



**Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión**

**Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica**

**Escuela Profesional de Ingeniería Química**

**Sistema de evaporación por quintuple efecto en la Empresa Agroindustrial  
Paramonga S.A. aplicando simulación dinámica – Paramonga 2023**

**Tesis**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico**

**Autor**

Irwin Rugery Estacion Torres

**Asesora**

Dra. Yasmín Jesús Vélez Chang



YASMÍN JESÚS  
VELEZ CHANG  
INGENIERÍA QUÍMICA  
Reg. CIP. N°130305

Huacho – Perú

2026



**Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

**Reconocimiento:** Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



# UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

## LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Escuela Profesional de Ingeniería Química

### INFORMACIÓN DE METADATOS

<b>DATOS DEL AUTOR:</b>		
<b>NOMBRES Y APELLIDOS</b>	<b>DNI</b>	<b>FECHA DE SUSTENTACIÓN</b>
Irwin Rugery Estacion Torres	71512890	27/03/2026
<b>DATOS DEL ASESOR:</b>		
<b>NOMBRES Y APELLIDOS</b>	<b>DNI</b>	<b>CÓDIGO ORCID</b>
Yasmín Jesús Vélez Chang	41943603	<a href="https://orcid.org/0000-0003-0333-8173">https://orcid.org/0000-0003-0333-8173</a>
<b>DATOS DE MIEMBROS DE JURADO PREGRADO</b>		
<b>NOMBRES Y APELLIDOS</b>	<b>DNI</b>	<b>CÓDIGO ORCID</b>
Maximo Tomas Salcedo Meza	15602588	<a href="https://orcid.org/0000-0003-1993-2513">https://orcid.org/0000-0003-1993-2513</a>
Edwin Guillermo Galvez Torres	15592688	<a href="https://orcid.org/0000-0002-7421-4453">https://orcid.org/0000-0002-7421-4453</a>
Jose Alonso Toledo Sosa	80302533	<a href="https://orcid.org/0000-0002-8278-1538">https://orcid.org/0000-0002-8278-1538</a>

# Estacion Torres Irwin Rugby 2025 - 075141

## Sistema de evaporación por quintuple efecto en la empresa Agroindustrial Paramonga S.A. aplicando simulación dinámica...

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE FIQyM - PREGRADO - 2026

Unidad de Investigación de la FIQyM - 2026

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

tmoid::1:3484132875

Fecha de entrega

17 feb 2026, 3:31 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

17 feb 2026, 3:44 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

BORRADOR\_DE\_TESIS\_RUGERY\_ESTACI\_N\_TORRES\_FINAL.docx

Tamaño del archivo

588.0 KB

82 páginas

14.568 palabras

80.819 caracteres



Página 2 de 34 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: tmoid::1:3484132875

## 16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía

### Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

### Fuentes principales

15% Fuentes de Internet

2% Publicaciones

8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarse.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y lo revise.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Gabriel y Elena, por haberme apoyado durante mis años de carrera profesional aconsejándome y motivándome siempre para lograr mis metas trazadas.

A mis hermanos, compañeros y docentes que siempre estuvieron apoyándome en todo momento y ahora poder compartir con ustedes todo lo aprendido durante mi etapa universitaria.

Irwin Rugery Estacion Torres

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a Dios por darme vida y salud. En segundo lugar, a mis padres Gabriel y Elena, por sus consejos, enseñanza, apoyo y dedicación que tuvieron conmigo para que hoy en día pueda ser una persona profesional.

A mi hermana y cuñado por apoyarme de alguna u otra manera durante mi carrera universitaria y cumplir una de mis metas planteadas para el futuro.

Irwin Rugery Estacion Torres

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
INDICE.....	vi
INDICE DE TABLAS.....	viii
INDICE DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiii
Capítulo I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	15
1.2 Formulación del problema .....	19
1.2.1 Problema general .....	20
1.2.2 Problemas específicos.....	20
1.3 Objetivos de la investigación .....	20
1.3.1 Objetivo general .....	20
1.3.2 Objetivos Específicos .....	21
1.4 Justificación de la investigación.....	21
1.5 Delimitaciones del estudio .....	22
1.6 Viabilidad del estudio .....	23
Capítulo II. MARCO TEÓRICO .....	24
2.1 Antecedentes de la investigación .....	24
2.2 Bases teóricas.....	31
2.3 Definición conceptuales.....	41
2.4 Formulación de hipótesis .....	44
2.4.1 Hipótesis general .....	44
2.4.2 Hipótesis específica.....	44
Capítulo III. METODOLOGÍA .....	46
3.1 Diseño metodológico.....	46
3.2 Población y muestra.....	47
3.3 Operacionalización de variable e indicadores.....	48
3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de dato .....	50
3.5 Técnicas para procesamiento de información .....	51

Capítulo IV. RESULTADOS .....	53
4.1 Resultados Simulación en estado estacionario .....	53
4.2 Resultados simulación dinámica .....	55
Capítulo V. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	74
5.1 Discusión .....	74
5.2 Conclusiones .....	75
5.3 Recomendaciones .....	77
Capítulo V. FUENTES DE INFORMACIÓN .....	79
ANEXOS .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Elevación del punto de ebullición de solución azucarada y jugo de caña a presión 760 mmHg.....	36
Tabla 2. Operacionalización de variable .....	48
Tabla 3. Solución en estado estacionario de sistema de evaporación V efecto.....	53
Tabla 4. Validación de programa de simulación.....	55
Tabla 5. Perturbación y su efecto sobre concentración (Xi).....	72
Tabla 5. Perturbación y su efecto sobre temperatura (Ti).....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Monograma de Othmer y Silvis.....	37
Figura 2.	Respuesta de la concentración de I efecto perturbando caudal de alimentación.....	56
Figura 3.	Respuesta de temperatura de I efecto perturbando caudal de alimentación. ....	57
Figura 4	Respuesta de concentración de V efecto perturbando caudal de alimentación.....	58
Figura 5.	Respuesta de temperatura de vapor de V efecto perturbando caudal de alimentación.....	59
Figura 6.	Respuesta de concentración de I efecto perturbando concentración alimentación.....	60
Figura 7.	Respuesta de la temperatura de vapor del I efecto perturbando la concentración alimentación. ....	61
Figura 8.	Respuesta de concentración de V efecto perturbando concentración alimentación.....	62
Figura 9.	Respuesta de temperatura de vapor de V efecto perturbando concentración alimentación.....	63
Figura 10.	Respuesta de concentración de I efecto perturbando temperatura del vapor de escape.....	64
Figura 11.	Respuesta de temperatura de vapor de I efecto perturbando temperatura del vapor de escape.....	65
Figura 12.	Respuesta de concentración de V efecto perturbando temperatura del vapor de escape.....	66
Figura 13.	Respuesta de temperatura de vapor de V efecto perturbando temperatura de vapor de escape.....	67
Figura 14.	Respuesta de concentración de I efecto perturbando temperatura de alimentación de jugo.....	68

Figura 15. Respuesta de temperatura de vapor de I efecto perturbando temperatura de alimentación del jugo.....	69
Figura 16. Respuesta de la concentración de V efecto perturbando temperatura de alimentación del jugo.....	70
Figura 17. Respuesta de la concentración de V efecto perturbando temperatura de alimentación del jugo.....	71
Figura 18. La perturbación y su efecto sobre la concentración de I y V efecto. ....	72
Figura 19. La perturbación y su efecto sobre Temperatura de I y V efecto. ....	73

## RESUMEN

En Agro Industrial Paramonga S.A., nos propusimos optimizar las operaciones de la empresa, enfocándonos principalmente en la aplicación de la simulación dinámica. Esta técnica, basada en modelos matemáticos, permite anticipar el comportamiento de un sistema ante la implementación de diferentes escenarios. La investigación se centró en desarrollar un modelo dinámico para el sistema de producción en el área de evaporación del proceso de fabricación de azúcar. Conceptualizamos evaporación como una operación unitaria bajo sistema de control. Aquí, el rendimiento de variables clave, como las órdenes relacionadas con la eficiencia de la evaporación en los efectos controlados, se reintroduce al modelo para refinar desempeños. El modelo dinámico fue elaborado en Simulink, una plataforma de simulación de MatLab, siguiendo la metodología de dinámica de sistema. Los hallazgos importantes revelan son cruciales los bucles de retroalimentación integrados en el modelo para mantener la estabilidad del sistema productivo, el nivel del inventario y los flujos de producción en diferentes estaciones. Se verificó esto bajo dos escenarios distintos: uno donde la capacidad de producción superaba la demanda, y otro donde era inferior. Se constató que, incluso cuando la demanda de clientes excedía a la capacidad productiva, aunque se generaban órdenes pendientes, mientras niveles de inventario como flujos de producción permanecían estables.

**Palabras Clave:** Sistema de Evaporación, Quintuple efecto y Simulación dinámica

## ABSTRACT

At Agro Industrial Paramonga S.A., we set out to optimize the company's operations, focusing primarily on the application of dynamic simulation. This technique, based on mathematical models, allows us to anticipate the behavior of a system under different scenarios. The research centered on developing a dynamic model for the production system in the evaporation area of the sugar manufacturing process. We conceptualized evaporation as a unit operation under a control system. Here, the performance of key variables, such as the orders related to evaporation efficiency in the controlled effects, is reintroduced into the model to refine performance. The dynamic model was developed in Simulink, a MATLAB simulation platform, following the system dynamics methodology. Key findings reveal the crucial role of the feedback loops integrated into the model to maintain the stability of the production system, inventory levels, and production flows at different stations. This was verified under two distinct scenarios: one where production capacity exceeded demand, and another where it fell short. It was observed that even when customer demand exceeded production capacity, backorders were generated, while inventory levels and production flows remained stable.

**Keywords:** Evaporation System, Quintuple Effect, Dynamic Simulation

## INTRODUCCIÓN

La fabricación de azúcar es el proceso donde se incluye etapas críticas, siendo la evaporación una de las más relevantes. Esta operación unitaria de transferencia de masa tiene como objetivo principal la concentración de los jugos purificados, elevando sus grados Brix (una medida estándar de concentración en la industria azucarera) hasta alcanzar un valor predefinido por la tecnología del proceso, tal como lo describió Chi Chou (2000). Este proceso se lleva a cabo en evaporadores de múltiple efecto, un diseño que optimiza el uso de energía al reutilizar el vapor generado en el primer efecto en las etapas subsiguientes.

Nuestro estudio se centra en la unidad de evaporación en Empresa Agro Industrial Paramonga S.A., ubicada en Paramonga, provincia de Barranca, departamento Lima, Perú. Esta instalación de cinco evaporadores configurados para operar en un quintuple efecto, un arreglo que permite evaporar la necesaria cantidad de agua para que la meladura alcance una concentración de 65°Brix a la salida del último efecto. Es importante destacar que este último efecto está equipado con un condensador, elemento crucial para generar la presión requerida en la subsiguiente etapa de cristalización.

Actualmente, la operación de estos evaporadores se realiza de forma semi-automática, y el sistema ha presentado desafíos significativos. Entre ellos, destacan los problemas de retención, que conllevan a un indeseable incremento en el color de la meladura y a la inversión de la sacarosa, reacciones que impactan negativamente la calidad final del azúcar. Ante esta problemática, se propuso implementar un sistema de control diseñado específicamente para atender los requerimientos operacionales. Para ello, partimos del modelado detallado del sistema, utilizando datos reales de diversas variables operacionales como flujo, temperatura, presión, concentración y nivel. Mediante el uso de

Simulink de MatLab, estamos simulando las estrategias de control más adecuadas para gestionar el nivel en cada vaso evaporador y asegurar la concentración de salida del último efecto de evaporación, buscando así superar los desafíos actuales y optimizar la producción.

## Capítulo I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Descripción de la realidad problemática

Agro Industrial Paramonga S.A., tiene como compromiso la mejora de la eficiencia, cumpliendo con los plazos de entrega y aumentando la satisfacción de los clientes lo cual los ha impulsado a implementar un software de simulación dinámica enfocado en el balance energético de un sistema de evaporadores de quintuple efecto.

Diferenciándose de otros desarrolladores de software de simulación por su dedicación exclusiva a generar valor tangible para las organizaciones. Su metodología prioriza la escucha activa de necesidades del cliente, invirtiendo mayor parte de su tiempo y recursos en desarrollar soluciones a medida, antes que el marketing y publicidad. Esto les permite asegurar que su software de simulación ofrezca un valor máximo para quienes confían en la empresa. Cuentan con una base sólida de usuarios activos y un equipo encargado del soporte técnico altamente capacitado, presto a asistir en cada paso de la experiencia de simulación. Por otro lado, entienden la urgencia de obtener respuestas claras sobre sus procesos de negocio, y su objetivo es precisamente ayudar a descubrirlas.

La ingeniería química se enfrenta a una era de desafíos sin precedentes, impulsada por la demanda de **nuevos productos** y una creciente **conciencia ambiental** que exige **optimización energética** y un **uso racionalizado de combustibles**. Para abordar estas complejas exigencias, es imperativo encontrar **alternativas económicas y viables**. En este contexto, emerge la **simulación de proceso** como herramientas excepcionalmente eficaces para analizar, optimizar y sintetizar, permitiendo proponer soluciones innovadoras a los retos contemporáneos.

