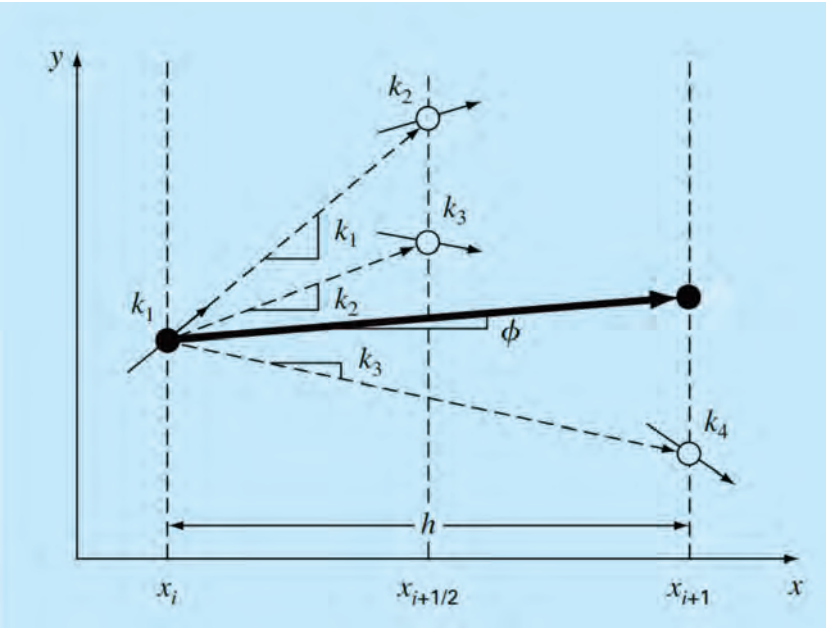

Figura 4.1: Representación gráfica de la estimación de las pendientes [Chapra and Canale, 2006].

En donde [Nieves and Domingues, 2004; Ezquerro, 2012]:

- k_1 es la estimación inicial de la pendiente.

- k_2 es una estimación en el punto medio del intervalo ocupando k_1
- k_3 de la misma manera que k_2 pero ocupando k_2.
- k_4 es la estimación final ocupando k_3.

El segundo método es el adaptado por Felhberg, en él se emplean dos métodos de Runge-Kutta de órdenes cuarto y quinto. En este método se determina si se esta utilizando el tamaño de paso apropiado. En cada paso, dos diversas aproximaciones se hacen y se comparan. Si las dos respuestas están según lo delimitado, se acepta la aproximación, de lo contrario se modifica el paso [Llosa and Gómez, 2004; Chapra and Canale, 2006; Zill and Wright, 2011].

$$y_{n+1} = y_n + h(\frac{2825}{27648}k_1 + \frac{18575}{43384}k_3 + \frac{13525}{55296}k_4 + \frac{277}{14336}k_5 + \frac{1}{4}k_6) \tag{4.22}$$

$$k_1 = f(x_n, y_n) \tag{4.23}$$

$$k_2 = f(x_n + \frac{1}{5}h, y_n + \frac{1}{5}hk_1) \tag{4.24}$$

$$k_3 = f(x_n + \frac{3}{10}h, y_n + \frac{3}{40}hk_1 + \frac{9}{40}hk_2) \tag{4.25}$$

$$k_4 = f(x_n + \frac{3}{5}h, y_n + \frac{3}{10}hk_1 - \frac{9}{10}hk_2 + \frac{6}{5}hk_3) \tag{4.26}$$

$$k_5 = f(x_n + h, y_n - \frac{11}{54}hk_1 + \frac{5}{2}hk_2 - \frac{70}{27}hk_3 + \frac{35}{27}hk_4) \tag{4.27}$$

$$k_6 = f(x_n + \frac{7}{8}h, y_n + \frac{1631}{55296}hk_1 + \frac{175}{512}hk_2 + \frac{575}{13824}hk_3 + \frac{44275}{110592}hk_4 + \frac{253}{4096}hk_5) \tag{4.28}$$

4.4. Plataforma computacional

Con la finalidad de desarrollar un producto, se elaboró una plataforma computacional en Python la cual consta de diversos archivos que contienen códigos generados en el lenguaje de Python en la versión 3.12.4. Estos códigos contienen el desarrollo de los métodos numéricos, de constantes cinéticas, de propiedades termodinámicas, de la

estimación de parámetros para diversos parámetros, así como del desarrollo de los diferentes controladores que se utilizaron. Algunos de estos códigos se pueden observar en el apéndice C.

En resumen, para realizar la simulación de la estimación de los parámetros de algún producto agroindustrial se requiere llevar acabo los siguientes pasos:

1. Se cargan las propiedades físicas y físicoquímicas del producto o en su defecto se toman la de los productos ya cargados.
2. Se elige el número de parámetros a estimar de acuerdo a la cinética de secado.
3. Se elige el controlador.
4. Se elige el tiempo de simulación y el paso de integración.
5. Se lleva acabo la simulación.
6. Se verifican los resultados mediante gráficos o con los datos generados.

Esta plataforma, aunque no está optimizada, puede ser de gran ayuda para obtener los parámetros de la cinética de secado con mayor rapidez que los métodos convencionales ya explicados.

Capítulo 5

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas para los productos agroindustriales mencionados anteriormente. Se presentan resultados de los parámetros de la cinética de secado obtenidos mediante el desarrollo de la técnica de identificación paramétrica algebraica en línea basada en lo propuesto por Fliess and Sira-Ramírez (2003). Posteriormente, éstos se emplearon en el diseño de diferentes controladores que tenían un valor de referencia o que seguían una trayectoria con la finalidad de comparar su comportamiento.

5.1. Estimación de Parámetros

En esta primera sección se desarrolla la técnica de identificación paramétrica de las cinéticas de secado de los productos agroindustriales kiwi, plátano, aguacate, chile rojo y fresa, los cuales tienen una ecuación polinomial para el modelo de Newton. Se resolvieron las ecuaciones mediante el método numérico de Runge-Kutta-Felhberg de los diferentes casos propuestos en los cuales se varía la temperatura dentro y fuera del rango de sus límites de funcionamiento. Los resultados obtenidos se presentan a continuación y se comparan con los parámetros de la **Tabla 3.2**.

5.1.1. Estimación de Parámetros en línea del Kiwi

En este primer caso se estiman los parámetros de la cinética de secado considerando la velocidad constante en 0.39 m/s, velocidad reportada para este producto, por lo que, solo se obtienen 2 parámetros. Se usó una temperatura inicial del aire y producto de 25°C, así como un contenido de humedad inicial de 4.31 $kgH_2O/kgProd$. En el segundo caso, se cambia la temperatura inicial tanto del aire como del producto a 40.2°C la temperatura máxima en la que trabaja la cinética, mientras que se mantiene la velocidad y el contenido de humedad inicial constantes. Por último, en el caso 3 se usa el algoritmo para evitar singularidades a temperatura de operación. Los resultados se presentan en la **Tabla 5.1** y se muestra el comportamiento en las **Figuras 5.1-5.3**.

Tabla 5.1: Estimación de 2 parámetros de la cinética de secado del Kiwi sin control.

Caso	**Tiempo (min)**	**Parámetro** $\hat{a}_0$	**Parámetro** $\hat{a}_1$	**Error %** $\hat{a}_0$	**Error %** $\hat{a}_1$
Real	-	-2.9574896	0.07407	-	-
1	0.1	-2.957	0.0736	0.0095	0.5387
2	0.3	-3.0017	0.0751	1.4974	1.4603
3	0.168	-2.9138	0.0729	1.4771	1.4468

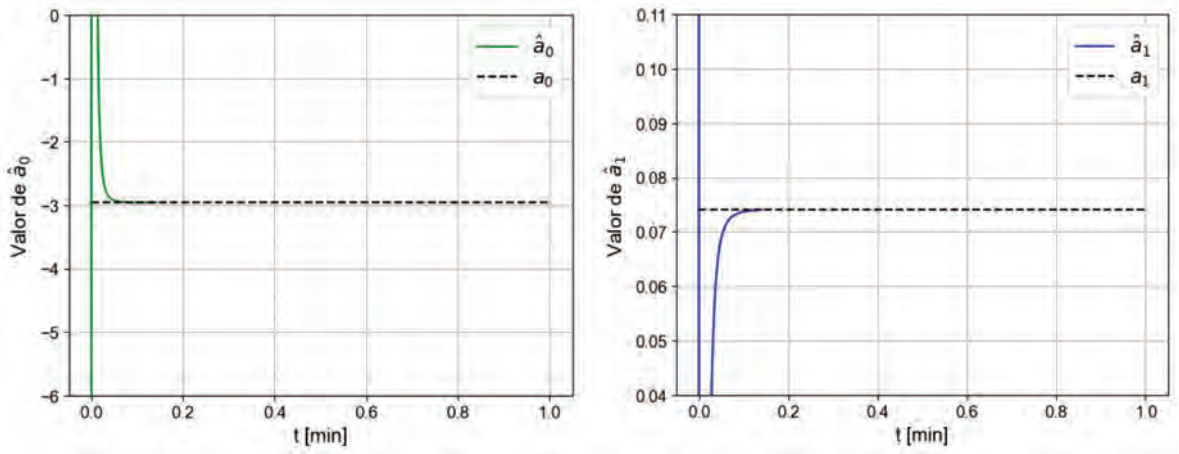

Figura 5.1: Estimación de Parámetros del Kiwi caso 1.

Como se puede observar en la **Fig. 5.1** los parámetros sólo se logran estimar en los

primeros 0.15 min con errores porcentuales menores del 1.5 %. Esto ocurre debido al comportamiento de la cinética, ya que, al tener un rango de operación muy limitado y en este caso encontrarse fuera del límite y sin control de temperatura, la humedad se desvía del rango afectando la estimación.

Mientras que, en la **Fig. 5.2** correspondiente al caso 2 se obtiene la estimación de los parámetros con errores menores del 1.5 %. Para este caso, a partir del minuto 0.3 se mantiene la referencia de los valores reales. A diferencia de lo mostrado en el caso 3 en la **Fig. 5.3** donde se alcanza en menor tiempo la referencia.

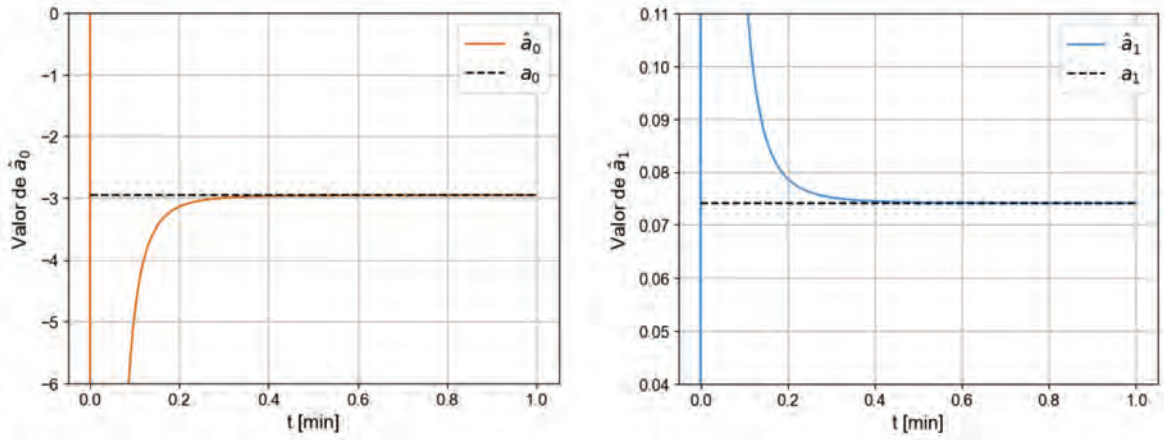

Figura 5.2: Estimación de Parámetros del Kiwi caso 2.

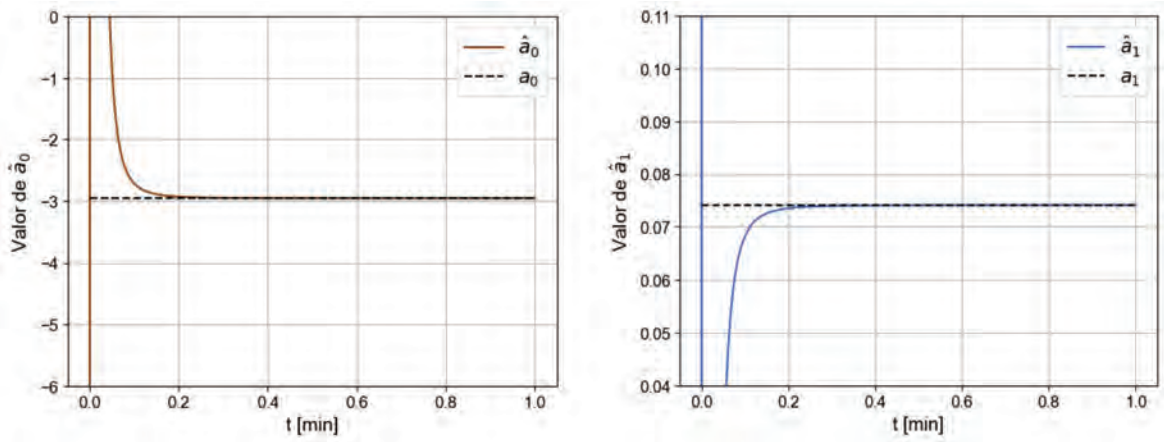

Figura 5.3: Estimación de Parámetros del Kiwi caso 3.

Cuando la velocidad no es constante, y varía en su rango de operación, la ecuación de la cinética de secado se conforma de un polinomio de tres términos, por lo que en este caso se estimaron los tres parámetros. Se consideraron las condiciones del caso 2 y 3, es decir, la temperatura inicial del aire y del producto es de 40.2℃. Ya que como en el caso 1, cuando la temperatura se encuentra fuera del rango de operación de la cinética no se pueden estimar correctamente. En la **Tabla 5.2** se muestran los parámetros estimados con su error porcentual.

Tabla 5.2: Estimación de 3 parámetros de la cinética de secado del Kiwi sin control.

Caso	**Tiempo (min)**	**Parámetro** $\hat{a}_0$	**Parámetro** $\hat{a}_1$	**Parámetro** $\hat{a}_2$	**Error %** $\hat{a}_0$	**Error %** $\hat{a}_1$	**Error %** $\hat{a}_2$
2[a]	0.7	-2.9721	0.0358	0.0740	0.0288	1.5101	0.0255
3[a]	0.422	-2.9726	0.0358	0.0740	0.0445	1.4875	0.0378

[a]Se utilizó un h de 1×10^{-6}.

5.1.2. Estimación de Parámetros en línea de productos agroindustriales

En esta sección se muestran los valores de diferentes productos agroindustriales como el plátano, el aguacate, el chile rojo y la fresa, los primeros dos son similares a al kiwi, es decir, tienen tres parámetros, pero si se define la velocidad como constante se obtienen solo dos parámetros. Las condiciones que se consideraron para cada producto fueron elegidas de acuerdo a sus límites de funcionamiento reportadas en los diferentes trabajos de la **Tabla 3.1**, esto se puede observar en la **Tabla 5.3**. A su vez, se estimaron los parámetros evitando se presenten singularidades.

Con las condiciones de la **Tabla 5.3** se estimaron los parámetros de cada ecuación cinética. Se observó que en algunos casos al resolver las ecuaciones con el método de Runge-Kutta-Felhberg se necesitó disminuir el paso para que el sistema pudiera converger de 1×10^{-5} a 1×10^{-6}. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 5.4** y en la **Tabla 5.5**, donde se muestran los resultados de la estimación de parámetros considerando que los productos agroindustriales se encuentran a temperatura ambiente

Tabla 5.3: Condiciones iniciales de productos agroindustriales.

Producto	**Temperatura del producto (°C)**	**Temperatura del aire (°C)**	**Contenido de humedad** ($kgH_2O/kgProd$)
Plátano	39.8	39.8	4.71
Aguacate	39.8	39.8	1.51
Chile Rojo	65	65	4
Fresa	46	46	7.5

(25°C). En la **Tabla 5.6** y **Tabla 5.7** se muestran los resultados suprimiendo las singularidades.

Tabla 5.4: Estimación de parámetros con temperatura de operación.

Producto	**Tiempo (min)**	**Parámetro** $\hat{a}_0$	**Parámetro** $\hat{a}_1$	**Parámetro** $\hat{a}_2$	**Error %** $\hat{a}_0$	**Error %** $\hat{a}_1$	**Error %** $\hat{a}_2$
Plátano	1.4	2.5450	-0.0634	N/A[a]	1.4564	1.4593	N/A
Plátano	8.9	2.61	0.0038	-0.065	1.1183	1.4887	1.1218
Aguacate	1.9	4.5561	0.1137	N/A	1.4781	1.3446	N/A
Aguacate	7.1	4.5944	-0.0173	-0.1145	0.6597	1.4961	0.66
Chile Rojo	7.6	-0.0077	0.0002	N/A	1.4903	0.8555	N/A
Fresa[b]	1	0.0048	0.0005	N/A	7.6036	1.2931	N/A

[a]N/A: No aplica.
[b]Se utilizó un h de 1×10^{-6}.

Cómo se pueden observar en los datos, en los casos de los productos en los que se estimaron tres parámetros como el aguacate, kiwi y plátano, teniendo variable la velocidad desde 0.03-0.39 m/s, se confirma que el tiempo de simulación para obtenerlos con errores menores del 1.5 % fue mayor a temperatura ambiente que a temperatura de secado.

A su vez, se observa que el parámetro que más tarda en acercarse al valor reportado es el que se encuentra multiplicado por la velocidad, esto se debe a que, la velocidad cambia constantemente en el rango de operación y la temperatura del aire esta fuera de rango ocasionando que tarde mayor tiempo en alcanzar su valor.

Tabla 5.5: Estimación de parámetros con temperatura ambiente.

Producto	**Tiempo (min)**	**Parámetro** $\hat{a}_0$	**Parámetro** $\hat{a}_1$	**Parámetro** $\hat{a}_2$	**Error %** $\hat{a}_0$	**Error %** $\hat{a}_1$	**Error %** $\hat{a}_2$
Plátano	0.44	2.5499	-0.0634	N/A[a]	1.2666	1.4741	N/A
Plátano	10	2.5422	0.0034	-0.0634	1.5089	8.9122	1.514
Aguacate	0.63	4.6780	-0.1169	N/A	1.1593	1.4358	N/A
Aguacate	10	4.6271	-0.0146	-0.1154	0.046	16.5802	0.0698
Chile Rojo	10	-0.0074	0.00018	N/A	3.0193	5.9380	N/A
Fresa[b]	1.1	0.0046	0.00059	N/A	11.0832	5.0378	N/A

[a]N/A: No aplica.
[b]Se utilizó un h de 1×10^{-6}.

Tabla 5.6: Estimación de parámetros con temperatura de operación evitando singularidades.

Producto	**Tiempo (min)**	**Parámetro** $\hat{a}_0$	**Parámetro** $\hat{a}_1$	**Parámetro** $\hat{a}_2$	**Error %** $\hat{a}_0$	**Error %** $\hat{a}_1$	**Error %** $\hat{a}_2$
Plátano	0.605	2.6208	-0.0653	N/A[a]	1.4805	1.4842	N/A
Plátano	4.14	2.5736	0.0038	-0.0641	0.2925	1.4903	0.2925
Aguacate	0.79	4.6863	-0.1170	N/A	1.338	1.4787	N/A
Aguacate	2.18	4.5834	-0.0173	-0.1142	0.8973	1.493	0.8980
Chile Rojo	3.505	-0.0075	0.00019	N/A	1.4993	0.8638	N/A
Fresa[b]	0.85	0.0053	0.0005	N/A	1.4894	0.4923	N/A

[a]N/A: No aplica.
[b]Se utilizó un h de 1×10^{-6}.

Con los datos obtenidos de la estimación de parámetros evitando singularidades, se aprecia que el tiempo para alcanzar errores menores del 1.5 % en comparación con los datos obtenidos de la **Tabla 5.6** y **Tabla 5.7**, se disminuyó. Esto se debe a que al considerar que el parámetro a estimar siempre es mayor a 0 e integrarlo, los valores que se obtienen son positivos logrando converger de manera más rápida.

Tabla 5.7: Estimación de parámetros con temperatura ambiente evitando singularidades.

Producto	**Tiempo (min)**	**Parámetro $\hat{a}_0$**	**Parámetro $\hat{a}_1$**	**Parámetro $\hat{a}_2$**	**Error % $\hat{a}_0$**	**Error % $\hat{a}_1$**	**Error % $\hat{a}_2$**
Plátano	0.266	2.6157	-0.0653	N/A[a]	1.2816	1.4962	N/A
Plátano	2.57	2.5810	0.0038	-0.0643	0.0053	1.4947	0.0056
Aguacate	0.306	4.5558	-0.1136	N/A	1.4831	1.4897	N/A
Aguacate	1.521	4.6297	-0.0173	-0.1154	0.1022	1.4993	0.1150
Chile Rojo	6.6	-0.0077	0.0002	N/A	0.9617	1.4956	N/A
Fresa[b]	1	0.0053	0.0005	N/A	1.5149	0.7547	N/A

[a]N/A: No aplica.
[b]Se utilizó un h de 1×10^{-6}.

5.1.3. Estimación de Parámetros fuera de línea de productos agroindustriales

Los resultados presentados en esta sección son a partir de los datos experimentales extraídos para la piña y el ñame, dos productos con un alto contenido de humedad en su interior. Los datos que se utilizaron presentan el comportamiento de la relación de humedad (MR) conforme pasa el tiempo, estos datos fueron extraídos de la **Fig. 5.4**. Posteriormente, se ajustaron para obtener la constante cinética de secado y su relación con la temperatura del aire.

Los datos extraídos de las gráficas se presentan en las **Tablas B.1-B.2** de la **sección Apéndice**. Con estos datos se sigue el procedimiento para realizar el ajuste al modelo de Newton mostrado en la **Tabla 2.2** de la **sección 2.2.1**. Se obtuvieron los siguientes resultados que fueron comparados con los valores de las constantes cinéticas de secado reportadas en las **Tabla 5.8-5.9**.

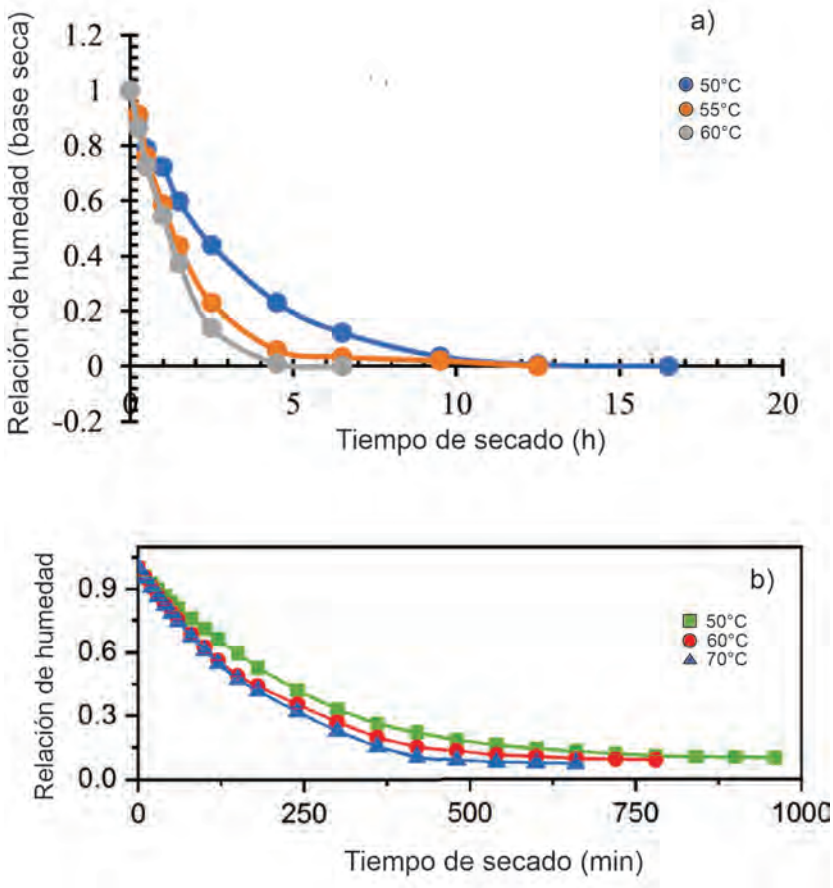

Figura 5.4: Gráficas de relación de humedad vs tiempo. a) Fruta Piña [Biswas and Lovell, 2008]. b) Tubérculo Ñame Seborg et al. (2011).

Tabla 5.8: Constante cinética de secado de la Piña.

Temperatura (°C)	k **obtenida** (h^{-1})	k **reportada** (h^{-1}) (R. Biswas *et al.*, 2022)	**Error porcentual (%)**
50 °C	0.3451	0.3775	8.56
55 °C	0.5689	0.4798	18.57
60 °C	0.6963	0.9467	26.44

Tabla 5.9: Constante cinética de secado de la Ñame.

Temperatura (°C)	k **obtenida** (h^{-1})	k **reportada** (h^{-1}) (R. Biswas *et al.*, 2022)	**Error porcentual (%)**
50 °C	0.003399	0.00341	0.32
60 °C	0.004479	0.00443	1.10
70 °C	0.004906	0.00492	0.27

La diferencia entre los valores calculados y los reportados se debe a la exactitud en la extracción de datos y al número de puntos tomados de cada gráfica, a pesar de eso, se pueden analizar y utilizar ya que se tienen ajustes de R^2 de 0.99 y $RMSE$ entre 0.01-0.03, en todas las constantes cinéticas de secado obtenidas.

El siguiente paso después de obtener cada constante cinética de secado correspondiente a cada temperatura de aire utilizada, es calcular la relación de la constante cinética con la temperatura del aire y evaluar la calidad del ajuste con el coeficiente de determinación (R^2). Las ecuaciones obtenidas se presentan en la **Tabla 5.10** para cada fruta.

Tabla 5.10: Ecuaciones de la constante cinética de productos agrícolas.