El avance de los simuladores de procesos a nivel global ha sido meteórico, impulsado principalmente por tres factores clave:

a) **Avances en hardware:** La disponibilidad de **computadoras con procesadores más veloces**, junto con **interfaces gráficas intuitivas**, ha facilitado enormemente la manipulación de datos y la visualización de resultados complejos. La capacidad de almacenar grandes volúmenes de información también ha sido fundamental.

b) **Evolución de los lenguajes de programación:** La emergencia de un **lenguaje de programación estructurado** ha simplificado significativamente en cuanto a resolución de un sistema de ecuación y ejecución de simulaciones. Ahora, unas pocas sentencias pueden lograr tareas complejas de manera mucho más eficiente.

c) **Precisión en el cálculo de propiedades:** Se ha logrado una notable mejora respecto a **cálculos en propiedades de mezcla y componente**, de **desviaciones mínimas** respecto a los datos obtenidos experimentalmente. Esto confiere una mayor fiabilidad a los modelos predictivos.

La simulación de procesos ofrece una ventaja sustancial: la capacidad de derivar información crucial para análisis, síntesis y optimización de sistema, todo ello a partir de datos reales. Estos datos sirven no solo para desarrollar modelos matemáticos en caso no existiera, sino también para la validación del resultado obtenido de la simulación misma.

Lo más notable es que, a diferencia de los métodos experimentales tradicionales, la simulación reduce drásticamente la necesidad de realizar múltiples experimentos. Esto no solo conlleva a un ahorro significativo en costos, sino que también minimiza la desestabilización de las operaciones de planta. Cuando se emplea un modelo adecuado, la reproducibilidad de los resultados es consistentemente alta,

ofrece un firme y fiable fundamento para la toma de decisiones.

La simulación se ha consolidado como un instrumento crucial para respaldar tomas de decisión sobre el diseño, funcionamiento y optimización en cuanto a un proceso químico.

Para un ingeniero químico, simular un proceso significa resolver ecuaciones que describen cómo la masa y la energía fluyen y cambian, ya sea que el proceso esté operando de manera constante o que esté en constante cambio. Esto abarca también el dimensionamiento de equipos y la estimación de los costos asociados, culminando en una evaluación preliminar integral del proceso.

Es ampliamente reconocido que la simulación es un campo que integra diversas áreas del conocimiento. Para dominar esto, se debe entender a fondo cómo usar métodos numéricos para resolver los distintos tipos de ecuaciones que surgen, ya sean algebraicas o diferenciales. También es fundamental tener base sólida en cómo se construyen los modelos de procesos, cómo funcionan las operaciones unitarias y cómo se mueven la masa, calor y cantidad de movimiento. Y, es clave saber estimar con precisión las propiedades físicas y químicas de las sustancias.

Los simuladores de procesos se pueden clasificar principalmente de dos maneras, dependiendo de cómo manejan el tiempo y el alcance de su aplicación.

Primero, están los simuladores que consideran la variación temporal de las propiedades. Aquí, un punto importante a aclarar es la distinción que se suele hacer:

- **Simulador de estado estacionario:** En estos, propiedades del reactivo, producto o mezcla permanecen constantes a lo largo del tiempo. Son ideales para analizar el comportamiento de un proceso en condiciones operativas estables.
- **Simuladores en estado dinámico:** Por el contrario, estos simuladores modelan

cómo las propiedades cambian con el tiempo, lo que los hace indispensables para entender arranques, paradas, transitorios y el comportamiento bajo condiciones inestables o cambiantes.

En segundo lugar, la clasificación se basa en la **especificidad de su uso**:

- **Simulador de uso específico:** Estos están diseñados para operación unitaria particular o rango de operación definido. Ejemplos típicos incluyen herramientas para procesos como MADSED, Reformación o FCC (Fluid Catalytic Cracking), donde la complejidad y particularidades de la operación requieren un enfoque especializado.
- **Simuladores de uso general:** A diferencia de los anteriores, estos simuladores poseen una biblioteca extensa de operaciones unitarias que pueden interconectarse para simular un proceso completo. Son herramientas versátiles que permiten modelar desde flujos simples hasta complejos diagramas de proceso, como es el caso de software reconocido como Aspen, Hysys, Chemcad o PRO/II.

Esta diversidad en la clasificación permite a los ingenieros seleccionar la herramienta más adecuada según la naturaleza del problema a resolver, ya sea que necesiten un análisis detallado en un punto fijo del tiempo, un seguimiento de la evolución del proceso, o la integración de múltiples etapas en una simulación integral.

La **simulación de procesos químicos** se ha vuelto una herramienta esencial para abordar eficazmente los desafíos que surgen en la industria. Nos permite analizar el funcionamiento de plantas químicas ya en operación, así como diseñar nuevas instalaciones o equipos desde cero.

Estas herramientas de simulación se usan muchísimo en un montón de áreas, como el medio ambiente, por los ingenieros que trabajan en las plantas, y también en

industrias como la alimentaria o la de polímeros. Son indispensables cuando se está desarrollando un proyecto, porque nos permiten saber si es viable tanto técnica como económicamente.

Además, resultan invaluable para la toma de decisiones críticas, ya que permiten probar distintas alternativas de procesos y condiciones de operación sin incurrir en los costos y riesgos de pruebas físicas.

Una de las mayores ventajas de simular es que nos da toda la información del proceso que necesitamos para diseñar los equipos al detalle y para construir plantas, ya sean a escala de laboratorio, piloto o incluso a nivel industrial. Una vez construidas y operadas, estas plantas sirven, a su vez, para retroalimentar o validar el modelo de simulación utilizado. De acuerdo con Martínez et al. (2000), la simulación es capaz de resolver tres tipos fundamentales de problemas:

1. Análisis de proceso.
2. Diseño de proceso.
3. Optimización de proceso.

En el contexto actual de un mundo cada vez más globalizado, estas necesidades se han vuelto más complejas y demandantes. La **calidad** en la industria moderna, por ejemplo, es el resultado de la integración de diversas teorías, culminando en conceptos como la Calidad Total o la Calidad Integral.

En el caso específico de Agro Industrial Paramonga S.A., se inició implementando un software de procesos dinámico, lo que representa un paso firme hacia la modernización y mejora continua de sus operaciones.

## 1.2 Formulación del problema

### **1.2.1 Problema general**

¿De qué manera la implementación de un simulador dinámico puede optimizar el diseño, el funcionamiento y la evaluación de los evaporadores de quintuple efecto en la Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- ¿Qué conjuntos de datos resultan esenciales para construir el simulador dinámico, facilitando el diseño y la evaluación de los evaporadores de quintuple efecto en Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.?
- ¿Cuáles son los parámetros operacionales clave que deben incorporarse al simulador dinámico para asegurar su funcionamiento preciso y representativo del proceso real?
- ¿Cuál es la metodología de programación más efectiva para desarrollar el simulador dinámico, permitiendo el diseño y la evaluación exhaustiva de los evaporadores de quintuple efecto en Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.?
- ¿Cómo se ejecutarán las simulaciones dentro del entorno dinámico para generar los datos necesarios que sustenten el diseño y la evaluación de los evaporadores de quintuple efecto en Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo general**

Construir un simulador dinámico para optimizar la creación y la evaluación de los evaporadores de quintuple efecto empleados en industria azucarera, específicamente en la Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Establecer las estructuras de datos fundamentales requeridas para el desarrollo del simulador dinámico, con el fin de soportar el diseño y la evaluación de los evaporadores de quintuple efecto en Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.
- Identificar y recopilar los datos operacionales y técnicos críticos del proceso de evaporación en industria azucarera, esenciales para la parametrización y el funcionamiento preciso del simulador dinámico.
- Diseñar e implementar la programación del simulador dinámico, asegurando su funcionalidad para el diseño y evaluación efectiva de sistemas de evaporadores de múltiple efecto en el contexto de producción azucarera.
- Ejecutar simulaciones detalladas utilizando el software desarrollado, con el propósito de obtener los datos de diseño y evaluación necesarios para optimizar el rendimiento de los evaporadores de múltiple efecto en industria azucarera.

## **1.4 Justificación de la investigación**

### **1.4.1 Justificación Teórica**

Esta investigación se fundamenta en el acceso a información especializada y actualizada, lo que garantiza un rigor teórico robusto. Además, los hallazgos derivados de este estudio ofrecerán un soporte valioso para empresas del mismo sector, sirviendo como un referente aplicable a desafíos operativos similares.

### **1.4.2 Justificación Práctica**

Esta investigación cobra relevancia significativa al ofrecer una solución directa a un problema de calidad de manera específica dentro de la empresa. Su

aplicación e implementación se alinea con los principios de mejora continua, contribuyendo así a la optimización de los procesos operativos.

### **1.4.3 Justificación Legal**

Este estudio se integra plenamente a toda normativa y legislación vigente y pertinentes, asegurando que sus propuestas y resultados estén en consonancia con el marco jurídico actual, a la par que considera los avances tecnológicos relevantes.

### **1.4.4 Justificación Social**

Se propone en este estudio el desarrollo de un modelo programático en una herramienta ampliamente accesible como Microsoft Excel. Esto facilita que un público más amplio, incluyendo profesionales y estudiantes, pueda comprender y aplicar los principios de la simulación.

## **1.5 Delimitaciones del estudio**

### **1.5.1 Delimitación Espacial**

Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión en Huacho, distrito de la provincia de Huaura, en la región de Lima Provincia.

### **1.5.2 Delimitación Temporal**

Mes : Julio

Año : 2024

### **1.5.3 Delimitación Teórica**

La presente investigación se enmarca conceptualmente en los siguientes pilares: el ámbito de la simulación, con un enfoque específico en el diseño y la evaluación de sistemas. Centralmente, se abordará la funcionalidad y el rendimiento de los evaporadores de quintuple efecto, todo ello dentro del contexto particular de la industria azucarera.

## **1.6 Viabilidad del estudio**

### **1.6.1 Viabilidad técnica**

Se sustenta este estudio en la disponibilidad de datos operacionales reales obtenidos de ingenios azucareros, lo que permite un análisis empírico robusto y pertinente.

### **1.6.2 Viabilidad ambiental**

El estudio según su naturaleza, no tiene efecto negativo en el medio ambiente. El trabajo se llevó a cabo enteramente en gabinete, utilizando la información y los datos disponibles, sin requerir intervenciones que pudieran alterar el entorno.

### **1.6.3 Viabilidad financiera**

El investigador cubrió personalmente todos los gastos de este estudio.

### **1.6.4 Viabilidad social**

Se aseguró gracias a personal calificado, como el investigador principal y el asesor, y también con el valioso apoyo de personal no calificado. Todo esto, en conjunto, garantiza que tenemos la capacidad humana necesaria para su desarrollo.

## **Capítulo II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes de la investigación**

##### **2.1.1 Investigaciones internacionales**

En Colombia, **Ordóñez y su equipo (2012)** se dedicaron a buscar cómo mejorar el tiempo en procesamientos además de aprovechar mejor todo recurso al fabricar panela. Para lograrlo, lo que hicieron fue modelar un sistema de evaporación. Se basaron en datos extraídos de sistemas reales de evaporación de tres efectos, siendo su meta el control de concentraciones del azúcar y nivel de líquido en cada etapa. La investigación muestra el control de cantidad del azúcar, así como niveles de líquido resulta ser clave si se hace por etapa. Cuando se logra eso, resulta ser más eficiente el sistema de evaporación de múltiple efecto, tanto por la demora del proceso como por el mejor uso de los recursos. Este resultado destaca que tener un control preciso es vital para producir más y mejor panela.

En Estados Unidos, **Luyben (2018)** realizó un estudio donde investigó cómo simular de forma dinámica los evaporadores de múltiple efecto. Usó Aspen Plus para la simulación en condiciones estables, y luego llevó ese modelo a Aspen Dynamics. El sistema que analizó era una configuración de cuatro efectos para una mezcla de agua y propanodiol. El objetivo principal era encontrar la cantidad ideal

de efectos desde el punto de vista económico, y también temperatura adecuada por etapa. En su modelo dinámico, los elementos más importantes que se tomaron en cuenta fueron los cuatro recipientes evaporadores, donde tanto la altura del líquido como las presiones cambiaban con el tiempo. La conclusión principal de su investigación fue que los modelos de simulación de Aspen son realmente útiles. Sirven tanto para analizar el diseño en condiciones estables como para controlar de forma dinámica los evaporadores de múltiple efecto. Además, se demostró que un controlador de temperatura simple, que tenga en cuenta la presión, puede controlar eficazmente el sistema incluso cuando hay cambios inesperados en el rendimiento o en la composición de lo que se alimenta. Este hallazgo resalta la viabilidad de soluciones de control relativamente simples para sistemas complejos.