Producto	k $(min^{-}1)$	R^2
Piña	-0.02325 + 5.8531×10^{-4} T_A	0.97
Ñame	-2.6×10^{-4} + 7.53×10^{-5} T_A	0.94

Para evaluar la calidad de la técnica de estimación en línea utilizada en este trabajo, se estimaron los parámetros de la cinética de secado **Tabla 5.10** correspondientes a los dos productos y se compararon. Los resultados mostrados confirman que la técnica utilizada en línea sirve para obtener parámetros similares en un tiempo menor. De acuerdo al tiempo de simulación se puede lograr que los errores sean menores del 1.5 %.

Para estimarlos se utilizaron las temperaturas más altas de operación para cada producto, siendo 60°C y 70 °C para la piña y el ñame respectivamente. A su vez, los parámetros requeridos por el modelo como la humedad inicial, humedad en equilibrio, C_p y hAp fueron obtenidos de la literatura [Sahoo et al., 2022; Gilago and Chandramohan, 2023; Malakar et al., 2022; Meng et al., 2022].

En la **Tabla 5.11** se presentan los valores estimados en un tiempo específico. De igual manera, en los primeros minutos en las **Figuras 5.5-5.6** se presentan las singularidades causadas por el método numérico usado para resolver las ecuaciones algebraicas, este comportamiento es el mismo que se presenta en los resultados anteriores para el kiwi, aguacate, chile y plátano.

Tabla 5.11: Parámetros estimados en línea.

Producto	**Tiempo (min)**	**Parámetro** $\hat{a}_0$	**Parámetro** $\hat{a}_1$	**Error %** $\hat{a}_0$	**Error %** $\hat{a}_1$
Piña	0.16	-0.023492	5.8534×10^{-4}	1.0625	0.0048
Ñame	13	-2.627×10^{-4}	7.5393×10^{-5}	0.7621	0.0296

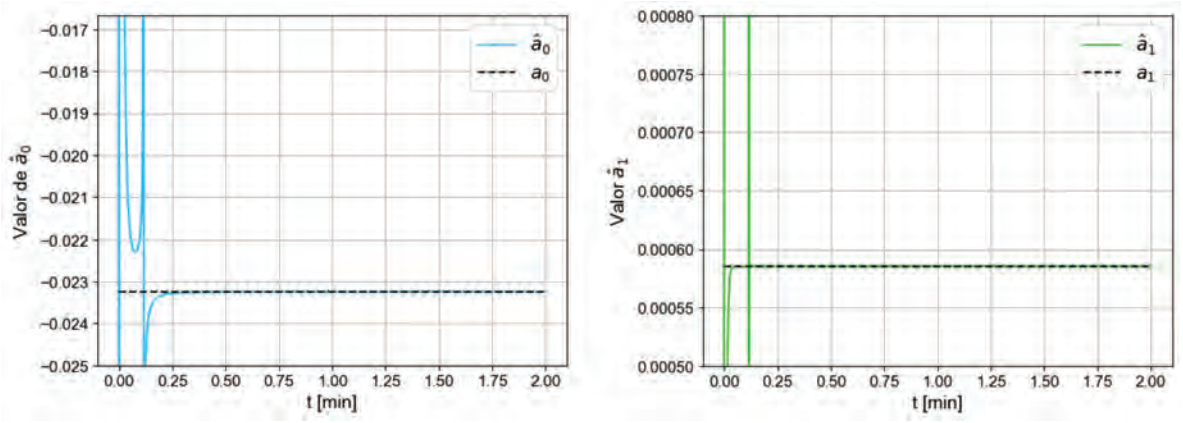

Figura 5.5: Estimación de parámetros de secado de la Piña.

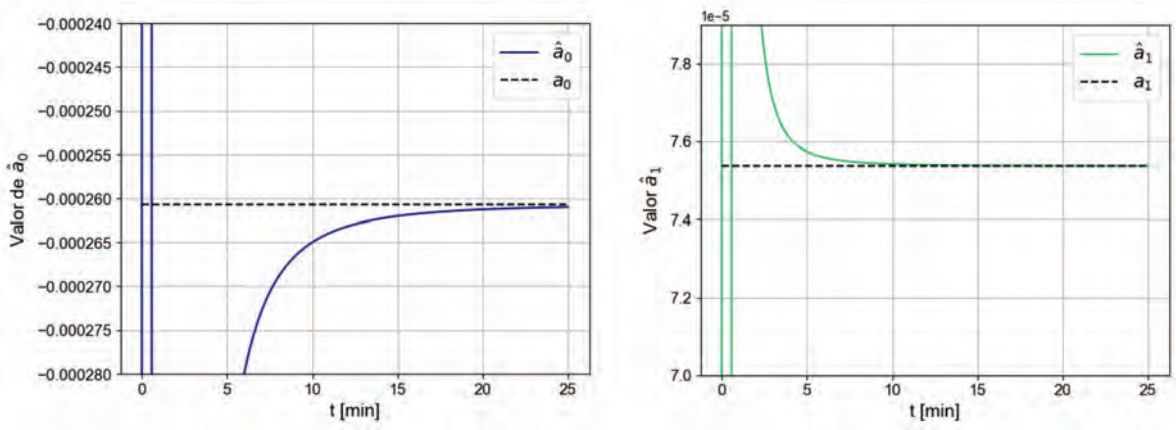

Figura 5.6: Estimación de parámetros de secado del Ñame.

Para demostrar que los parámetros obtenidos son correctos, se obtiene el comportamiento del contenido de humedad. En las siguientes figuras se puede apreciar los datos experimentales y los datos obtenidos con los parámetros de la cinética de secado a la temperatura de estimación para cada producto. Se observa que tienen un comportamiento muy similar, la diferencia puede deberse al número de datos experimentales que se extrajeron.

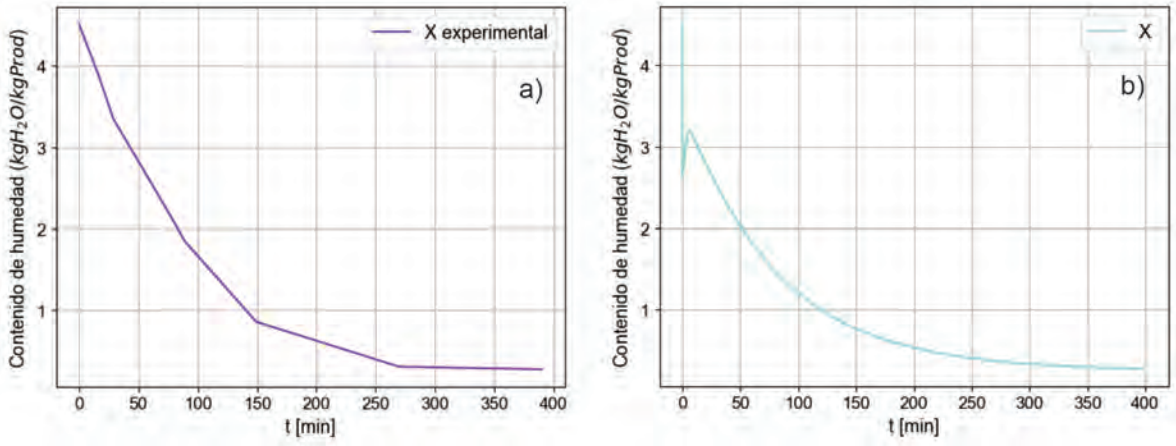

Figura 5.7: Contenido de húmedad del piña. a)Valores experimentales. b)Valores estimados.

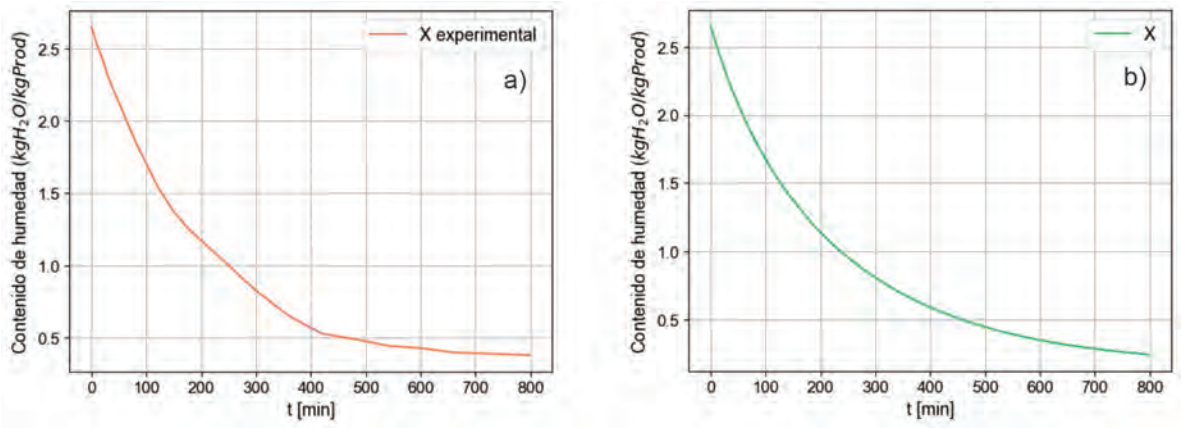

Figura 5.8: Contenido de húmedad del ñame. a)Valores experimentales. b)Valores estimados.

Con estos resultados se puede observar que la identificación algebraica en línea es una gran alternativa para estimar los parámetros desconocidos de los diversos productos agroindustriales que se deshidratan. El tiempo que se puede demorar en estimar los valores se debe al tamaño del parámetro, entre más pequeño es el valor del parámetro más tarda en alcanzar un error considerable, esto queda observado en los tiempos de estimación entre la piña y el ñame, comportamiento similar a la mostrado en el chile y la fresa.

5.1.4. Estimación de Parámetros con peturbaciones

Para comprobar el desempeño del estimador de los parámetros de la cinética de secado se propusieron perturbaciones como la variación de la temperatura ambiente y las pérdidas de calor por las paredes. Para desarrollar esta sección se utilizó el chile rojo sin controlador.

Para variar la temperatura ambiente se tomaron los datos de temperatura ambiente de la Estación Sinóptica Meteorológica Automática de Zacatepec, Morelos del Servicio Meteorológico Nacional, estación cerca de Xochitepec, Morelos de los meses de enero a marzo. Se realizó un ajuste que represente la temperatura durante todo el día, se

obtuvó el siguiente polinomio dependiente del tiempo.

$$T_{A0} = 20{,}39 - 0{,}01694t + 8{,}94 \times 10^{-5}t^2 - 1{,}078 \times 10^{-6}t^3 + 3{,}847 \times 10^{-9}t^4 - 5{,}327 \times 10^{-12}t^5 + 3{,}21 \times 10^{-15}t^6 - 7{,}10 \times 10^{-19}t^7$$

Como se puede observar en la **Figura 6.9** el cambio en la temperatura es muy lento por lo que no afecta a la estimación, ya que los parámetros estimados se obtienen en los primeros minutos del proceso.

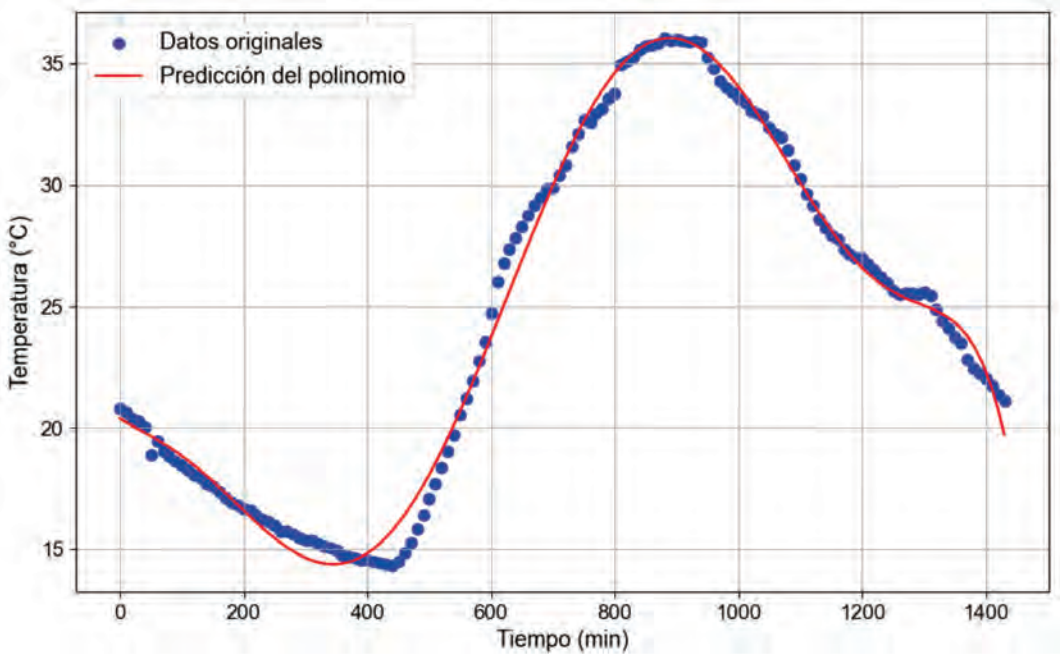

Figura 5.9: Comportamiento de la temperatura promedio durante todo el día en Zacatepec, Morelos.