Un estudio que hizo **López (2014)** en la Universidad de Córdoba, Argentina, se centró en crear y validar un simulador para un evaporador de un solo efecto. La idea era modelar cómo cambian la temperatura, concentraciones y niveles de líquido cuando se concentran leche y jugo de frutas diluido. La investigación terminó al crearse un modelo matemático fenomenológico. Este modelo se armó usando los balances de materia y energía, y también se le agregaron ecuaciones matemáticas basadas en la experiencia y específicamente para las soluciones que se estaban estudiando. Los resultados mostraron que esta manera de abordar el problema fue perfecta para describir cómo se comportaba en evaporadores de un único efecto. Se resolvieron las ecuaciones diferenciales del modelo mediante la técnica Runge-Kutta en cuarto orden, todo dentro del simulador que se hizo en LabView 2011. Este programa dejó predecir cómo se comportarían aspectos como concentración, temperatura y niveles de líquidos al interior del evaporador con una precisión del 95%. Además, se dieron cuenta que precalentar la solución ayudó a

conseguir los resultados esperados. Es importante señalar que, aunque los datos simulados y los reales se parecían mucho, notaron que la concentración de leche mostró más diferencia que la de las soluciones de azúcar diluidas. El simulador que se desarrolló es una maravilla, porque proporciona datos clave: temperaturas, nivel del líquido, qué tan concentrado está el fluido, cuánto vapor y cuánto líquido concentrado fluye, las propiedades de soluciones entre otros. Y lo mejor es que permite cambiar las variables de entrada y corregir el proceso en el momento mientras corre la simulación. Además, permite guardar todos los datos del proceso. En resumen, es una herramienta súper útil para investigar y mejorar aspectos.

León y Aguinaco (2007), de la Universidad de Carabobo en Valencia, se propusieron para el manejo de sistemas de evaporador-condensador crear el software de simulación. Querían que fuera una herramienta muy versátil que sirviera tanto para las operaciones diarias como para la enseñanza y la investigación. Las conclusiones de su trabajo revelaron varios puntos clave: a) Los flujos máxicos de los evaporadores mostraron ser independientes del caudal del rotámetro. b) El aumento de la presión de operación favorece los flujos máxicos del evaporador hasta cierto límite. c) La fórmula que se creó para predecir demostró ser sumamente precisa, siendo 1.6899% la desviación máxima. d) La temperatura tenía un comportamiento en paredes del condensador que encajaba con la situación en la que actuaba como un fluido caliente. e) Cuando integraron la correlación que propusieron en su segundo objetivo, obtuvieron resultados más cercanos a la realidad, especialmente en condiciones donde las presiones y los niveles de líquido eran altos. f) Sin embargo, las ecuaciones conocidas en nivel y presión de líquido bajo, dieron resultados más exactos que los que se obtuvieron con la nueva correlación. g) En la parte técnica, decidieron que ANSI C era el mejor lenguaje

para programar los cálculos del simulador, y que Visual Basic era ideal para diseñar la interfaz gráfica (lo que el usuario ve y usa). Este estudio destaca la complejidad y las particularidades que deben considerarse al desarrollar modelos de simulación, subrayando la importancia de la validación empírica en diferentes rangos operativos.

### 2.1.2 Investigaciones nacionales

En su tesis de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo en Lambayeque, **Ucuñay (2006)** evaluó en determinado ingenio azucarero de Tután su sistema de evaporación de quintuple efecto. Para esto, creó y programó un modelo matemático en Matlab® v6.1. Este modelo se basó en ecuaciones respecto a balance de materia y energía, las cuales fueron resueltas mediante método numérico. Concluyó que una simulación resulta ser herramienta muy práctica para el diseño, ya que permite evaluar y mejorar rápidamente la forma en que opera el evaporador.

Este hallazgo subraya el valor de los modelos computacionales para la eficiencia en la ingeniería de procesos.

En su tesis de Trujillo, **Gómez (2014)** se dedicó a modelar y simular para jugar clarificado el sistema de evaporación en San Jacinto empresa agroindustrial cuando decidiera moler más caña. Su meta principal fue crear una simulación en computador en sistema de evaporación de quintuple efecto.

El autor creó basándose en balance de energía, masa y transferencia de calor modelos matemáticos. Para solucionar un complicado sistema de ecuaciones que le resultó, usó el software Matlab y aplicó el método de Newton-Raphson. La validez del simulador se confirmó al comparar lo que arrojó con los datos reales que se tomaron en la planta.

Gómez concluyó que el simulador era de fiar y reflejaba bien el sistema de evaporación real, ya que el programa mostraba todas las variables con margen de error menor al 5%. Además, esta herramienta permitió definir cuál era la mejor configuración para el sistema de evaporadores, las condiciones ideales para operar cada efecto (incluyendo sus extracciones de vapor), y mínimo consumo de agua industrial y vapor de escape que necesitaría la fábrica para una molienda con aumento su capacidad a 4 200 toneladas de caña por día (TCD). Este trabajo pone de manifiesto lo útil que es la simulación para planificar y optimizar grandes proyectos industriales.

Un estudio que hizo **Panana (2013)** en Lima específicamente en Universidad Nacional del Callao, se enfocó en el diseño de evaporador con múltiples efectos que se conectan uno tras otro. El objetivo principal de su trabajo fue justamente desarrollar el diseño de estos sistemas.

El investigador encontró que, al usar el primer método para calcular el diseño, las áreas de los evaporadores se desviaban un 4% de la media. Sugirió que, si se tuvieran coeficientes de transmisión de calor más exactos, la solución podría ser más precisa. Sin embargo, notó algo peculiar: por cada kilogramo de vapor que entraba al sistema, se evaporaban 2.06 kg de agua, lo que le hizo pensar que había errores en los datos que se usaron. Atribuyó esta discrepancia a cantidades considerables de calor requerida para lograr calentar el feed para que llegue al punto boiling in la primera acción. Además, mencionó que este método resultaba "muy pesado" para sistemas con tres o más efectos.

Por otro lado, al usar un segundo método, los resultados del diseño de los evaporadores mostraron que las áreas se desviaban, como máximo, 4 metros cuadrados (lo que equivale a un 2%) del área promedio. Esto indicaba que la

distribución de las caídas de temperatura a lo largo de los evaporadores era bastante buena. Se confirmó que, en el primer efecto, a medida que la temperatura de ebullición subía, también era necesario aumentar el volumen de calentamiento de la ropa para el alimento.

Este trabajo destaca la importancia de seleccionar métodos de cálculo adecuados y la sensibilidad de los diseños a la precisión de los datos de entrada, especialmente en sistemas complejos como los evaporadores de múltiple efecto.

**Joaquín y Márquez (2004)**, se dedicaron a investigar los parámetros de operación de los evaporadores en Agroindustrial Laredo S.A.A. Su fin consistió en analizar cómo los cambios en el flujo de jugo clarificado impactan en varias cosas: la concentración del jugo ya evaporado, necesitamos saber, para cada una de las cinco etapas de este proceso, a qué temperatura hierve el líquido y cuánto tiempo pasa allí. También es clave entender cómo se transfiere el calor, el vapor que entra y sale, y qué tan eficiente es el uso de ese vapor, sin olvidar ese particular factor de Dessin. También estudiaron cómo la temperatura del jugo clarificado al entrar al sistema influía en la economía general de los evaporadores.

Las conclusiones de su estudio revelaron varios puntos clave:

- En los evaporadores de Agroindustrial Laredo S.A.A., si se aumenta la cantidad de jugo clarificado que entra, pero la concentración inicial de este jugo se mantiene igual (su Brix no cambia), lo que sucede es que el jugo evaporado sale menos concentrado en cada etapa. La única excepción es el último evaporador, donde la concentración final es siempre la misma que se busca.
- Aumentar el flujo de jugo clarificado que entra ayuda a que los evaporadores funcionen mejor, porque así se forman menos incrustaciones y el jugo pasa menos tiempo dentro del sistema.

- Cuando entra más jugo clarificado y este ya está casi hirviendo, mejora entre el vapor, pared del tubo y jugo la transferencia de calor. Se excluye el primer efecto, donde se consume menos vapor de escape.
- Esta estrategia de aumentar tanto el flujo como la temperatura de entrada del jugo claro genera un ahorro significativo de vapor de escape, como lo evidencian los datos presentados en su tabla 5.1.
- El simulador que crearon los autores da una montaña de información: temperaturas, nivel del líquido, qué tan concentrado está el fluido, cuánto vapor y líquido concentrado fluye, las propiedades de las soluciones, cuánto sube tanto el coeficiente de transferencia de calor como el punto de ebullición. Además, esta herramienta te permite cambiar los datos de entrada y corregir el proceso en el momento mientras corre, y también puedes guardar toda la información del proceso.

### 2.1.3 Otras investigaciones

Un estudio hecho por **Morales y otros (2009)**, publicado en la revista Ion por la Universidad Industrial de Santander y Cenicaña en Colombia, Una persona se puso manos a la obra para desarrollar una forma de entender cómo funciona la fase inicial al producir en un ingenio el azúcar de caña en Colombia: la preparación y molienda, específicamente cuando todo está funcionando de manera estable.

Los autores concluyeron que la simulación obtenida para esta fase inicial de proceso de producción azucarera ofrece representación fiel de proceso. Esto no solo facilita un mayor entendimiento de las diversas variables involucradas y de los flujos de materias primas y desechos, sino que también permite realizar examine el proceso actual y planea futuros proyectos que favorezcan la eficacia total de

producción. Actualmente, el equipo de investigación se encuentra desarrollando las etapas subsiguientes del proceso productivo. Se espera que estos avances profundicen aún más el conocimiento y la comprensión de estos procesos, abriendo la puerta a la proposición de nuevas configuraciones y mejoras que impulsen una mayor eficiencia general en la industria azucarera.

**Suárez y Díaz (2011)**, de la Universidad de Oriente en Cuba, hicieron un estudio para crear un modelo matemático para equipos del área calentadores en una fábrica de azúcar, específicamente para la producción de azúcar crudo. Los autores encontraron que el modelo matemático que usaron para el proceso era bastante bueno. Notaron que cuando el coeficiente de obstrucción era más alto, había más contraste entre el cálculo por diseño en área de transferencia frente a la calculada por esos índices. Pero, a pesar de esa diferencia, esto significaba que podían operar por más tiempo sin tener que limpiar los intercambiadores de calor. Al final, el programa que se creó no solo ayuda a calcular el tamaño y la capacidad de la maquinaria, sino que también permite ver cómo las diferentes condiciones del proceso afectan el rendimiento y los resultados de esos equipos. Así, esta herramienta se vuelve un recurso muy valioso para optimizar cómo se trabaja en la industria azucarera.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Objeto de la evaporación**

Después de las etapas iniciales de purificación, obtenemos un jugo claro que, esencialmente, es una solución de azúcar en agua con una cantidad mínima de impurezas remanentes. Una vez que se han eliminado la mayor parte de estas

impurezas, el siguiente paso crucial en el proceso es la eliminación del agua. Según Hugot (1984, p. 345) esta tarea se logra eficientemente mediante evaporación.

## **2.2.2 Evaporador múltiple efecto**

### **2.2.2.1 Tipo de evaporador**

Un evaporador según Chen (1997) de múltiple efecto tipo calandria, como lo describió Webre, generalmente está formado por entre tres y cinco cuerpos de evaporación conectados en fila. Cada uno de estos cuerpos, o "efectos", es un cilindro vertical con una base poco profunda y abombada que coincide con el diámetro del cilindro. Justo encima de esta base, hay una sección de calandria que también tiene el mismo diámetro.

La calandria típica mide entre 1.2 y 1.8 metros de altura entre las placas que sostienen los tubos. Una característica clave es que tiene un gran conducto central rodeado de muchísimos tubos, que generalmente tienen un diámetro de entre 3.18 y 5.72 centímetros. Imagínate estos tubos, que generalmente son de cobre o acero inoxidable, con un grosor que va desde el calibre 16 hasta el 18.

Es crucial mencionar que entre cobre y acero inoxidable la transferencia de calor neta efectiva es muy parecida; el acero inoxidable es solo un 0.3% menos eficiente que el cobre. Pero el acero inoxidable es una maravilla: ayuda un montón a evitar que se formen esas molestas incrustaciones en el calentador de jugos y evaporador. No porque sea liso, sino porque es súper resistente a la erosión y al daño. Eso significa que las incrustaciones casi no empiezan a formarse, y si aparecen, esos puntos donde se pegan son mucho más fáciles de limpiar y quitar.

A unos tres metros (o diez pies) sobre la calandria, el evaporador tiene un área para el vapor que mide lo mismo de ancho que el cuerpo principal. Esta sección actúa

como un separador primario de arrastres, donde la gravedad ralentiza las gotas de líquido arrastradas, permitiendo que solo los vapores asciendan hacia el domo del equipo.

El domo del evaporador de calandria generalmente tiene un diámetro que es la mitad o incluso menos que el del cuerpo principal, y suele contener un separador o captador de arrastres más sofisticado. Además, el domo está provisto de un drenaje para el separador y una salida para el vapor del jugo, el cual se dirige como efecto siguiente hacia la cámara de vapor, si es el caso del último efecto, a un condensador barométrico. Es común que tanto el vapor como el líquido fluyan en paralelo, es decir, ambos ingresan a un efecto primario además salen de un efecto final.

También evaporadores de calandria tienen conducto de bajadas sellados (que a veces llamamos tubo central). Estos llevan el líquido directamente desde la parte central de la calandria hasta la salida, sin que recircule. Se ha visto que estas modificaciones pueden lograr aumentos importantes en la evaporación, entre un 25% y un 50%.

#### **2.2.2.2 Funcionamiento de los evaporadores**

Según Hugot (1984), un experto en azúcar, el mayor hito en la producción azucarera fue, sin duda, el hallazgo del efecto múltiple. Este invento se le atribuye a Nobert Rillieux, un ingenioso estadounidense de origen francés, quien lo descubrió allá por 1830 en Luisiana.

Rillieux resolvió un desafío crucial al introducir el vacío en los cuerpos subsiguientes al primero. Cuando se reduce la presión, el agua o el jugo hierve a temperaturas mucho más bajas: por ejemplo, hierve a 90 °C con un vacío de 23 cm, de 40 cm fue de 80°C de vacío, y 70°C con vacío de 52 cm. Esta bajada en la

temperatura de ebullición permite reutilizar el vapor que genera el jugo en la primera etapa para calentar el jugo en la segunda, y así sucesivamente en las etapas siguientes.

Aunque para esto se necesitan las instalaciones adecuadas para crear y mantener el vacío, hervir al vacío tiene **dos beneficios clave**:

Esto logra un par de cosas muy buenas. Primero, la brecha de temperatura entre el vapor y el jugo aumenta, que es justo la diferencia en el punto de ebullición del jugo entre el inicio y el final del proceso. Y lo segundo, pero no menos importante, es que permite que la evaporación ocurra a temperaturas más suaves, así cuidamos el jugo para que no se maltrate tanto. Esto es súper importante cuando el jugo ya está más concentrado y espeso, porque disminuye la posibilidad de que la sacarosa se invierta y de que el jugo tome un color que no queremos.

El ingenio de Rillieux revolucionó la eficiencia energética en la industria azucarera, sentando las bases para los sistemas de evaporación modernos.

### **2.2.2.3 Elevación de punto de ebullición**

Según Hugot (1984), un referente en manuales para ingenieros azucareros, existen causas específicas que provocan un incremento en el punto de ebullición (EPE) de las soluciones azucaradas.

Es sabido que en solución el punto de ebullición generalmente es más alto al del solvente puro. En contexto de las soluciones azucaradas, este fenómeno se acentúa por varios factores inherentes a la naturaleza de los azúcares y su interacción con el agua. Entre las principales causas que Hugot destaca se encuentran:

**Presión.** La temperatura a la cual el agua hierve está directamente ligada a la presión a la que se encuentra. Esta relación fundamental la encontramos detallada en las tablas de vapor saturado, que nos dicen a qué temperatura hierve el agua según la presión (p. 340). En pocas palabras, cuanto menos presión hay, más baja es la temperatura que el agua necesita para hervir, y al revés. Entender esta conexión es clave para manejar y comprender procesos térmicos como la evaporación.

**Brix:** Es crucial entender que en los evaporadores de múltiple efecto que se usan para hacer azúcar, lo que en verdad hierve no es agua sola, sino el jugo de caña. Hierve una solución azucarada o jugo a temperatura y presión dada, la cual sube a medida que se va concentrando (aumenta su Brix).

Por ejemplo, a la presión normal del ambiente, un jugo mezclado hierve alrededor de los 100.3 °C, no a los 100 °C del agua pura. Para saber exactamente cuánto sube ese punto de ebullición, hay tablas que nos dan esos valores para solución de azúcar pura (por datos de Claassen) además para jugo de caña específicos (Thieme). Esta información es vital para diseñar y operar de forma eficiente estos sistemas.

**Influencia combinada del brix y de presión:** El elevar el punto de ebullición (EPE) en solución azucarada, tal como se presenta en la Tabla 1, suele calcularse bajo presión atmosférica. Es importante señalar que, si bien la EPE varía con la presión, esta fluctuación se mantiene dentro de límites muy estrechos.

Para determinar la EPE de una solución con un Brix y pureza específicos bajo cualquier presión, se puede recurrir al denominado ábaco dado pro Othmer y Silvis (referenciado en julio de 1948 por F.A.S., p. 29 y reproducido en la fig. 219).

Aunque su uso puede arrojar resultados ligeramente diferentes a los de la tabla 1 para la presión atmosférica, esta pequeña variación es aceptable, ya que no se requiere una precisión superior para la mayoría de aplicaciones prácticas.

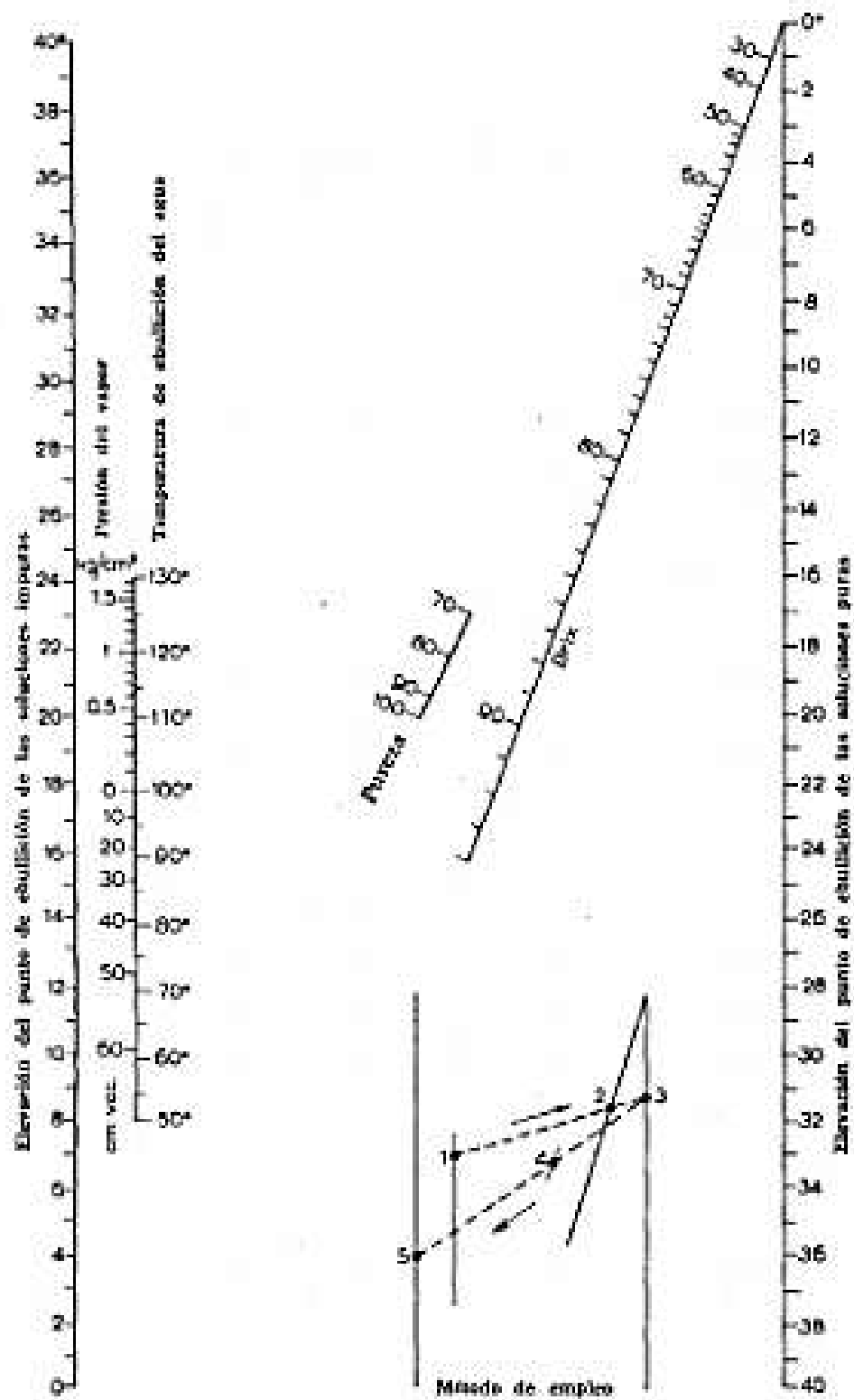
### **Tabla 1**

Elevación de punto de ebullición en solución azucarada y jugo de caña a 760 mmHg.

Brix	Pureza						
	100	90	80	70	60	50	40
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
15	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4
20	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6
25	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
30	0.6	0.7	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2
35	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4	1.6
40	1.0	1.1	1-3	1.5	1.7	1.9	2.1
45	1.4	1.5	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7
50	1.8	1.9	2.2	2.5	2.8	3.1	3.4
55	2.3	2.5	2.8	3.1	3.5	3.9	4.3
60	3.0	3.2	3.6	4.0	4.4	4.9	5.4
65	3.8	4.1	4.5	4.9	5.5	6.0	6.5
70	5.1	5.5	6.0	6.5	7.1	7.7	8.3
75	7.0	7.5	8.0	8.6	9.4	10.1	10.8
80	9.4	10.0	10.5	11.3	12.3	13.1	14.1
85	13.0	13.7	14.4	15.3	16.4	17.4	19.1
90	19.6	20.5	21.2	22.4	23.7	25.3	
94	30.5						

Fuente: (Hugot, 1984, pág. 341)

**Figura 1**



Fuente. Hugot (1984, p. 342)

#### 2.2.2.4 Vapor sobrecalentado

La transferencia de calor de vapor saturado a una pared es increíblemente eficiente. En cambio, el vapor sobrecalentado no es bueno para transferir calor. Según Cassen (ISJ, 1939, p. 219), este vapor puede transferir calor tan poco como el 0.80% de lo que lo hace el vapor saturado, lo que significa que su capacidad para calentar es unas cien veces menor.

No obstante, Hugot (1984, p. 339) señala que un sobrecalentamiento ligero no representa un inconveniente significativo. Esto sugiere que, si bien el vapor sobrecalentado extremo es ineficiente para la transferencia de calor, pequeñas desviaciones del punto de saturación pueden no impactar drásticamente el rendimiento del sistema.

#### **2.2.2.5 Presión hidrostática**

Hugot (1984), explica cómo la presión hidrostática afecta la temperatura de ebullición de un líquido dentro de un sistema. Cuando se aplica una presión superficial ( $P$ ) a un líquido, las moléculas a cierta profundidad experimentan una presión total equivalente a  $P$  más el peso de la columna de líquido que tienen encima (p. 341).

Dado que la temperatura de ebullición aumenta con la presión, esta capa más profunda del líquido hervirá a una temperatura más elevada. Por ejemplo, en un evaporador, si el nivel del jugo alcanza un tercio de la altura de los tubos, la capa de jugo en el fondo de la calandria estará sometida a presión de vapor en calandria, sumada a presión hidrostática generada por el propio jugo. En consecuencia, esta capa hervirá a temperatura mayor al del jugo en superficie (p. 341). Este fenómeno es crucial para entender el rendimiento térmico y el diseño de los evaporadores

#### **2.2.2.6 Característica del vapor**

Hugot (1984), en proporciona un método práctico para calcular las cantidades de calor involucradas en la evaporación. Para las temperaturas comunes en estos procesos, el calor sensible ( $q$ ) y calor latente de vaporización ( $r$ ) puede estimarse con precisión suficiente utilizando fórmulas de Regnault:

- **Calor sensible ( $q$ ):** Representa la energía necesaria para elevar temperatura de 1 kilogramo de agua en  $0^{\circ}\text{C}$  a una temperatura  $t$  en kilocalorías. La fórmula es  $q=t$ .
- **Calor latente de vaporización ( $r$ ):** Corresponde a las kilocalorías requeridas que transforme 1 kilogramo de agua a temperatura  $t$  en vapor a la misma temperatura. La fórmula es  $r=607-0.7t$ .
- **Calor total ( $\lambda$ ):** Se trata del total de energía necesaria para convertir 1 kilogramo de agua, que empieza a  $0^{\circ}\text{C}$ , en vapor a una temperatura específica ( $t$ ), y se mide en kilocalorías. Esta energía se calcula sumando el calor sensible y el latente, de la siguiente manera:  $\lambda=q+r=607-0.3t$ .

Es fundamental recordar que estas tres fórmulas toman como punto de referencia una temperatura inicial de  $0^{\circ}\text{C}$ .

Aunque el calor específico del agua sí que sube un poquito con la temperatura (por ejemplo, a  $100^{\circ}\text{C}$  ya no es 1, sino 1.053), Hugot aconseja que no hace falta complicar las fórmulas por eso. La verdad es que la precisión que se consigue es más que suficiente para lo que se necesita en la ingeniería azucarera.