Para el caso de las pérdidas de calor se agregó una ecuación más al modelo que describe la transferencia de calor en las paredes y se agregó la transferencia entre la temperatura del aire y la pared quedando el modelo de la siguiente manera.

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e)$$

$$\frac{dTp}{dt} = \frac{hA_p(T_A - Tp)}{(Cp_s - Cp_wX)m_s} + \frac{k(X - X_e)((Cp_w - Cp_v)Tp - \Delta h_{V0})}{(Cp_s - Cp_wX)}$$

$$\frac{dT_A}{dt} = \frac{m_{fA}(T_{A0} - T_A)}{M_A} + \frac{Q_f}{M_A Cp_A} - \frac{hA_p(T_A - T_p)}{M_A Cp_A} + \frac{Cp_V T_A k m_s (X - X_e)}{M_A Cp_A} + \frac{h_2 Aw(T_A - T_W)}{M_A Cp_A} \tag{5.1}$$

$$\frac{dT_W}{dt} = \frac{h_2 Aw(T_A - T_W)}{M_p Cp_p} - \frac{h_d Aw(T_W - T_{A0})}{M_p Cp_p} \tag{5.2}$$

En donde T_w es la temperatura de la pared, Aw es el área de la pared, h_2 y h_d son los coeficientes de transferencia de calor convectivo entre la pared y el aire y el coeficiente de transferencia conductivo a tráves del aislamiento respectivamente. Mientras que, Cp_p y M_p son propiedades del material de la pared, el calor específico y el peso.

Con estas nuevas ecuaciones se desarrolla la simulación para conocer el comportamiento de la pared y determinar si el cambio en la temperatura de la pared afectada por la temperatura del aire es grande como para afectar al estimador, este comportamiento se puede observar en la **Fig. 5.10**.

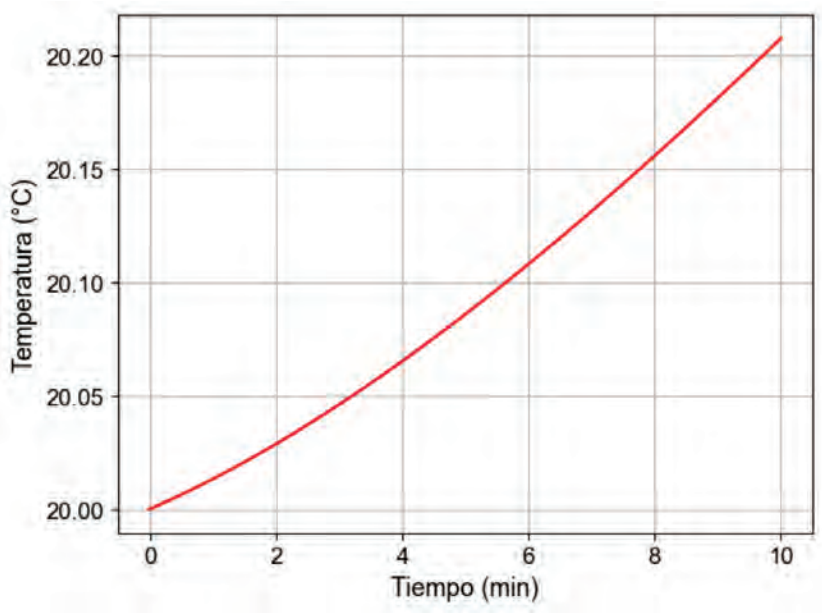

Figura 5.10: Comportamiento de la temperatura de la pared en los primeros 10 minutos.

De igual manera que con el cambio de la temperatua ambiente, el cambio que se

produce en la temperatura de la pared es muy pequeño para afectar al desempeño del estimador de los parámetros de la cinética de secado.

5.2. Control del proceso de secado

En esta sección se encuentran los resultados generados a partir de las simulaciones en donde se utiliza el método de estimación de los parámetros de la cinética de secado de diferentes productos agroindustriales. Posteriormente, se emplean los parámetros estimados en el controlador para regular la temperatura del producto y observar su comportamiento. Para comprobar la importancia de los parámetros se utilizaron 3 controladores diferentes.

5.2.1. Control no lineal basado en linealización por retroalimentación del estado

Se realiza el control del túnel de secado para diferentes productos agroindustriales como lo son kiwi y chile rojo. Se estimaron los parámetros en línea que se emplearon en el controlador. En el caso del kiwi, plátano, aguacate y fresa al tener una cinética muy sensible al cambio de la T_A y al pequeño rango de operación, provoca un comportamiento sin sentido físico cuando la simulación considera como temperatura inicial 25 °C. Esto se puede ejemplificar en la **Figura 5.11** que corresponde al kiwi.

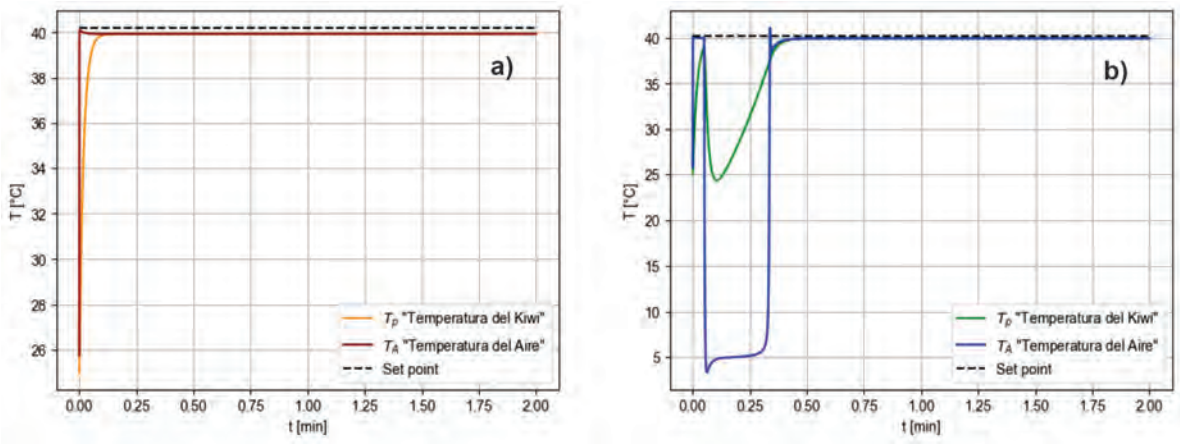

Figura 5.11: Comportamiento de la temperatura para Kiwi. a) Parámetros con error del 10 %. b) Cambio de parámetros con error < 1 %.

Se ilustra que cuando se trabaja con parámetros con errores mayores al 10 % el controlador no alcanza la referencia de secado. Por otra parte, cuando se realiza el cambio de los parámetros por los estimados con errores menores del 1 % el controlador logra alcanzar la referencia, pero en primera instancia después del cambio, se observa una disminución de T_A por 35°C, algo que en el proceso físico no puede ocurrir de manera tan espontánea.

Este comportamiento de la **Figura 5.11** se presenta de igual manera para las frutas: plátano, aguacate y fresa. Cuando se prolongó el tiempo de estimación, el error de los parámetros estimados disminuyó. Como consecuencia, se observó que el comportamiento del controlador mejoró, esto se comprueba en la **Figura 5.12**. Con esto queda evidenciada la sensibilidad y la importancia que tienen los parámetros de la cinética de secado en el controlador.

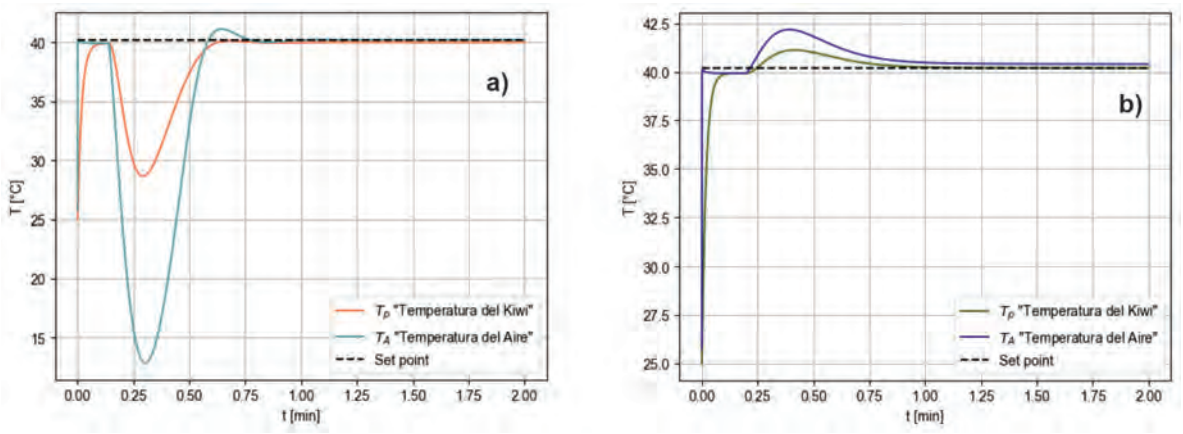

Figura 5.12: Comportamiento de la temperatura para Kiwi. a) Parámetros con error del 0.006 %. b) Parámetros con error ≈ 0.

Para observar el comportamiento del controlador se hizó la estimación de parámetros de la cinética de secado para el chile, recordando que éste tiene un rango de operación mayor. Se presentan diversos casos en donde se compara el controlador cuando se inicia con un error en los parámetros de la cinética de secado del 10 % y 30 %. Las condiciones iniciales del proceso utilizadas son: T_p y T_A en 25°C para todos los productos agroindustriales y se consideran los valores de operación reportados en la **Tabla 5.3** como temperatura de referencia.

5.2.1.1. Chile

Los parámetros de la cinética de secado que se tomaron en línea junto con su error, se utilizaron para el controlador y se muestran en la **Tabla 5.12**. Así mismo, en las **Figuras 5.13-5.14** se pueden ver los comportamientos para cada caso de la respuesta del controlador al realizar el cambio de los parámetros con errores a los parámetros estimados.

Tabla 5.12: Parámetros estimados para el chile.

Caso	**Tiempo (min)**	**Parámetro $\hat{a}_0$**	**Parámetro $\hat{a}_1$**	**Error % $\hat{a}_0$**	**Error % $\hat{a}_1$**
1	1	-0.00751790	0.00019777	1.4906	1.1144
2	1.3	-0.00752121	0.00019749	1.4472	1.2518

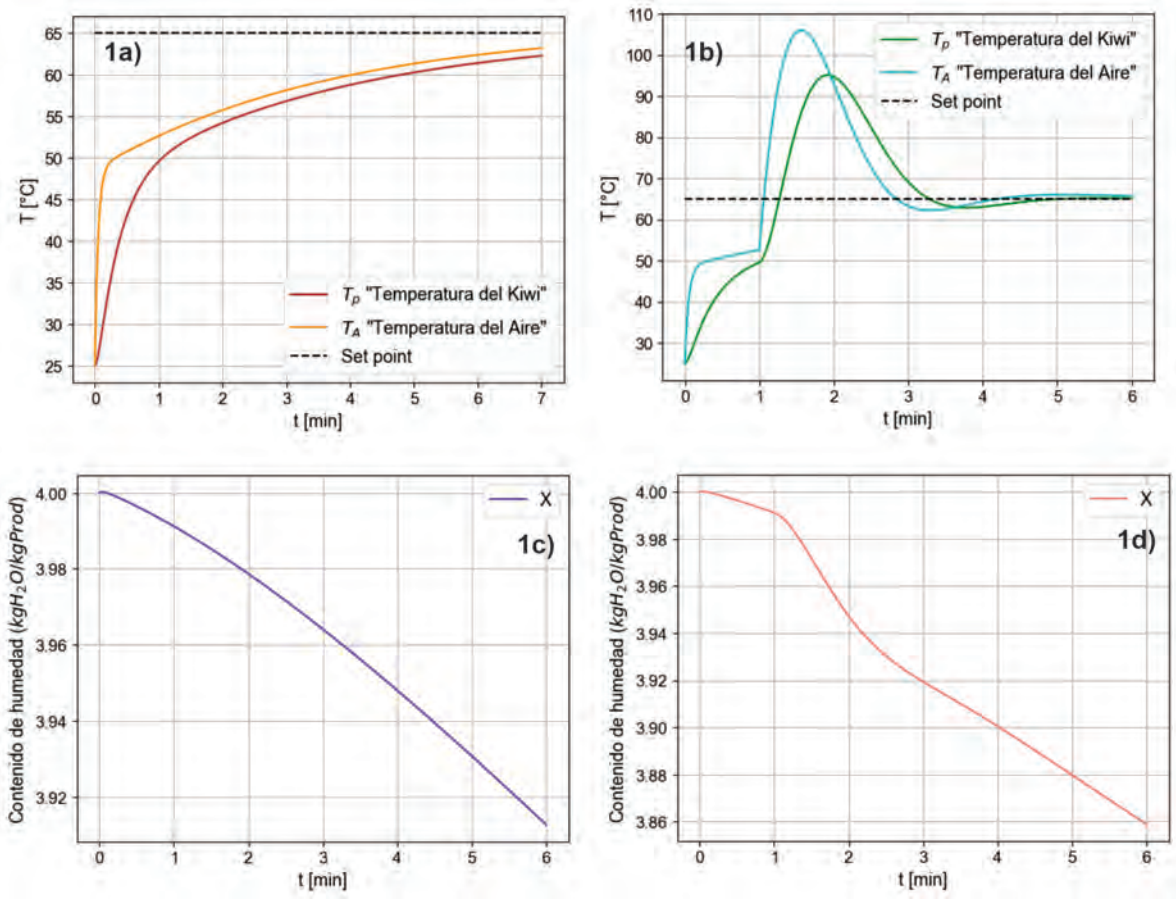

Figura 5.13: Resultados caso 1. 1a) Comportamiento de la temperatura. 1b) Cambio de parámetros en controlador. 1c) Comportamiento del contenido de humedad. 1d) Comportamiento del contenido de humedad al cambio de parámetros.