#### **2.2.2.7 Límites entre evaporación y cocimiento**

Según Hugot (1984), comienza el jugo de caña a cristalizar cuando alcanza entre 78 y 80 grados Brix (que es lo mismo que 41-42 grados Baumé). Aunque en teoría podríamos

evaporar hasta los 72 o 75 grados Brix, en la práctica, los que manejan los tachos de cristalización (los tacheros) necesitan una meladura que sea capaz de disolver cristales. Esta capacidad es fundamental, sobre todo si al principio de la cocción aparecen "falsos granos", algo esencial para que la cristalización salga bien.

Por esta razón, la concentración de la meladura nunca excede los 70°Brix. La operación de evaporación se planifica y ajusta así mantiene Brix de meladura dentro de rangos específicos, dependiendo del tipo de azúcar a producir:

- Para la fabricación de azúcar crudo: la concentración ideal oscila entre 60 y 70°Brix (entre 32 y 37°Bé).
- Para azúcar blanco: el rango preferido es de 50 a 60 °Brix (27 a 32 °Bé).

Esta precisión en el control de la concentración es vital para asegurar la calidad y eficiencia en las etapas posteriores de la producción de azúcar.

### 2.3 Definición conceptuales

**Sistema:** Grupo de piezas que están conectadas y organizadas, trabajando juntas para lograr una meta en común.

**Simulación:** Es una técnica numérica que permite hacer experimentos en la computadora. Para eso, usamos fórmulas y reglas lógicas que describen cómo están hechas y cómo se comportan cosas complejas del mundo real a lo largo de mucho tiempo. En resumen, es una manera de entender cómo funcionan las cosas y qué pasaría en distintas situaciones, sin necesidad de tocar el sistema físico real.

**Atributo:** Es una característica o cualidad que describe una propiedad inherente a un objeto, elemento o archivo. Además de definir esta propiedad, un atributo también puede establecer el valor particular que dicha propiedad adquiere en una instancia específica.

**Modelo:** Esencialmente es representar algo ya sea objeto, un sistema o incluso una idea, presentada de distinta forma a la de la entidad original. Su función principal es clarificar, entender o perfeccionar el sistema que representa. Así, un modelo puede ser una réplica fiel de su referente o, alternativamente, una abstracción que destaca únicamente sus características más relevantes.

**Entidad:** en sentido más amplio, se refiere a aquello cuya existencia puede ser percibida por algún sistema con capacidad de observación, ya sea a través de la lógica o la semántica. Esto significa que una entidad no se limita únicamente a objetos tangibles como sillas o personas, sino que puede ser tanto concreta como abstracta, particular o universal. Por lo tanto, el concepto de entidad abarca una vasta gama de elementos, incluyendo propiedades, relaciones, eventos, números, conjunto, proposiciones, creencias y pensamientos, entre otros. Concepto fundamental para categorizar y comprender la diversidad de elementos que conforman nuestra realidad y nuestro pensamiento.

**Sistema Experto:** Rama clave de la Inteligencia Artificial, son programas informáticos diseñados para emular las capacidades cognitivas de un experto humano. Estos sistemas replican procesos entre ellos memorización, aprendizaje, razonamiento, comunicación y toma de decisión consecuente, todo aplicado a un campo específico del conocimiento. Son, en esencia, una forma de encapsular y replicar la pericia humana en el ámbito digital.

**Inteligencia Artificial:** Capacidad de inteligencia manifestada por sistemas o artefactos diseñados por humanos. Aunque a menudo se asocia hipotéticamente con las computadoras, el término también designa el campo de investigación científica dedicado a desarrollar y perfeccionar este tipo de sistemas. En esencia, es la

disciplina que busca replicar y acercarse a la inteligencia humana a través de creaciones artificiales.

**Robótica:** Rama de la tecnología dedicada a diseñar, construir, operar, estructurar, fabricar y usar robots. Para hacer todo eso, junta conocimientos de muchas áreas: mecánica, electrónica, informática, inteligencia artificial, ingeniería de control y física. También en otros campos como el álgebra, autómatas programables, animatrónica y máquinas de estados.

**Dinámica de Sistema:** Forma particular de construir modelos de sistemas sociales en computadora. Nació a finales de los años 50 y se afianzó en los 60, gracias a J. W. Forrester en el MIT. Su gran aporte fue aplicar por primera vez métodos de la ingeniería automática para estudiar procesos sociales y económicos.

**Visión Artificial:** Conocida además como visión por computadora o visión técnica, es un campo de la inteligencia artificial que esencialmente busca, darle a computadoras la habilidad de "comprender" lo que ven o de interpretar las características de una imagen. Esto incluye tareas como detectar, segmentar, localizar y reconocer objetos específicos dentro de una imagen, por ejemplo, identificar rostros humanos.

**Redes Neuronales:** Sistemas conceptualizados como modelos abstractos de las estructuras neurobiológicas presentes en la naturaleza, como los cerebros. Estos sistemas se caracterizan por su capacidad de almacenar información de manera flexible y a menudo desordenada. Su forma de operar difiere fundamentalmente de la de las computadoras convencionales. A diferencia de los procesadores de las computadoras, las neuronas del cerebro funcionan en paralelo y exhiben una mayor variabilidad o "ruido". No se limitan a ejecutar un programa predefinido sobre un

conjunto de datos específicos; en cambio, transmiten señales a través de conexiones que denominamos sinapsis.

**Lógica Difusa:** Metodología que ofrece una solución sencilla y elegante para derivar conclusiones a partir de información que, de otra forma, sería considerada vaga, ambigua, imprecisa, ruidosa o incompleta. En esencia, esta lógica busca emular cómo una persona toma decisiones cuando se enfrenta a datos con estas características. Una de sus grandes fortalezas radica en su versatilidad, ya que los sistemas basados en lógica difusa pueden implementarse tanto en hardware como en software, o mediante una combinación de ambos.

## **2.4 Formulación de hipótesis**

### **2.4.1 Hipótesis general**

Implementar un software de simulación dinámica en el proceso de fabricación de azúcar influye mucho en cómo se optimiza y controla la superficie de calentamiento en la zona de evaporación de un Quintuple Efecto.

### **2.4.2 Hipótesis específica**

- Crear tablas de dato bien organizadas dentro del simulador dinámico afecta directamente la precisión y la eficiencia de cómo se diseñan y evalúan los evaporadores de quintuple efecto en la Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.
- La implementación de un software de simulación dinámica tiene un impacto sustancial en la optimización y el control del consumo de vapor en área de evaporación de un quintuple efecto dentro de Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.

- El desarrollo de un simulador dinámico es fundamental para la identificación eficaz de los datos operacionales y técnicos críticos, lo cual es esencial para diseño y evaluación de evaporadores de múltiple efecto en industria azucarera.
- La aplicación de un software de simulación dinámica genera una reducción significativa en los costos operativos relacionados con el consumo de vapor en la Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.

## **Capítulo III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Diseño metodológico**

Un desarrollo metodológico crea, especifica y organiza lo que utilizamos en un trabajo. Piensa en ello como el conjunto de métodos, técnicas y pasos a seguir en un proceso para generar conocimiento sobre un tema específico (Coelho, 2019, p. 35).

##### **3.1.1 Tipo de investigación**

Antes de formular un plan de investigación, es fundamental definir al tipo de investigación a utilizar, porque esto depende directamente del objetivo planteado. Esta determinación inicial es clave para establecer con claridad lo que se pretende lograr y el tipo de información que será necesario recopilar. Como señala Carrasco S. (2017, p. 43), el plan de investigación es el orden estructurado de operaciones y fases interconectadas, por tanto, una definición precisa desde el inicio asegura la coherencia y efectividad del proceso. En este caso particular, la naturaleza del estudio lo categoriza como investigación aplicada.

##### **3.1.2 Nivel**

Es descriptiva siendo un método más efectivo para recopilar información que nos muestra relaciones y describe tal cual es el mundo. Generalmente, el tipo de estudio es antes del experimento, así saber con precisión los elementos a incluir y manipular en él.

##### **3.1.3 Diseño**

Se desarrolla este estudio en un diseño no experimental, de corte transversal y

naturaleza descriptiva.

### **3.1.4 Enfoque**

La metodología adoptada en este proyecto de investigación combina dos enfoques distintos. La fase dedicada al desarrollo del simulador se aborda desde una perspectiva cualitativa, centrándose en la concepción y construcción de la herramienta. Por otro lado, cuando el estudio se orienta a un diseño y evaluación de evaporador de múltiples efectos, es de aproximación cuantitativa, priorizando el análisis de datos numéricos y métricas de rendimiento.

## **3.2 Población y muestra**

### **3.2.1 Población**

Abarca una totalidad de elementos, o unidades, que se encuentran dentro del área geográfica o contextual donde se lleva a cabo el estudio, como lo establece Carrasco (2008, p. 236). En el presente caso, nuestra población de interés constituye el evaporador de múltiples efectos que operan dentro de la industria azucarera.

### **3.2.2 Muestra**

Porción seleccionada a partir de una población total que se investiga. Se elige estratégicamente para obtener información que permita comprender las características del conjunto completo. Por motivos de practicidad, a menudo se opta por un subconjunto manejable —como un grupo de estudiantes de nuevo ingreso o del último semestre para entrevistas o encuestas— que se convierte en la muestra sobre la cual se realizará el estudio.

### 3.3 Operacionalización de variable e indicadores

**Tabla 2**

Operacionalización de variable

<b>Variable</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicador</b>	<b>Escala</b>
	Tablas de Base de dato	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Vapor saturado Presión</li> <li>. Vapor saturado temperatura</li> <li>. Densidad del jugo respecto a Brix</li> </ul>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>. Vapor vivo de calefacción</li> <li>. Corriente de jugo y jarabe</li> <li>. Vapor vegetal producido en cada evaporador</li> </ul>	
Variable independiente	Datos operacionales	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Tomas o sangría de vapor de cada evaporador</li> <li>. Condensado producido en cada evaporador</li> <li>. Recuperación de reevaporizado a evaporadores</li> <li>. Perdida de energía en evaporadores</li> </ul>	Nominal
Desarrollo de un simulador dinámico		<ul style="list-style-type: none"> <li>. Desarrollo de entorno del simulador</li> <li>. Formulación de ecuaciones</li> <li>. Codificación del simulador</li> </ul>	

<b>Variable</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Escala</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>. Velocidades del vapor en el cuerpo</li> <li>. Volumen de jugo en evaporadores</li> <li>. Tiempo de retención en evaporadores</li> <li>. Área de calefacción de evaporador</li> <li>. Flux de evaporación en evaporador</li> <li>. Coeficiente global de transferencia de calor en evaporador</li> <li>. Porcentaje de área de calefacción utilizada</li> <li>. Porcentaje de agua evaporada en evaporadores</li> <li>. Variación de la presión en evaporadores</li> <li>. Ratio agua evaporada/vapor consumido</li> <li>. Ratio agua/vapor a condensar en condensadores</li> </ul>	
Variable dependiente			
Diseño y evaluación de evaporadores de múltiple efecto.	Datos de diseño y evaluación de evaporadores de múltiple efecto		Razón

Fuente: Elaboración propia

### **3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de dato**

#### **3.4.1 Técnica a emplear**

**Documental:** Sustentada en recopilar información meticulosa y antecedentes. Esto se logra a través del análisis de una amplia gama de documentos gráficos, provenientes de diversas fuentes y autores. Mediante este proceso, el investigador construye y enriquece los fundamentos de su estudio.

**Observación:** Se basa en observar directamente personas, fenómenos, situaciones, o cualquier otra cosa que podamos ver, con el objetivo de recoger la información necesaria para un estudio.

La observación implica el empleo sistemático de nuestros sentidos para aprehender la realidad que deseamos estudiar. Es el medio a través del cual captamos el entorno y, posteriormente, lo organizamos intelectualmente, como bien lo expresa Sabino (1992, p. 111).

Desde la perspectiva del investigador, la observación trasciende la mera acción de mirar; se convierte en una experiencia deliberada y un proceso de examen minucioso. En su sentido más amplio, abarca incluso la experimentación: la manipulación controlada de ciertas condiciones o conductas para facilitar la recopilación de datos observando.

#### **3.4.2 Descripción del instrumento**

Se utilizaron diversos instrumentos organizados según la técnica de recopilación de información:

##### **Instrumentos para Técnicas Documentales**

En la fase documental, nos apoyamos en una variedad de fuentes escritas y visuales:

- **Fuentes bibliográficas:** Incluyeron catálogos de equipos, especificaciones

técnicas de productos, enciclopedias, diccionarios, guías, libros de texto, manuales, marchas analíticas estandarizadas, normas técnicas, revistas especializadas, tesis y tratados.

- **Fuentes iconográficas:** Se consultaron diapositivas y videos para obtener información visual relevante.
- **Fuentes magnéticas:** Se hizo uso de equipos de cómputo y CD-ROM para acceder y procesar la información digital.

### **Instrumentos para Técnicas de Campo**

Para la recolección de datos en el entorno real, se emplearon los siguientes instrumentos:

- **Observación:** Como método principal para captar directamente los fenómenos.
- **Lista de cotejo:** Registra presencia o ausencia respecto a características o eventos específicos durante la observación.
- **Ficha de observación:** Un formato estructurado para documentar detalladamente los hallazgos de las observaciones.