De igual manera, se observa que tanto en el caso 1 como en el caso 2 es necesario realizar el cambio de los parámetros para poder llegar a la referencia en menor tiempo

y a su vez acelerar la disminución del contenido de humedad. También se observa que cuando los errores en los parámetros son mayores, el controlador requiere aumentar el calor suministrado para alcanzar el setpoint.

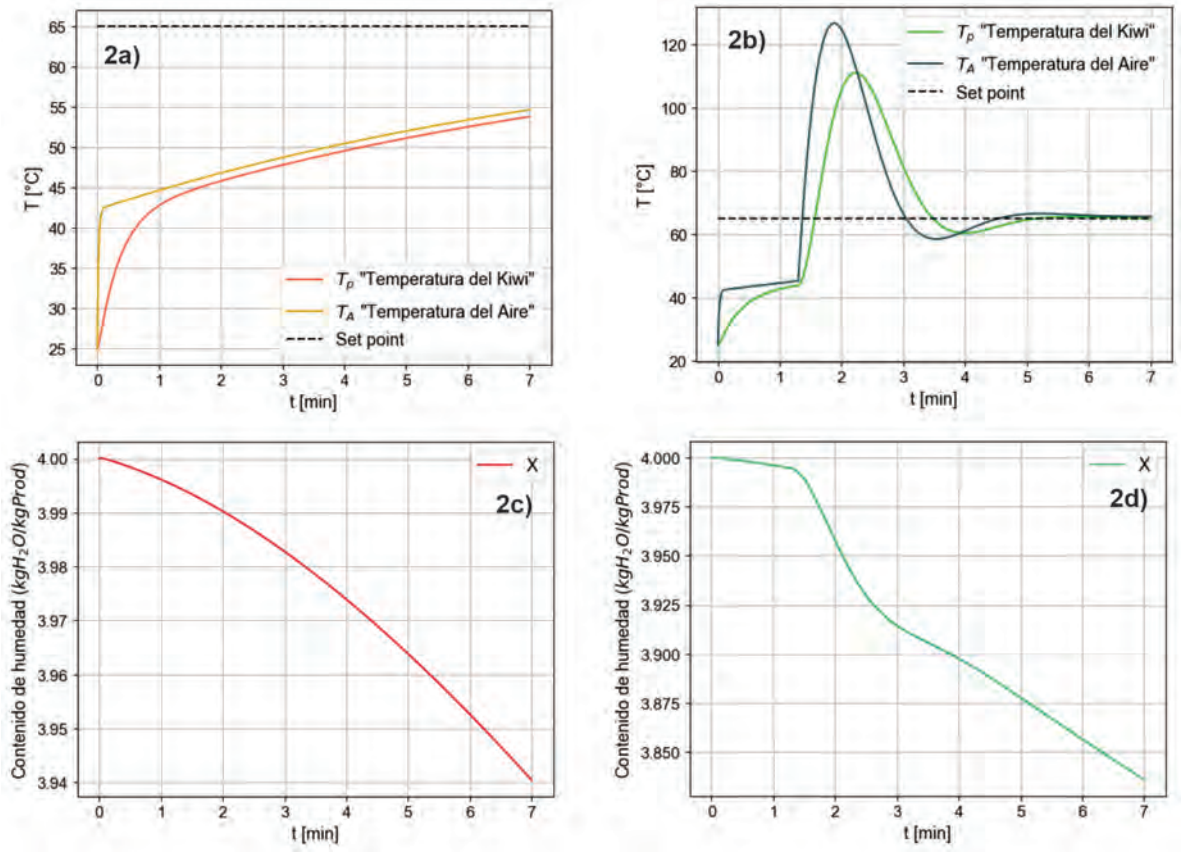

Figura 5.14: Resultados caso 2. 2a) Comportamiento de la temperatura. 2b) Cambio de parámetros en controlador. 2c) Comportamiento del contenido de humedad. 2d) Comportamiento del contenido de humedad al cambio de parámetros.

La respuesta del controlador es aproximadamente en un intervalo de 3-4 minutos dependiendo de que tan grande es el error en los parámetros y de la ganancia utilizada. Estos resultados permiten confirmar que el controlador se beneficia de la estimación de los parámetros de la cinética de secado, ya que permite alcanzar la temperatura de operación en un menor tiempo.

5.2.2. Control en dos etapas para el seguimiento de trayectorias

En el secado es de suma importancia mantener todas las propiedades nutricionales y organolépticas del producto agroindustrial para que sea atractivo al consumidor. Para lograrlo se tiene que tener un buen control del proceso de secado manteniendo la temperatura del producto sin grandes variaciones.

Investigadores han desarrollado controladores de referencia, los cuales suelen aumentar la temperatura en una primera instancia muy rápidamente para alcanzar el "set point", esto puede provocar que la temperatura del producto se eleve fuera del rango de operación y dañe al producto. Una alternativa que no se ha utilizado en gran medida en este ámbito, es diseñar controladores con trayectorias planificadas para evitar esos sobreimpulsos de temperatura y así salvaguardar la calidad del producto.

Por lo que se propuso un controlador de 2 etapas en donde se planificó una trayectoria, la cual fue desarrollada en la **sección 3.2.2** con el que se evitan los sobreimpulsos para mantener la calidad del producto. Las condiciones con las que se trabajó fueron las mismas que en el controlador no lineal basado en linealización. De igual manera, se tomaron los 2 casos anteriores y se estimaron los parámetros de la cinética que fueron utilizados en el controlador. Estos parámetros son los que se muestran en la **Tabla 5.12**.

Se utilizaron los polinomios de Bézier presentados en la **sección 3.2.2.1**, estos polinomios presentan una curva suave la cual permite alcanzar la temperatura sin tener sobreimpulsos. De igual manera que el controlador anterior, se presentan los resultados para el secado del Chile Rojo.

Como se observa en las **Figuras 5.15-5.16** en donde se tienen errores del 10 % y 30 % respectivamente, al realizar el cambio de parámetros se muestra como existe un ajuste para continuar con la trayectoria planificada. En el caso donde hay un mayor error en los parámetros, la temperatura del aire disminuye aproximadamente 2 °C a diferencia del error del 10 % donde solo disminuye un 1 °C.

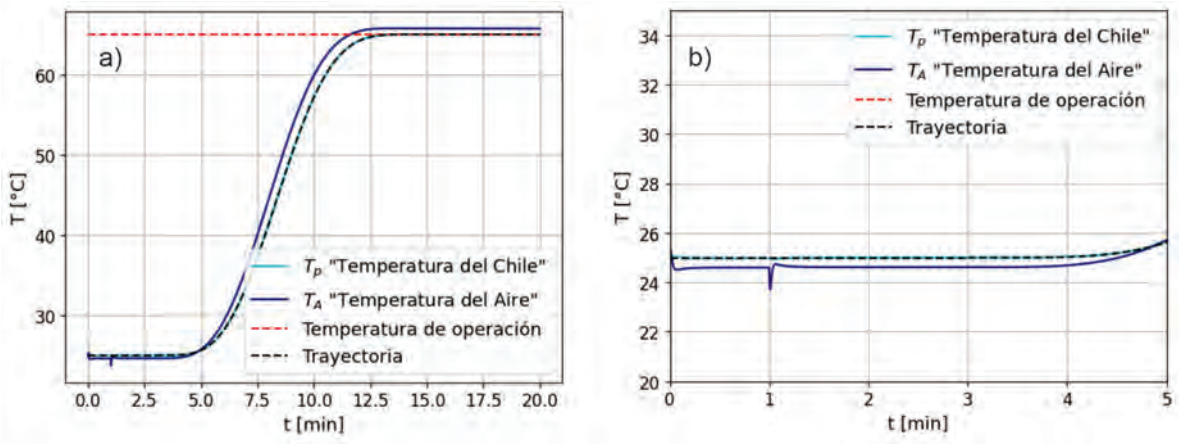

Figura 5.15: Comportamiento de la temperatura Caso 1 con B_1. a) Comportamiento completo. b) Ampliación en 5 min.

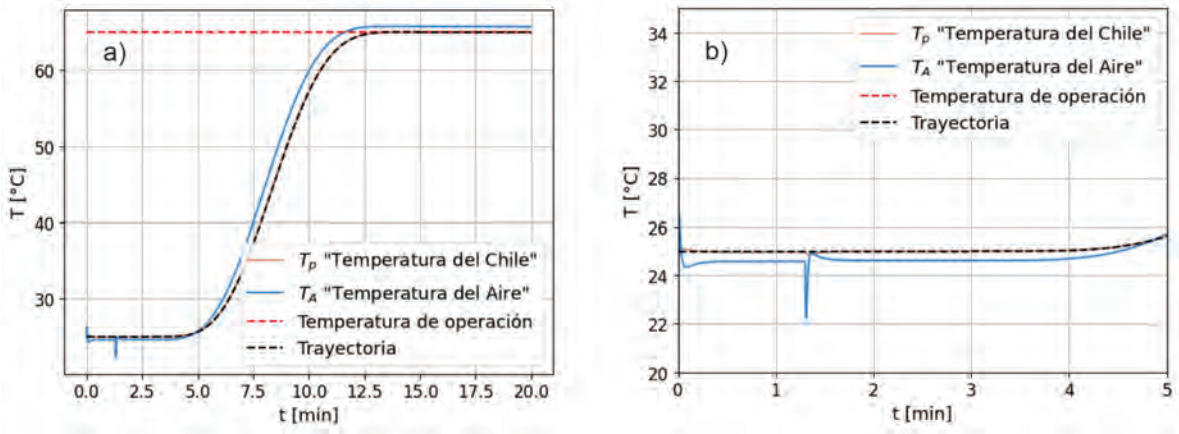

Figura 5.16: Comportamiento de la temperatura Caso 2 con B_1. a) Comportamiento completo. b) Ampliación en 5 min.

Mientras que, en la temperatura del producto, si se observa una pequeña desviación de la trayectoria al hacer el cambio de parámetro, lo que permite afirmar que el controlador a pesar de usar parámetros erróneos te permite seguir la trayectoria planificada, lo que puede ayudar a mejorar el proceso de secado.

En la **Figura 5.17** se observa el mismo comportamiento entre el polinomio B_2 y B_1

en el cual se observa que la curva tiene una mayor pendiente a diferencia del polinomio B_1, pero sigue la trayectoria planificada a pesar de tener parámetros erróneos y de realizar un cambio en los parámetros de la cinética de secado.

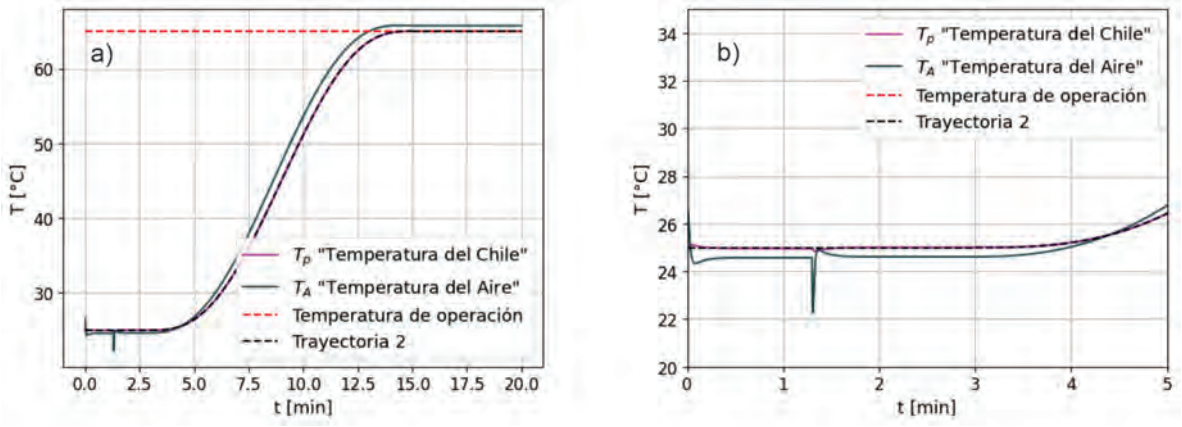

Figura 5.17: Comportamiento de la temperatura Caso 2 con B_2. a) Comportamiento completo. b) Ampliación en 5 min.

En cuanto al contenido de humedad no se perciben cambios en tiempo de secado tanto con los parámetros erróneos, como con los parámetros estimados, esto se debe a que, al seguir la misma trayectoria planificada, el controlador consigue ajustarse adecuadamente a la curva sin afectar al tiempo requerido para alcanzar la humedad en equilibrio.