### **3.5 Técnicas para procesamiento de información**

Para la solución a problemas de ingeniería y programación, los profesionales se apoyan en diversas herramientas. Entre las más útiles se encuentran el diseño descendente, la abstracción procedimental y la abstracción de datos, tal como lo destaca Joyanes (2003, p. 731).

En nuestro caso, se utilizó Microsoft Excel. Este proceso se desglosó en varias etapas clave:

- **Clasificación:** Organizamos los datos con mucho cuidado, siguiéndolos por donde iba cada flujo dentro de los evaporadores de múltiple efecto. Así, pudimos agrupar

toda la información de forma lógica y que tuviera sentido.

- **Registro:** Toda la información recopilada se registró sistemáticamente en **fichas de datos**, facilitando su posterior categorización y análisis.
- **Tratamiento:** Para crear las ecuaciones que necesitábamos, aplicamos los principios básicos del balance de materia y energía. Luego, estas ecuaciones las convertimos a código y las usamos en Excel.
- **Presentación:** Finalmente, fue diseñado y desarrollada la **interfaz de simulador** dentro del entorno de Microsoft Excel, creando un espacio interactivo para la visualización y manipulación de los resultados.

## Capítulo IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Resultados Simulación en estado estacionario

La Tabla 3 nos muestra los resultados del sistema operando en estado estable. Ahí, los valores que se metieron al sistema están en negrita para que se vean bien. En esa misma tabla, también se incluyen los cálculos del vapor que necesita el sistema de evaporación ( $WV_0$ ), qué tan eficiente es el sistema ( $Ef$ ), además de economía del vapor ( $EC$ ).

Es importante señalar que  $EC$  en sistemas de múltiple efecto se define como la relación entre cantidad total de agua evaporada en el sistema y el consumo de vapor fresco alimentado. Este indicador es fundamental para evaluar la eficiencia energética del proceso.

**Tabla 3**

Solución en estado estacionario de sistema de evaporación quintuple efecto.

	Efecto, i				
	I	II	III	IV	V
Flujo de jugo que entra, $W_{L(i-1)}$ (kg/s)	<b>75.40</b>	55.87	36.91	21.70	16.38
Flujo de jugo que sale, $W_{Li}$ (kg/s)	55.87	36.91	21.70	16.38	13.71
Flujo de vapor que entra, $W_{V(i-1)}$ (kg/s)	20.57	19.54	18.96	15.21	5.32
Flujo de vapor que sale, $W_{Vi}$ (kg/s)	19.54	18.96	15.21	5.32	2.68
Concentración jugo que entra, $X_{(i-1)}$ (kg/kg)	<b>12.45</b>	17.01	25.65	43.58	57.35
Concentración de jugo que sale, $X_i$ (kg/kg)	17.01	25.65	43.58	57.35	<b>68.51</b>
Temperatura de vapor que entra, $T_{V(i-1)}$ (°C)	<b>126.1</b>	120.5	114.7	107.6	90.9
Temperatura de vapor que sale, $T_{Vi}$ (°C)	120.5	114.7	107.6	90.9	<b>60</b>
Elevación de punto de ebullición, $EPE_i$ (°C)	0.34	0.61	1.45	2.77	4.24
Temperatura de jugo entrante, $T_{L(i-1)}$ (°C)	<b>116</b>	120.9	115.3	109.1	93.7
Temperatura de jugo que sale, $T_{Li}$ (°C)	120.9	115.3	109.1	93.7	64.2
Presión del vapor, $P_i$ (kPa)	201.9	167.2	132.2	72.6	19.9
Entalpia de solución, $h_{Li}$ (kJ/kg)	464.4	422.2	359.4	280.9	176.7
Entalpia de vapor, $h_{vi}$ (kJ/kg)	2707	2699	2688	2662	2610
Consumo de vapor de escape, $W_{vo}$ (kJ/s)	20.57	-	-	-	-
Evaporación Total, $W_t$ (kg/s)	61.69				
Economía de vapor, $E_c$ (kg $H_2O_{evapo}/kg_{vapCons}$ )	2.99				
Eficiencia de evaporación de sistema, $E_F$ (%)	95.67				

Nota. Elaboración propia

#### 4.1.1 Validación de modelo

Asegurando que el programa de simulación era preciso, comparamos directamente los datos reales que sacamos del sistema de evaporación con lo que el software nos arrojaba para concentración de jugo ( $X_i$ ) además para temperatura ( $T_{Li}$ ).

Se validó información, mediante error relativo porcentual. Se calculó comparando valor promedio obtenido en la práctica en la industria azucarera con el que dio el programa de simulación. Esto conforme la ecuación:

$$\text{Error Relativo Porcentual} = \frac{|\text{Valor Experimental} - \text{Valor Simulado}|}{\text{Valor Experimental}} \times 100\%$$

Este método permitió cuantificar la fiabilidad de las predicciones del simulador frente a las condiciones reales de operación.

$$\% \text{Error} = \left( \frac{V_o - V_s}{V_s} \right)$$

Donde:

$V_o$ : Valor de operación a comparar

$V_s$ : Valor Obtenido por simulador

Al analizar tabla 4, observamos discrepancia mayor localizada en la variable de temperatura del efecto 3. Al comparar estos hallazgos con estudios nacionales previos, como el de Gómez (2014) sobre sistemas evaporadores de naturaleza similar, se encontró que este autor reportó errores porcentuales consistentemente por debajo del 5%.

A pesar de ese detalle, la evaluación general de nuestros resultados muestra que el simulador es confiable y está en sintonía con el sistema de evaporación que

estudiamos, pues en la mayoría de los casos, el error relativo porcentual se mantuvo debajo del 4%. Esto sugiere que, a pesar de una mayor desviación puntual, la herramienta ofrece una representación fidedigna del comportamiento del proceso.

**Tabla 4**

Validación de programa de simulación.

Efecto	Variable Experimentalmente medida (Vo)				Variable reportada por programa (Vs)				Error relativo (%) ± error			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
X <sub>i</sub> , Brix	16.81	25.44	43.28	57.34	17.01	25.65	43.58	57.35	1.18	0.82	0.69	0.02
T <sub>Li</sub> , °C	120.3	113.2	104.7	93.1	120.9	115.3	109.1	93.7	0.50	1.82	4.03	0.64

Nota: Elaboración propia

#### 4.2 Resultado de simulación dinámica

Para entender cómo responde nuestro sistema de evaporación cuando las cosas cambian, hicimos pruebas aplicando cuatro tipos de "sacudidas" específicas:

- Cambiamos la velocidad a la que entraba la alimentación.
- Variamos la concentración de lo que alimentábamos.
- Modificamos temperatura de vapor de escape.
- Alteramos temperatura de la alimentación.

Cada "sacudida" se aplicó de forma gradual, como un cambio escalonado del 10%.

Las variables que vigilamos en el sistema fueron la temperatura de vapor, así como concentración de salida en cada efecto. Las respuestas a estos cambios, específicamente para el primer efecto (I) y el último efecto (V), están mostradas en las Figuras 17 a 32. Estos gráficos nos permiten ver cómo evolucionan las variables con el tiempo, y cómo el sistema se va ajustando hasta alcanzar las nuevas condiciones de operación estable.

#### 4.2.1 Efecto al variar velocidad del flujo de alimentación

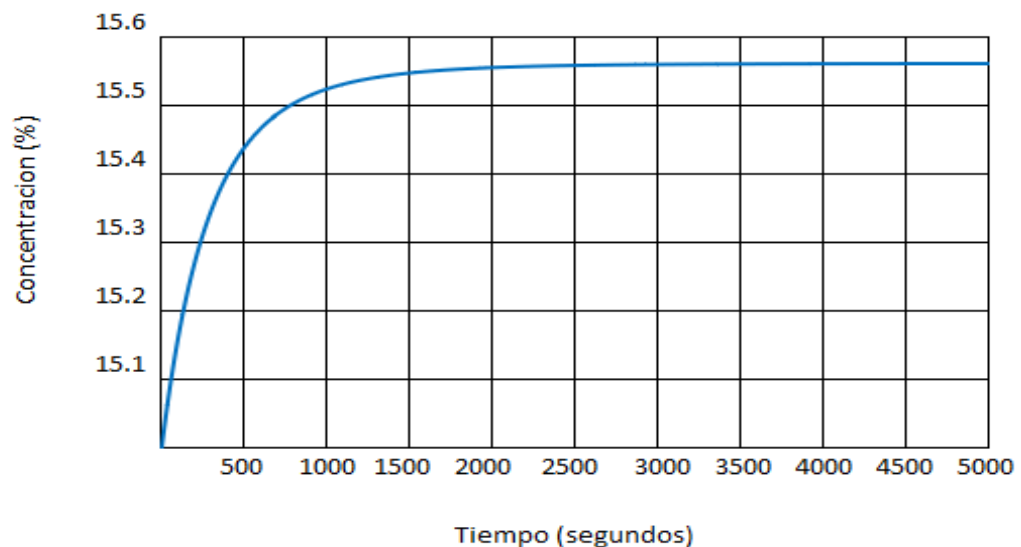
Las Figuras 2 a 20 nos muestran cómo responden la temperatura del vapor ( $T_i$ ) y concentración ( $X_i$ ), tanto al principio como al final de los evaporadores, si en velocidad de flujo de alimentación cambia a diez por ciento.

Al analizar estas gráficas, se hace evidente que la temperatura responde mucho más rápido a los cambios que la concentración. Además, el primer efecto alcanza un nuevo estado estable con mayor celeridad en comparación con el quinto efecto. Esto tiene una explicación lógica: como alimentación fresca entra directamente en un primer efecto, intensidad del cambio se va atenuando poco a poco en los siguientes efectos. En Kumar et al. (2014) estos patrones de comportamiento son consistentes.

Variación en concentración de producto en primer efecto ( $X_1$ ) con 10% de aumento en flujo másico de alimentación.

**Figura 2**

Respuesta de la concentración de I efecto perturbando caudal de alimentación.

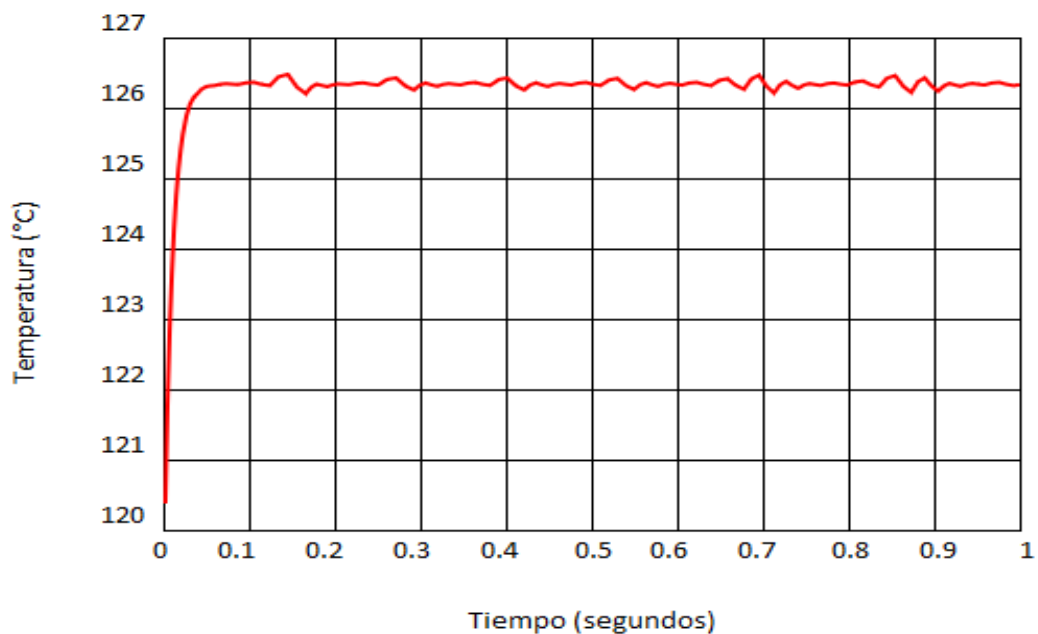


Como se puede ver en la Figura 17, si flujo de entrada del jugo cambia, tarda unos 3000 segundos la concentración de salida del primer efecto en estabilizarse y llegar a una nueva situación de equilibrio.

Variación en temperatura de vapor de primer efecto (T1) con 10% de aumento en flujo de alimentación.

**Figura 3**

Respuesta de temperatura de I efecto perturbando caudal de alimentación.