Mientras que, en cuanto al flujo de calor que se requiere, con los parámetros estimados se estabiliza en 61.07 kW y con los parámetros con error del 30 % se obtiene 61.18 kW. Este comportamiento se refleja tanto en el caso 1 como con los casos del polinomio B_2.

5.2.3. Control de Modo Deslizante

Como se comentó en la **sección 3.2.3**, el SMC ha tomado una gran relevancia, ya que se ha aplicado en diferentes procesos obteniendo un buen comportamiento ante las perturbaciones del sistema o de los parámetros. Para compararlo con los controladores

ya expuestos, se realizó de igual manera el cambio de los parámetros con errores para el chile obtenidos en la **sección 5.2.1.1**, estos errores fueron del 10 % y 30 % como en los controladores anteriores. La planificación de la trayectoria que se simuló fue únicamente con el polinomio B_1 ya que no se presentó variación en el controlador anterior con el polinomio B_2.

En las **Figuras 5.18-5.19** se aprecia el comportamiento del controlador ante la planificación de la trayectoria y al cambio de los parámetros. En ambos casos, se observa una ligera perturbación en la trayectoria que realiza la T_A cuando se realiza el cambio de los parámetros, siento está menor que en el controlador de 2 etapas. Lo que demuestra que tiene insensibilidad a las variaciones y perturbaciones como lo comenta (Camacho, 2005).

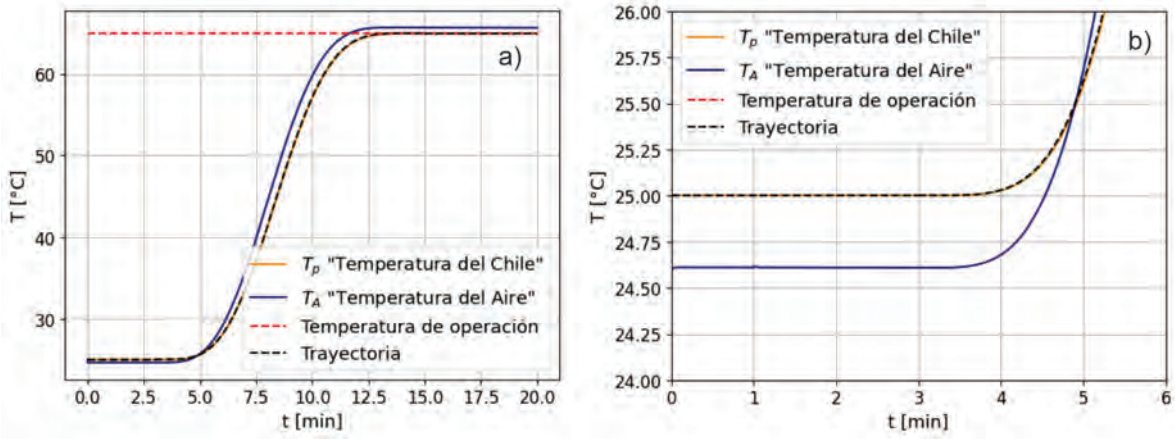

Figura 5.18: Comportamiento de la temperatura con SMC Caso 1 con B_1. a) Trayectoria completa. b) Ampliación en 5 min.

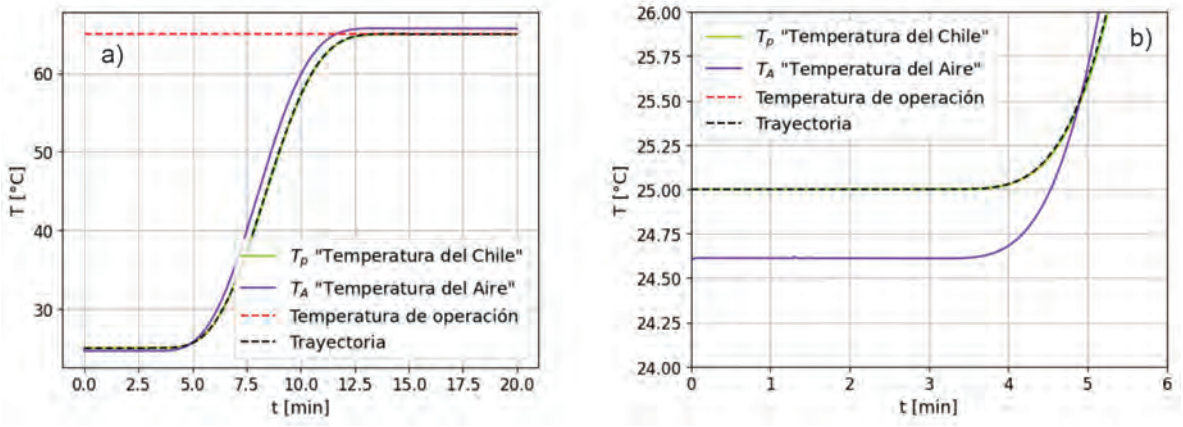

Figura 5.19: Comportamiento de la temperatura con SMC Caso 2 con B_1. a) Trayectoria completa. b) Ampliación en 5 min.

En cuanto a los datos de Q_f y X son prácticamente los mismos para los 2 casos, para el Q_f es de 61 kW, mientras que, para X es de 3.83 $kgH_2O/kgProd$ en los primeros 20 minutos de simulación. Nuevamente esto se debe a que el controlador sigue la trayectoria planificada y no tiene variación al hacer el cambio de los parámetros de la cinética de secado hacia los estimados.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

6.1. Conclusiones

La estimación de parámetros es una parte esencial en la implementación de los modelos matemáticos, esta estimación puede ser en línea o fuera de línea. Para el proceso de secado se suele utilizar la estimación fuera de línea pero esto conlleva hacer muchos experimentos a diversas temperaturas, por lo que para estimarlos se requiere mucho tiempo.

Por esta razón en este trabajo se optó por la determinación de parámetros en línea. Se demostró que la estimación de los parámetros de la cinética de secado en línea utilizando una identificación algebraica es una buena alternativa para conocer estos parámetros y así desarrollar y diseñar de mejor manera los modelos y controladores.

También se observó que la estimación de los parámetros en estos procesos impacta de manera importante en los controladores basados en modelo con "Set point", controladores más utilizados para este proceso, ya que al no tener unos parámetros correctos, el controlador tarda mucho tiempo en alcanzar la referencia estipulada, lo que podría afectar la calidad del producto.

En cuanto a los controladores con seguimiento de trayectoria, se concluye que son una gran alternativa para mantener la temperatura del producto sin tener los sobreim-

pulsos de temperatura que se mostraron en el controlador no lineal basado en linealización, esto puede ayudar a no dañar el producto. Aunado a esto, el controlador de modo deslizante es más robusto a comparación del controlador de 2 etapas ya que al utilizar los parámetros estimados en el SMC la perturbación es prácticamente imperceptible.

Con todo esto se elabora la siguiente tabla en donde se hace una comparación de la estimación fuera de línea y en línea. Se confirma que la estimación en línea es de gran ayuda en procesos de secado.

Tabla 6.1: Comparación entre estimación en línea y fuera de línea.

Estimación	**Precisión**	**Robustez**	**Flexibilidad**	**Tiempo**
Fuera de línea	Buena	Buena	Mala	Mayor
En línea	Buena	Buena	Buena	Menor

6.2. Trabajo Futuro

Durante el procesamiento de los resultados obtenidos en este trabajo utilizando la identificación algebraica para la estimación de los parámetros de la cinética de secado han surgido nuevos enfoques e ideas de rumbos que se pueden tomar con el uso de esta técnica de estimación, los más sustanciales son presentados a continuación:

- Implementar la estimación en línea de los parámetros de la cinética de secado al proceso real para comprobar el ajuste de los parámetros obtenidos.
- Implementar los controladores por seguimiento de trayectoria y analizar sus beneficios en cuanto a la calidad del producto obtenido, tanto física como nutricional.
- Extender el usó de la identificación algebraica a otros tipos de cinéticas como Page, Midilli, entre otros, y a parámetros con relevancia en el proceso de secado.

Bibliografía

N. Abdenouri, A. Zoukit, I. Salhi, and S. Doubabi. Model identification and fuzzy control of the temperature inside an active hybrid solar indirect dryer. *Solar Energy*, 231:328–342, 2022. doi:10.1016/j.solener.2021.11.026. URL https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.026.

Z. Abdullah, F. S. Taip, S. M. M. Kamal, and R. Z. Abdul Rahman. Nonlinear model-based inferential control of moisture content of spray dried coconut milk. *Foods*, 9(9):1177, 2020. doi:10.3390/foods9091177. URL https://doi.org/10.3390/foods9091177.

D. B. Ampratwum and A. S. Dorvlo. Evaluation of a solar cabinet dryer as an air-heating system. *Applied Energy*, 59(1):63–71, 1998. doi:10.1016/S0306-2619(97)00043-3. URL https://doi.org/10.1016/S0306-2619(97)00043-3.

A. Arabshahid and D. B. Lund. Considerations in calculating kinetic. *Analysis*, 1985.

M. A. Basunia and T. Abe. Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *Journal of Food Engineering*, 47(4):295–301, 2001. doi:10.1016/S0260-8774(00)00133-3. URL https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00133-3.

F. Beltran-Carbajal and G. Silva-Navarro. A fast parametric estimation approach of signals with multiple frequency harmonics. *Electric Power Systems Research*, 144:157–162, 2017. doi:10.1016/j.epsr.2016.11.023. URL https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.11.023.

F. Beltran-Carbajal, A. Valderrabano-Gonzalez, J. C. Rosas-Caro, and A. Favela-Contreras. Output feedback control of a mechanical system using magnetic levitation. *ISA Transactions*, 57:352–359, 2015. doi:10.1016/j.isatra.2015.01.012. URL https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.01.012.

F. Beltran-Carbajal, G. Silva-Navarro, L. G. Trujillo-Franco, R. Tapia-Olvera, A. Valderrabano-Gonzalez, H. Yanez-Badillo, J. C. Rosas-Caro, and J. C. Mayo-Maldonado. On-line parametric estimation of damped multiple frequency oscillations. *Electric Power Systems Research*, 144(3):423–432, 2018. doi:10.1016/j.epsr.2016.11.023. URL https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.11.023.

F. Beltran-Carbajal, G. Silva-Navarro, and A. Jimenez-Sanchez. Online algebraic estimation of modal parameters and excitation frequency of a vibrating system. In *Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2019*, pages 0–8, 2019.

F. Beltran-Carbajal, J. E. Esquivel-Cruz, H. Yañez-Badillo, I. de J. Rivas-Cambero, D. Sotelo, and C. Sotelo. Multiple-frequency force estimation of controlled vibrating systems with generalized nonlinear stiffness. *Mathematics*, 11(13):1–29, 2023. doi:10.3390/math11132838. URL https://doi.org/10.3390/math11132838.

L. Biagiotti and C. Melchiorri. *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Springer-Verlag, 2008.

S. Biswas and B. Lovell. *Bézier and Splines in Image Processing and Machine Vision*. Springer-Verlag, 1ra edition, 2008.

O. Camacho. Sliding mode control in process industry. In *Instrument Engineers Handbook*, pages 351–359. CRC Press, 4ta edition, 2005.

I. Ceylan, M. Aktaş, and H. Doğan. Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits. *Applied Thermal Engineering*, 27(11–12):1931–1936, 2007. doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.12.020. URL https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.020.

S. Chapra and R. Canale. *Métodos numéricos para ingenieros*. 5ta edition, 2006.

V.D. Correa. *Control de un sistema no lineal usando técnicas inteligentes. El péndulo con rueda de reacción*. PhD thesis, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2016.

M. Cuatle. *Estimación de parámetros de un motor de inducción usando redes neuronales y sistemas neurodifusos*. PhD thesis, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2018.

S. Darıcı and S. Şen. Experimental investigation of convective drying kinetics of kiwi under different conditions. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 51(8):1167–1176, 2015. doi:10.1007/s00231-014-1487-x. URL `https://doi.org/10.1007/s00231-014-1487-x`.

P. Dufour. Control engineering in drying technology: Review and trends. *Drying Technology*, 24(7):889–904, 2006.

J. P. Ekka and M. Palanisamy. Determination of heat transfer coefficients and drying kinetics of red chilli dried in a forced convection mixed mode solar dryer. *Thermal Science and Engineering Progress*, page 100607, 2020. doi:10.1016/j.tsep.2020.100607. URL `https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100607`.

A. El-Beltagy, G. R. Gamea, and A. H. A. Essa. Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78(2):456–464, 2007. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.10.015. URL `https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.015`.

H. S. EL-Mesery. Improving the thermal efficiency and energy consumption of convective dryer using various energy sources for tomato drying. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12):10245–10261, 2022. doi:10.1016/j.aej.2022.03.076. URL `https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.076`.

H. S. EL-Mesery, N. M. Tolba, and R. M. Kamel. Mathematical modelling and performance analysis of airflow distribution systems inside convection hot-air dryers. *Ale-*

xandria Engineering Journal, 62:237–256, 2023. doi:10.1016/j.aej.2022.07.027. URL https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.027.

P. Englezos and N. Kalogerakis. *Applied parameter estimation for chemical engineers*. M. D. Inc, 2001.

J. A. Ezquerro. *Iniciación a los métodos numéricos*. S. de publicaciones Universidad de la Rioja, 1 edition, 2012.

W. J. Ferguson and I. W. Turner. A control volume finite element numerical simulation of the high temperature drying of spruce. *Journal of Computational Physics*, 125: 59–70, 1996. doi:10.1080/07373939508916977. URL https://doi.org/10.1080/07373939508916977.

A. G. Ferreira, A. L. T. Charbel, R. L. Pires, J. G. Silva, and C. B. Maia. Experimental analysis of a hybrid dryer. *Revista de Engenharia Térmica*, 6(2):03, 2007. doi:10.5380/reterm.v6i2.61680. URL https://doi.org/10.5380/reterm.v6i2.61680.

J. L. Figueroa. Modelos y dinámica de procesos. In *Control de Procesos*, pages 66–77. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computadoras-UNS, 2012.

E. J. Flies, B. W. Brook, L. Blomqvist, and J. C. Buettel. Forecasting future global food demand: A systematic review and meta-analysis of model complexity. *Environment International*, 120:93–103, 2018. doi:10.1016/j.envint.2018.07.019. URL https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.019.

M. Fliess and H. Sira-Ramírez. An algebraic framework for linear identification. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 9:151–168, 2003. doi:10.1051/cocv:2003008. URL https://doi.org/10.1051/cocv:2003008.

M. Folwarczny, J. D. Christensen, N. P. Li, V. Sigurdsson, and T. Otterbring. Crisis communication, anticipated food scarcity, and food preferences: Preregistered evidence of the insurance hypothesis. *Food Quality and Preference*, 91, 2021.

doi:10.1016/j.foodqual.2021.104213. URL https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2021.104213.

M. C. Gilago and V. P. Chandramohan. Study of drying parameters of pineapple and performance of indirect solar dryer supported with thermal energy storage: Comparing passive and active modes. *Journal of Energy Storage*, 61:106810, 2023. doi:10.1016/j.est.2023.106810. URL https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106810.

M. Grewal and A. Andrews. *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*. J. W. & Sons, 2008.

X. Guo, X. Tang, Z. Song, and F. Gao. Transformation of the glyph curve in map publishing. *Advanced Materials Research*, 341–342:883–887, 2012. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.341-342.883. URL https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.341-342.883.

M. Hafez, P. Seats, J. Tou, and L. Lin. Cleaner and circular bioeconomy: Multi-objective planning for food production in a mountainous region: Strategic land utilization for meeting food demand and economic revitalization. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 3:100023, 2022. doi:10.1016/j.clcb.2022.100023. URL https://doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100023.

S. G. Haralampu, I. Saguy, and M. Karel. Estimation of arrhenius model parameters using three least squares methods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 9 (3):129–143, 1985. doi:10.1111/j.1745-4549.1985.tb00715.x. URL https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1985.tb00715.x.

R. Hopfenberg and C. Hill. Population density and redistribution of food resources. In *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*. Elsevier, 2018. doi:10.1016/B978-0-12-812687-5.22379-4. URL https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812687-5.22379-4.

M. A. Hossain, B. M. A. Amer, and K. Gottschalk. Hybrid solar dryer for quality dried tomato. *Drying Technology*, 26(12):1591–1601,

2008. doi:10.1080/07373930802467466. URL https://doi.org/10.1080/07373930802467466.

R. Isermann and M. Münchhof. *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

D. Ivanova, N. Valov, and I. Valova. Dynamic control for convective apricots dryer. In *2020 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*, pages 1–5. IEEE, 2020. doi:10.1109/ICAI50593.2020.9311336. URL https://doi.org/10.1109/ICAI50593.2020.9311336.

S. Kaleemullah and R. Kailappan. Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies. *Journal of Food Engineering*, 76(4):531–537, 2006. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.05.049. URL https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.049.

C. T. Kiranoudis, Z. B. Maroulis, and D. Marinos-Kouris. Drying kinetics of some fruits. *Drying Technology*, 15(1–2):1399–1418, 1997. doi:10.1080/07373939508902366. URL https://doi.org/10.1080/07373939508902366.

S. J. Kowalski and A. Pawłowski. Modeling of kinetics in stationary and intermittent drying. *Drying Technology*, 28(8):1023–1031, 2010. doi:10.1080/07373937.2010.497095. URL https://doi.org/10.1080/07373937.2010.497095.

M. Kumar, S. K. Sansaniwal, and P. Khatak. Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55:346–360, 2016. doi:10.1016/j.rser.2015.10.158. URL https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158.

P. H. Lewis and C. Yang. Sistemas de control en ingenieria. *Inge-Cuc*, 6(1), 1999.

Y. Li, Z. Xu, X. Yang, Z. Zhao, L. Zhuang, J. Zhao, and H. Liu. Identification and high-precision trajectory tracking control for space robotic manipulator. *Acta Astronautica*, 214:484–495, 2023. doi:10.1016/j.actaastro.2023.11.001.

A. B. Lingayat, V. P. Chandramohan, V. R. K. Raju, and V. Meda. A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – dryer setup, its performance, energy storage and important highlights. *Applied Energy*, 258:114005, 2020. doi:10.1016/j.apenergy.2019.114005.

M. Llosa and J. Gómez. Solución numérica del atractor de lorenz por el método de runge-kutta-felhberg. *Revista de Investigación de Física*, 7(12):83–85, 2004.

P. S. Madamba, R. H. Driscoll, and K. A. Buckle. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1):75–97, 1996. doi:10.1016/0260-8774(95)00062-3. URL https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00062-3.

S. Malakar, V. K. Arora, P. K. Nema, and D. K. Yadav. Development of infrared-assisted hybrid solar dryer for drying pineapple slices: Investigation of drying characteristics, mass transfer parameters, and quality attributes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 88(Diciembre 2022):103437, 2022. doi:10.1016/j.ifset.2023.103437. URL https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103437.

R. Mandal, Y. Shi, A. Singh, R. Y. Yada, and A. P. Singh. Food safety and preservation. In *Encyclopedia of Gastroenterology*. Elsevier Inc., 2da edition, 2018. doi:10.1016/B978-0-12-801238-3.65904-4. URL https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.65904-4.

M. Masud, A. Karim, A. Ananno, and A. Ahmed. *Sustainable Food Drying Techniques in Developing Countries: Prospects and Challenges*. 2020. URL https://doi.org/10.1007/978-3-030-42476-3.

W. McCabe, J. Smith, and P. Harriot. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. McGraw-Hill Interamericana, 7ma edition, 2007.

Z. Meng, X. Cui, H. Zhang, Y. Liu, Z. Wang, and F. Zhang. Study on drying characteristics of yam slices under heat pump-electrohydrodynamics combined drying. *Case Studies in Thermal Engineering*, 41(Noviembre 2022):102601, 2022. doi:10.1016/j.csite.2022.102601. URL https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102601.

H. O. Menges and C. Ertekin. Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77(1):119–125, 2006. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.06.049. URL https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.049.

H. H. Mohammed, Y. B. Tola, A. H. Taye, and Z. K. Abdisa. Effect of pretreatments and solar tunnel dryer zones on functional properties, proximate composition, and bioactive components of pumpkin (*cucurbita maxima*) pulp powder. *Heliyon*, 8(10): e10747, 2022. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e10747. URL https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10747.

S. Mohammed, N. Fatumah, and N. Shadia. Drying performance and economic analysis of novel hybrid passive-mode and active-mode solar dryers for drying fruits in east africa. *Journal of Stored Products Research*, 88:101634, 2020. doi:10.1016/j.jspr.2020.101634. URL https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101634.

Y. Mohana, R. Mohanapriya, T. Anukiruthika, K. S. Yoha, J. A. Moses, and C. Anandharamakrishnan. Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy*, 208:321–344, Agosto 2020. doi:10.1016/j.solener.2020.07.098. URL https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.098.

A. S. Mujumdar and Z. Pakowski, editors. *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, 2020. doi:10.1201/9780429289774. URL https://doi.org/10.1201/9780429289774.

A. Nieves and F. Domingues. *Métodos numéricos aplicados a la ingeniería*. CECSA, 2da edition, 2004.

M. R. Nukulwar and V. B. Tungikar. Recent development of the solar dryer integrated with thermal energy storage and auxiliary units. *Thermal Science and Engineering Progress*, 29:101192, 2022. doi:10.1016/j.tsep.2021.101192. URL https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101192.

Katsuhiko Ogata. *Modern Control Engineering*. Pearson, 2010.

H. Oueslati, S. B. Mabrouk, and A. Mami. System design, mathematical modelling and simulation of process drying in a solar-gas convective tunnel dryer. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(5):1–8, 2012. URL http://www.ijser.org/researchpaper/System-Design-Mathematical-Modellingand-Simulation-of-Process-Drying-in-a-Solar-Gas pdf.

Z. Pakowski and A. S. Mujumdar. *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, 2006. URL https://doi.org/10.1201/97804292897745.

P. C. Panchariya, D. Popovic, and A. L. Sharma. Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52(4):349–357, 2002. doi:10.1016/S0260-8774(01)00126-1. URL https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00126-1.

M. Perez, A. Perez, and E. Perez. *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*. Editorial, 2007.

L. N. Petersen, N. K. Oulsen, H. H. Niemann, C. Utzen, and J. B. Jorgensen. Application of constrained linear MPC to a spray dryer. In *2014 IEEE Conference on Control Applications, CCA. Part of 2014 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, pages 2120–2126. IEEE, 2014. doi:10.1109/CCA.2014.6981616. URL https://doi.org/10.1109/CCA.2014.6981616.

O. Prakash, V. Laguri, A. Pandey, A. Kumar, and A. Kumar. Review on various modelling techniques for the solar dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62:396–417, 2016. doi:10.1016/j.rser.2016.04.028. URL https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.028.

R. Queiroz, A. L. Gabas, and V. R. N. Telis. Drying kinetics of tomato by using electric resistance and heat pump dryers. *Drying Technology*, 22(7):1603–1620, 2004. doi:10.1081/DRT-200025614. URL https://doi.org/10.1081/DRT-200025614.

I. N. Ramos, T. R. S. Brandão, and C. L. M. Silva. Simulation of solar drying of

grapes using an integrated heat and mass transfer model. *Renewable Energy*, 81: 896–902, 2015. doi:10.1016/j.renene.2015.04.011. URL https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.011.

N. S. Rathore and N. L. Panwar. Experimental studies on hemi cylindrical walk-in type solar tunnel dryer for grape drying. *Applied Energy*, 87(8):2764–2767, 2010. doi:10.1016/j.apenergy.2010.03.014. URL https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.014.

A. Reyes, F. Cubillos, A. Mahn, and J. Vasquez. Control system in a hybrid solar dryer. In *IREC 2014 - 5th International Renewable Energy Congress*, pages 5–9, 2014. doi:10.1109/IREC.2014.6826936. URL https://doi.org/10.1109/IREC.2014.6826936.

M. Sahoo, S. Titikshya, P. Aradwad, V. Kumar, and S. N. Naik. Study of the drying behaviour and color kinetics of convective drying of yam (*dioscorea hispida*) slices. *Industrial Crops and Products*, 176:114258, Diciembre 2022. doi:10.1016/j.indcrop.2021.114258. URL https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114258.

R. I Sawhney, D.R. Pangavhane, and P.N. Sarsavadia. Driying kinetics of single layer thompson seedlees grapes under beated air conditions. *Drying Technology*, 17(1): 215–236, 1999.

D. E. Seborg, F. T. Edgar, D. A. Mellichamp, and F. J. Doyle III. *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, Inc., 3ra edition, 2011.

A. Serpa, D. Castrillón, D. Vásquez, and G. Hincapié. Comparación de dos técnicas de deshidratación de guayaba-pera (*psidium guajava l.*) sobre los efectos del contenido de vitamina c y el comportamiento de las propiedades técnico-funcionales de la fibra dietaria. *Revista Lasallista de Investigación*, Enero 2015. doi:10.22507/rli.v12n1a1. URL https://doi.org/10.22507/rli.v12n1a1.

Maria M. Serón and Julio H. Braslavsky. Sistemas no lineales. Notas de clase, Cursos de Automatización y Control Industrial y Procesamiento de Señales, 2001. URL

https://www.fceia.unr.edu.ar/control/snl/Apunte.pdf. Universidad Nacional de Quilmes y Universidad Nacional de Rosario.

A. Shrivastava, A. D. Tripathi, V. Paul, and D. Chandra Rai. Optimization of spray drying parameters for custard apple (*annona squamosa l.*) pulp powder development using response surface methodology (rsm) with improved physicochemical attributes and phytonutrients. *LWT*, 151:112091, Mayo 2021. doi:10.1016/j.lwt.2021.112091. URL https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112091.

H. Sira-Ramírez, E. Fossas, and M. Fliess. An algebraic, on-line, parameter identification approach to uncertain dc-to-ac power conversion. In *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, volume 3, pages 2462–2467, 2002. doi:10.1109/cdc.2002.1184205. URL https://doi.org/10.1109/cdc.2002.1184205.

J. J. Slotine and W. Li. *Applied Nonlinear Control*, volume 199. Prentice Hall Press, 1991.

organization = Sandia National Laboratories / U.S. Nuclear Regulatory Commission year = 1999 url = https://www.nrc.gov/docs/ML0329/ML032900131.pdf5 SNL & NRC, U. S., title = Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment.