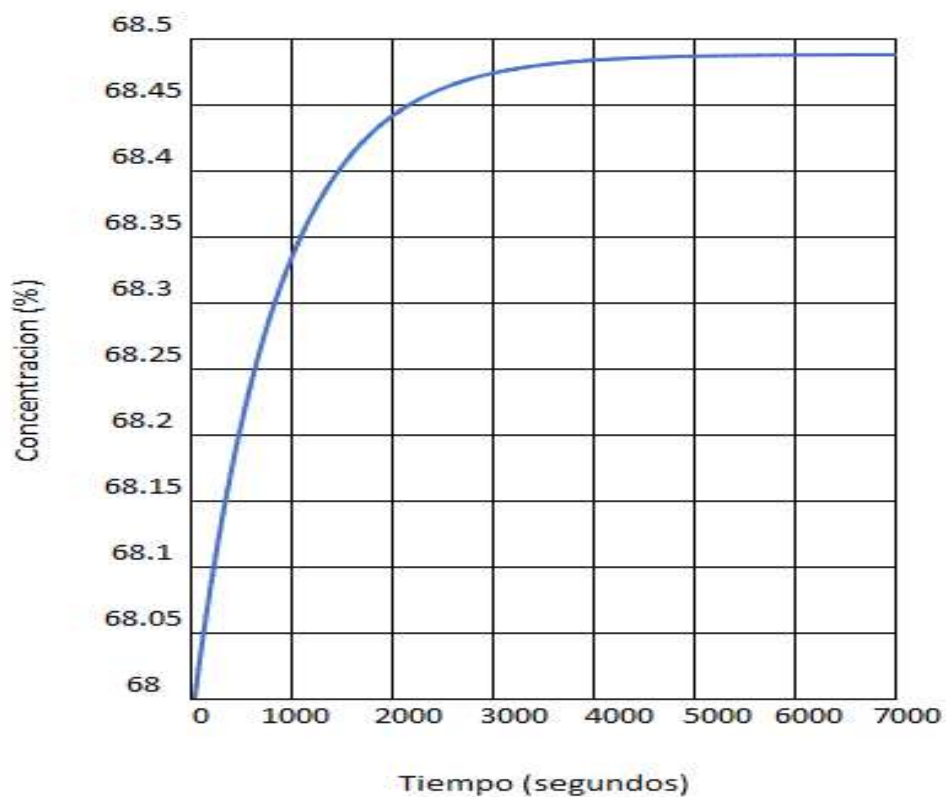
Según figura 3 se tiene que, introduciendo una alteración al flujo de alimentación del jugo, en el primer efecto se estabiliza la temperatura del vapor casi instantáneamente, en menos de 0.1 segundos. Aunque se observan ligeras

fluctuaciones, la variable rápidamente alcanza su nueva condición de estado estacionario.

Variación de concentración de producto de quinto efecto (X5) con 10% de aumento en flujo másico de alimentación.

**Figura 4**

Respuesta de concentración de V efecto perturbando caudal de alimentación.

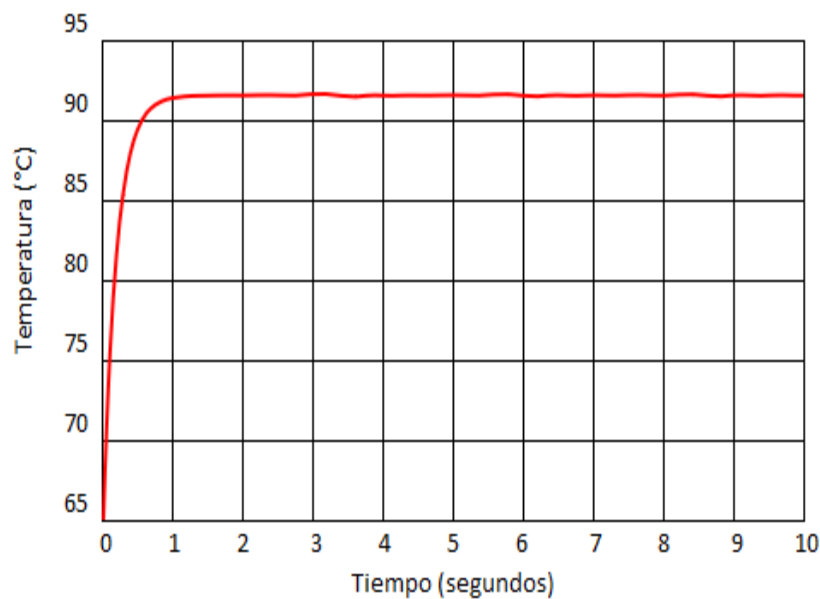


Como se ve en la figura 4, cuando hay un cambio en flujo de entrada del jugo, tarda unos 5000 segundos en estabilizarse la concentración de salida del quinto efecto. Este largo tiempo de respuesta es algo muy importante a tener en cuenta al operar sistemas de evaporación de evaporación de múltiple efecto.

Variación en temperatura de vapor de quinto efecto (T5) con 10% de aumento en flujo de alimentación.

**Figura 5**

Respuesta de temperatura de vapor de 5to efecto perturbando caudal de alimentación



Como se evidencia en la figura 5, una perturbación en flujo de alimentación del jugo provoca se estabilice en aproximadamente 1 a 2 segundos la temperatura del vapor en el quinto efecto. A diferencia del primer efecto, esta estabilización se logra sin fluctuaciones perceptibles, indicando una mayor estabilidad en el comportamiento térmico del sistema en su etapa final.

#### 4.2.2 Efecto al variarse concentración de alimentación, X0

Las Figuras 6 a 9 muestran cómo reaccionan en el primer y último efecto la temperatura del vapor ( $T_i$ ) y concentración ( $X_i$ ), respectivamente, cuando su

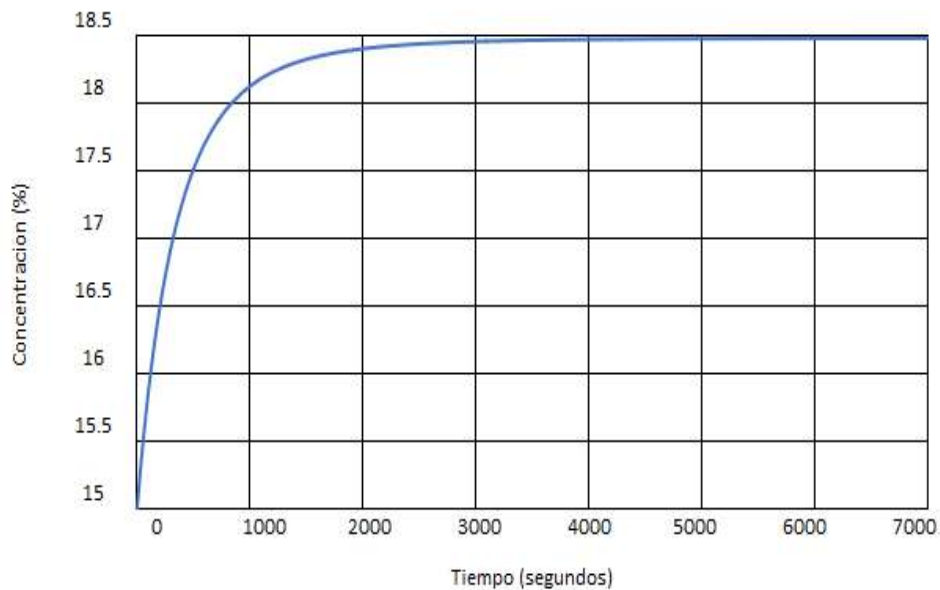
concentración de alimentación ( $X_0$ ) cambia un 10% de forma escalonada.

Se desprende según figuras que, el cambio en concentración de producto es más grandes cuando se altera el flujo de alimentación. Además, se nota que la temperatura responde mucho más rápido a los cambios que la concentración. Asimismo, el primer efecto alcanza el estado estable a una velocidad superior a la del quinto efecto. Siendo los hallazgos consistentes a lo reportado en Kumar et al. (2014), reforzando la comprensión de la dinámica de estos sistemas.

Variación en concentración del producto de primer efecto ( $X_1$ ) con 10% de aumento en concentración de alimentación ( $X_0$ )

### Figura 6

Respuesta de concentración de I efecto perturbando concentración alimentación.

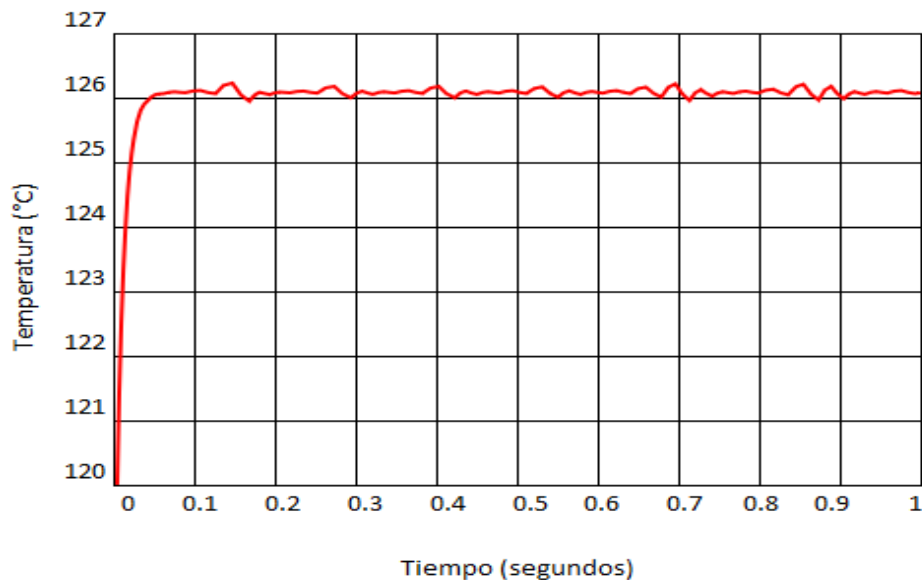


Se tiene según figura 6, si cambia concentración de jugo que entra, tarda unos 5000 segundos la concentración de salida del primer efecto en estabilizarse. Es importante destacar que es mucho más sensible la concentración de salida a los cambios en concentración de entrada que a las variaciones en flujo de alimentación del jugo. Esto subraya una importancia crítica al mantener una concentración de alimentación estable para asegurar la consistencia del producto.

Variación en temperatura de vapor de primer efecto (T1) con 10% de aumento en concentración de alimentación (X0)

### Figura 7

Respuesta de temperatura de vapor de I efecto perturbando concentración alimentación.



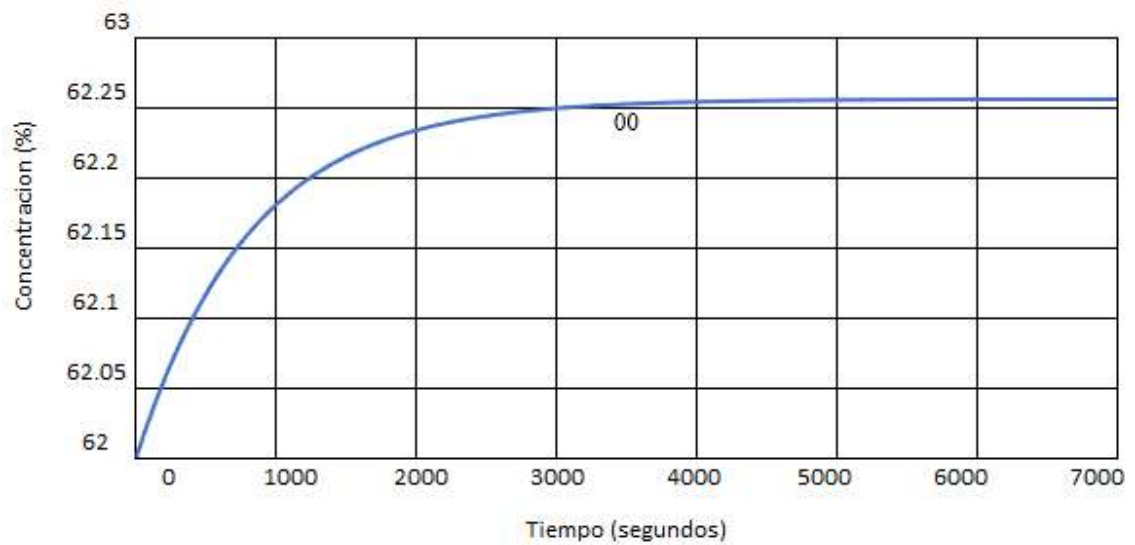
Según figura 7, cuando se cambia concentración de jugo que entra, se estabiliza casi de inmediato la temperatura del vapor en el primer efecto. Aunque hay algunas pequeñas variaciones, la temperatura se mantiene consistentemente cerca de su

nuevo punto de equilibrio.

Variación en concentración de producto de quinto efecto (X5) con 10% de aumento en concentración de alimentación (X0).

### Figura 8

Respuesta de concentración de V efecto perturbando concentración alimentación.