F. C. Tedesco, A. J. Bühler, and S. Wortmann. Design, construction, and analysis of a passive indirect solar dryer with chimney. *Journal of Solar Energy Engineering*, 141 (3), 2019. doi:10.1115/1.4041931. URL https://doi.org/10.1115/1.4041931.

S. Tiwari, G. N. Tiwari, and I. M. Al-Helal. Performance analysis of photovoltaic–thermal (PVT) mixed mode greenhouse solar dryer. *Solar Energy*, 133:421–428, 2016. doi:10.1016/j.solener.2016.04.033. URL https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.033.

İsmail T. Tôgrul and Derya Pehlivan. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3):413–

425, 2004. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.02.001. URL https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.001.

Vikas Tomar, G. N. Tiwari, and Brian Norton. Solar dryers for tropical food preservation: Thermophysics of crops, systems and components. *Solar Energy*, 154: 2–13, 2017. doi:10.1016/j.solener.2017.05.066. URL https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.066.

Patchimaporn Udomkun, Seta Romuli, Stefanie Schock, Busarakorn Mahayothee, Murat Sartas, Tesfamicheal Wossen, Emmanuel Njukwe, Bernard Vanlauwe, and Joachim Müller. Review of solar dryers for agricultural products in asia and africa: An innovation landscape approach. *Journal of Environmental Management*, 268: 110730, 2020. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110730. URL https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110730.

S. Umeshtoshniwal and S.R. Karale. A review paper on solar dryer 1*umesh-toshniwal and 2 s.r karale. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3 (2):896–902, 2013.

J. Van Malderen, A. Vezbergiené, and P. Artois. *The Future of Food*. Deloitte, 2022.

P. Van Overschee and B. De Moor. *Subspace Identification for linear system: Theory-implementation-applications*. Kluwer Academic Publishers, 1996. URL https://doi.org/10.1109/IEMBS.2008.4650193.

L. R. Verma, R. A. Bucklin, J. B. Endan, and F. T. Wratten. Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 28(1):296–301, 1985. doi:10.13031/2013.32245. URL https://doi.org/10.13031/2013.32245.

N. Vázquez. *Modela dinámico y control de una planta de deshidratación de productos agroindustriales operada con fuentes mixtas de energía*. PhD thesis, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México, 2023.

S. Yadav, A. B. Lingayat, V. P. Chandramohan, and V. R. K. Raju. Numerical analysis

on thermal energy storage device to improve the drying time of indirect type solar dryer. *Heat and Mass Transfer*, 54(12):3631–3646, 2018. doi:10.1007/s00231-018-2390-7. URL https://doi.org/10.1007s00231-018-2390-7.

L. Yan, B. Ma, and Y. Jia. Trajectory tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots using only measurements for position and velocity. *Automatica*, 159:111374, 2024. doi:10.1016/j.automatica.2023.111374. URL https:doi.org/10.1016j.automatica2023.111374.

X. Yang, Z. Li, and B. Dahhou. Parameter and state estimation for uncertain nonlinear systems by adaptive observer based on differential evolution algorithm. *Applied Sciences*, 10(17), 2020. doi:10.3390/app10175857. URL https://doi.org/10.3390/app10175857.

D. Zill and W. Wright. *Matemáticas avanzadas para ingeniería*. McGraw-Hill Interamericana, 4 edition, 2011.

A. Zoukit, H. El Ferouali, I. Salhi, S. Doubabi, N. Abdenouri, and T. El Kilali. Control of a solar dryer using a hybrid solar gas collector. In *Proceedings of 2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb, CISTEM 2016*, 2016. doi:10.1109/CISTEM.2016.8066825. URL https://doi.org/10.1109/CISTEM.2016.8066825.

A. Zoukit, H. Doubabi, I. Salhi, and N. Abdenouri. Advanced cascade control strategy applied to an indirect hybrid solar-gas dryer: Numerical and experimental investigations. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 2022. doi:10.1016/j.seta.2022.102380. URL https://doi.org/10.1016j.seta2022.102380.

M. Özdemir and Y. Onur Devres. Thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42(4):225–233, 1999. doi:10.1016/S0260-8774(99)00126-0. URL https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00126-0.

Apéndice A

Parámetros del Proceso de Secado

Tabla A.1: Calor específico

Símbolo	**Valor** (J/kgC)	**Descripción**
Cp_A	1000	*Calor específico del aire* (Rao *et al.*, 2014)
Cp_w	4185	*Calor específico del agua* (Rao *et al.*, 2014)
Cp_v	4185	*Calor específico del vapor de agua* (Rao *et al.*, 2014)
Cp_{Ag}	3010	*Calor específico del aguacate* (Stanford, n.d.)
Cp_B	3350	*Calor específico del plátano* (Stanford, n.d.)
Cp_k	3893	*Calor específico del kiwi* (Oliveira *et al.*, 2012)
Cp_{ch}	3810	*Calor específico del chile* (Stanford, n.d.)
Cp_F	3977.46	*Calor específico del Fresa* (Stanford, n.d.)

Tabla A.2: Propiedades Físicas

Símbolo	**Valor**	**Descripción**
M_A	0.6 kg	*Masa de aire en el túnel*
$\dot{m}_A$	90 kg/min	*Flujo másico de aire*
Δh_{v0}	2257×10^3 J/kg	*Calor latente de vaporización*
Xe_{Ag}	0.35 $kgH_2O/kgprod$	*Humedad en equilibrio del aguacate* (Ceylan *et al.*, 2007)
Xe_B	0.5 $kgH_2O/kgprod$	*Humedad en equilibrio del plátano* (Ceylan *et al.*, 2007)
Xe_k	0.75 $kgH_2O/kgprod$	*Humedad en equilibrio del kiwi* (Ceylan *et al.*, 2007)
Xe_{ch}	0.1 $kgH_2O/kgprod$	*Humedad en equilibrio del chile* (Rabha *et al.*, 2017)
Xe_F	0.05 $kgH_2O/kgprod$	*Humedad en equilibrio del Fresa* (El-Beltagy *et al.*, 2007)

Apéndice B

Datos experimentales

Tabla B.1: Datos experimentales Piña (R. Biswas *et al.*, 2022).

50°C		55°C		60°C	
Tiempo (h)	MR	**Tiempo (h)**	MR	**Tiempo (h)**	MR
0	1	0	1	0	1
0.18518519	0.9027027	0.21367521	0.91621622	0.21367521	0.86891892
0.47008547	0.7878378	0.44159544	0.76418919	0.47008547	0.72702703
0.95441595	0.7236486	0.98290598	0.59189189	0.95441595	0.54459459
1.43874644	0.6020270	1.46723647	0.43986486	1.46723647	0.37567568
2.46438746	0.4364864	2.46438746	0.22702703	2.43589744	0.13918919
4.45868946	0.2304054	4.51566952	0.05810811	4.51566952	0.01081081
6.48148148	0.1222973	6.50997151	0.03108108	6.48148148	0.00405405
9.47293447	0.0344594	9.47293447	0.02094595	–	–
12.4928775	0.0108108	12.4643875	0.00067568	–	–
16.4814815	0.0006756	–	–	–	–

Tabla B.2: Datos experimentales ÑName (Sahoo *et al.*, 2022).

50°C		60°C		70°C	
Tiempo (min)	MR	**Tiempo (min)**	MR	**Tiempo (min)**	MR
0	1	0	1	0	1
11.3861228	0.9746114	9.40595513	0.95284979	7.42574213	0.98082907
20.2970134	0.93108804	19.3069295	0.91554409	13.3663358	0.94041446
32.1782008	0.89378234	29.2079039	0.86580306	20.2970134	0.90621766
44.0593882	0.8626943	39.1089236	0.82849736	29.2079039	0.86580306
51.9801949	0.84093269	49.9999819	0.79119165	40.0990075	0.82227983
59.9010016	0.81295341	58.9108724	0.75699485	49.009898	0.78497413
79.7029504	0.76010362	79.7029504	0.68238345	58.9108724	0.74455953
100.495028	0.70725382	99.5949445	0.62020723	78.7128665	0.67616579
119.306939	0.6637306	118.316809	0.56113992	98.5148606	0.61398957
149.009907	0.59533672	149.009907	0.48652851	119.306939	0.54870459
179.702959	0.52694298	178.712876	0.43678748	149.009907	0.47098442
239.108896	0.42124353	239.108896	0.35284965	178.712876	0.41813463
299.504917	0.3341968	298.514879	0.26891182	239.108896	0.32176161
359.900983	0.2626943	358.910854	0.19740932	299.504917	0.22849736
420.29705	0.22227969	419.30692	0.14766829	359.900983	0.15388595
479.702987	0.18808289	479.702987	0.13212434	419.30692	0.10725382
540.098962	0.16010362	540.098962	0.11347149	479.702987	0.09170973
599.504899	0.14145076	598.514861	0.10725382	540.098962	0.08238331
659.900965	0.12901544	658.910836	0.09481864	599.504899	0.07927455
719.306902	0.11968901	718.316773	0.09170973	658.910836	0.07305688
779.702969	0.11036258	778.712839	0.08860097	–	–
839.108906	0.10725382	–	–	–	–
899.504881	0.10414506	–	–	–	–
959.900947	0.10103616	–	–	–	–

Apéndice C

Códigos

```python
import numpy as np

def RK4(fun, tspan, yi, h):
    tam = len(np.transpose(yi))
    x = np.arange(tspan[0], tspan[1] + h, h)
    n = len(x)
    y = np.zeros((n, tam))

    for i in range(n):
        k1 = fun(x[i], yi)
        k2 = fun(x[i] + 0.5 * h, yi + 0.5 * k1 * h)
        k3 = fun(x[i] + 0.5 * h, yi + 0.5 * k2 * h)
        k4 = fun(x[i] + h, yi + k3 * h)

        yi = yi + (h / 6) * (k1 + 2 * k2 + 2 * k3 + k4)
        y[i] = yi
    return [x, y]
```

Listing C.1: Método de Runge-Kutta de orden 4 (RK4)

```
import numpy as np

def estimar_parametros(t, X, et1, et2, et3, et4, et5, et6, et7, et8,
    et9, et10, et11, et12, t0):
     a11=et1; a21=et2; a31=et3;
     a12=et4; a22=et5; a32=et6;
     a13=et7; a23=et8; a33=et9;
     b1=((t-t0)*X)+et10; b2=et11; b3=et12;
     nm0=b3*(a12*a23-a13*a22)-b2*(a12*a33-a13*a32)+b1*(a22*a33-a23*a32);
     nm1=b2*(a11*a33-a13*a31)-b3*(a11*a23-a21*a13)-b1*(a21*a33-a31*a23);
     nm2=b3*(a11*a22-a12*a21)-b2*(a11*a32-a12*a31)+b1*(a21*a32-a22*a31);
     den=(a11*a22*a33)-(a11*a23*a32)-(a12*a21*a33)+(a12*a31*a23)+\
     (a21*a13*a32)-(a13*a22*a31);
     ah0 = nm0/den
     ah1 = nm1/den
     ah2 = nm2/den
     return ah0, ah1, ah2
```

Listing C.2: Función para estimar 3 parámetros

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import Metodos_RK as rk
import math
from Constantes import cte_pina

def modelo(t, x):
    X = x[0]; Tp = x[1]; TA = x[2]
    # Constantes
    mA, CpA, Cpw, Cps, Cpv, MA, Xe, ms, hAp, hv0, a0, a1 = cte_pina()
    # Ecuaciones algebraicas dependientes
    k = a0 + a1 * TA; x30 = 55
    hav = Cpv * Tp + hv0
    Q = 0
    # Modelo
    d_X = -k * (X - Xe)
    d_Tp = (hAp * (TA - Tp) + k * ms * (X - Xe) * ((Cpw - Cpv) * Tp -
        hv0)) / ((Cps + Cpw * X) * ms)
    d_TA = (mA * CpA * (x30 - TA) + Q - hAp * (TA - Tp) + hav * k *
        ms * (X - Xe)) / (MA * CpA)
    xp = np.array([d_X, d_Tp, d_TA])
    return xp

# Condiciones iniciales
x10 = 4.51
x20 = 55
x30 = 55
ci = np.array([x10, x20, x30])
tspan = np.array((0, 1))
h = 0.0001

# Metodo numericos
[t, x] = rk.RK4(modelo, tspan, ci, h)
n = len(t)
```

Listing C.3: Comportamiento del secado

Apéndice D

Congresos y Publicaciones

AMIDIQ 2023: Se presentó un método algebraico para identificación paramétrica en tiempo real del modelo de la cinética de secado de el kiwi, plátano, aguacate y chile. Se proponen fórmulas para calcular en forma cerrada y en el dominio del tiempo los parámetros del modelo.

Figura D.1: Constancia de trabajo, AMIDIQ 2023.

CIENERGIA 2023: Se presentó un control no lineal basado en un método algebraico para identificación paramétrica en tiempo real del modelo de la cinética de secado del chile rojo. Dicho trabajo fue publicado en la Revistad Identidad Energética 2023, volumen 6, No. 2.

Figura D.2: Constancia de ponente, CIENERGIA 2023.

De igual manera, se han colaborado en otros trabajos como:

- Non-linear Model based Trajectory Tracking Control for Drying Process of Spirulina platensis and Red Chili in a Type-Tunnel Dryer para el 2024 21th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (en proceso).