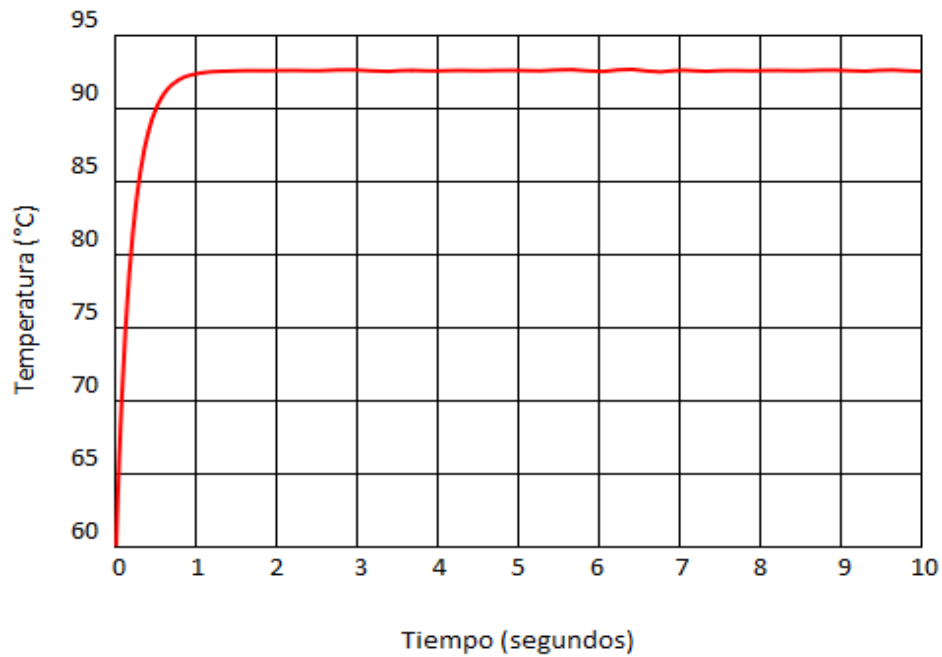


Como se puede ver en la figura 8, la concentración de salida del quinto efecto tarda unos 6000 segundos en estabilizarse si la concentración del jugo que entra cambia. Este tiempo de respuesta tan largo nos dice mucho sobre cuán lento es el sistema para reaccionar a los cambios en la calidad de lo que se le alimenta.

Variación en temperatura de vapor de quinto efecto (T5) con 10% de aumento en concentración de alimentación (X0)

**Figura 9**

Respuesta de temperatura de vapor de V efecto perturbando concentración alimentación



Como se puede ver en la Figura 9, la temperatura del vapor en el quinto efecto se estabilizará en forma rápida si hay un cambio en la concentración del jugo que entra, en solo uno o dos segundos. A diferencia del primer efecto, esta etapa final del sistema exhibe una mayor estabilidad. Pues la temperatura se mantiene sin fluctuaciones significativas una vez alcanzado el estado estacionario. exhibe una mayor estabilidad, pues la temperatura se mantiene sin fluctuaciones significativas una vez alcanzado el estado estacionario.

### 4.2.3 Efecto de variar la temperatura del vapor de escape

Las Figuras 6 a 9 nos muestran cómo un cambio brusco del 10% en temperatura de vapor de escape, influye en temperatura de vapor ( $T_i$ ) y concentración ( $X_i$ ), tanto en el primer efecto como en el último.

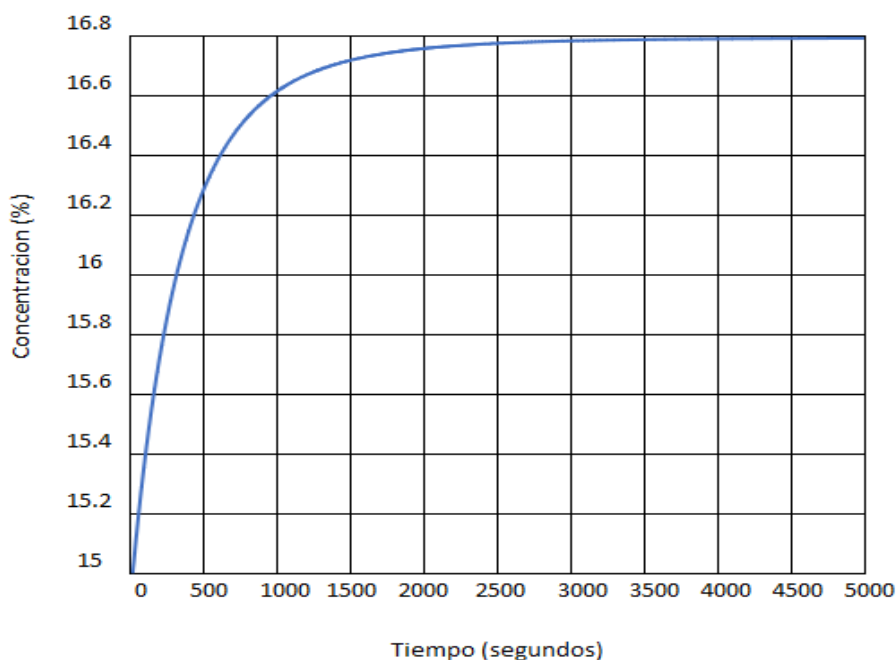
De estas gráficas, cuando cambia la temperatura del vapor de escape, más afecta la temperatura del vapor en las siguientes etapas. Vemos también que la temperatura del vapor reacciona mucho más rápido que la concentración. Y, el primer efecto se estabiliza más velozmente que el quinto.

Coincide con el reporte de Kumar et al. (2014), lo que refuerza nuestra comprensión de la dinámica de estos sistemas.

Variación en concentración de producto de primer efecto ( $X_1$ ) con 10% de aumento en temperatura del vapor de escape ( $TV_0$ ).

#### Figura 10

Respuesta de concentración de I efecto perturbando temperatura del vapor de escape.



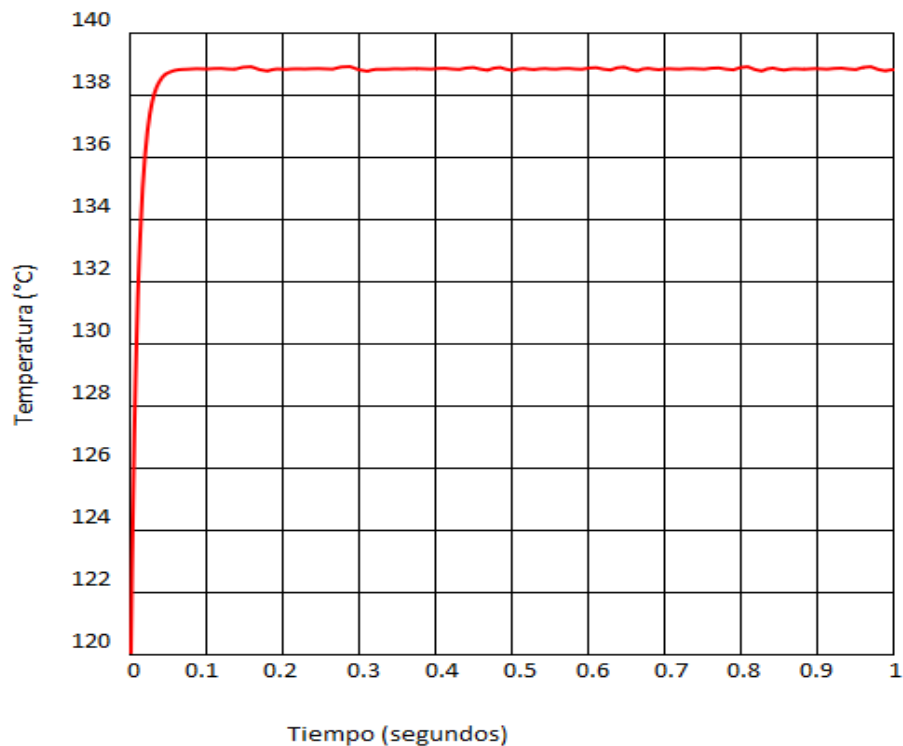
Según lo que vemos en la figura 10, la concentración de salida de primer efecto tarda unos 3500 segundos en estabilizarse cuando cambia temperatura del vapor de entrada (vapor de escape).

Es importante recalcar que, a diferencia de lo que sucede con los cambios en concentración de jugo que entra, se tiene concentración de salida menos afectada por las variaciones en el flujo de vapor.

Variación en la temperatura de vapor del primer efecto (T1) con un aumento del 10% en la temperatura del vapor de escape (TV0).

### Figura 11

Respuesta de temperatura de vapor de I efecto perturbando temperatura del vapor de escape.

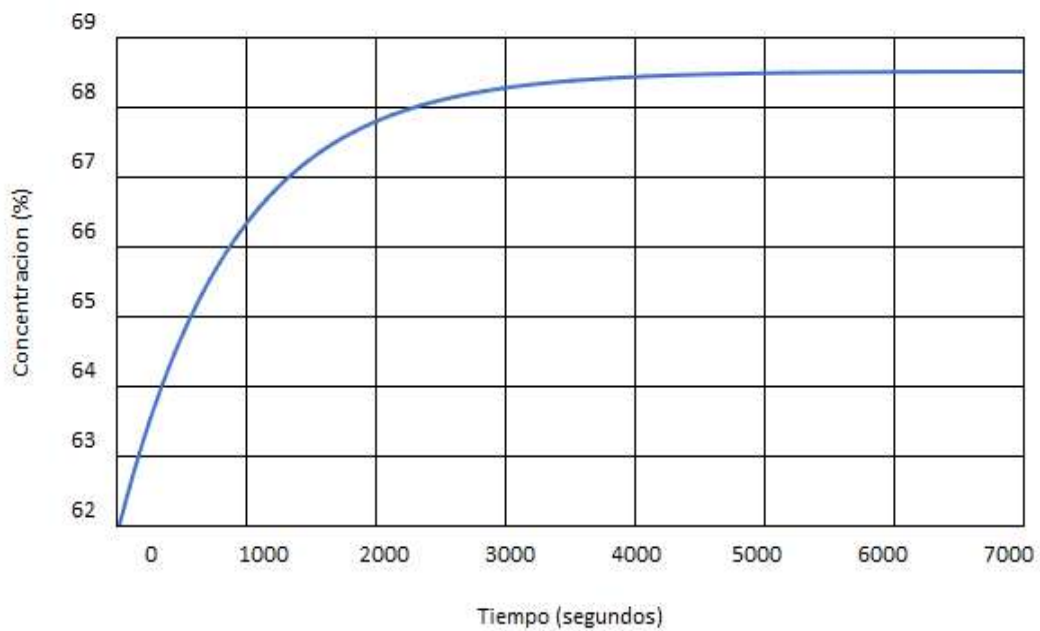


Como se puede ver en la figura 11, la temperatura del vapor en primer efecto se estabiliza casi al instante si la temperatura del vapor de entrada (el vapor de escape) cambia. Aunque se aprecian ligeras fluctuaciones, la estabilidad general de la variable se mantiene consistentemente.

Variación en concentración de producto de quinto efecto (X5) con 10% de aumento en temperatura del vapor de escape (TV0).

### Figura 12

Respuesta de concentración de V efecto perturbando temperatura del vapor de escape.

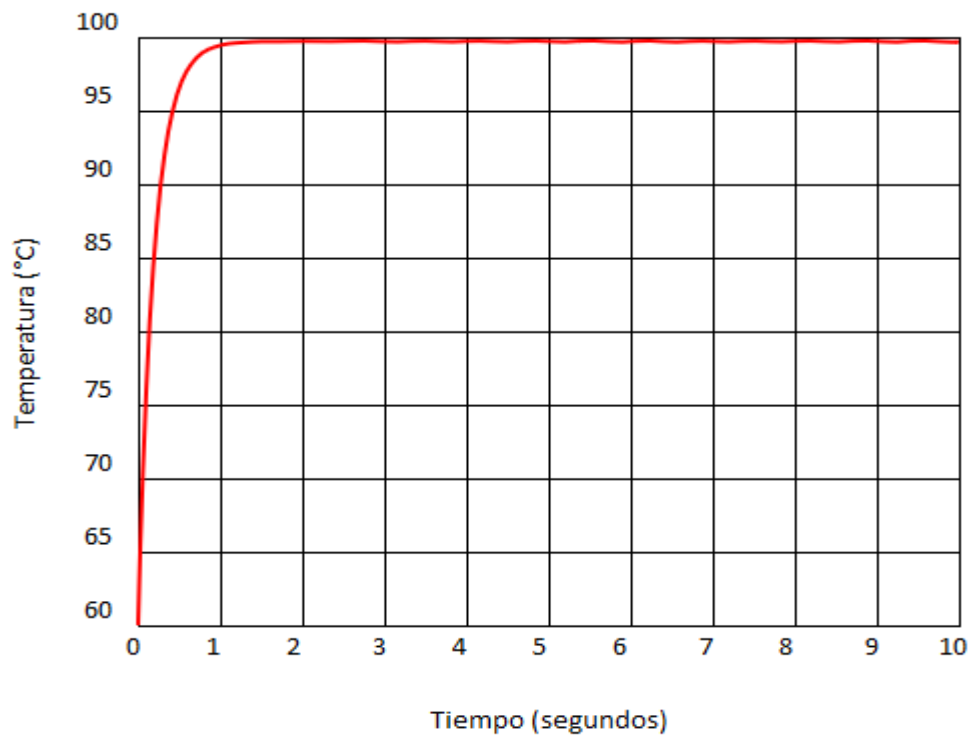


Como se ilustra en la Figura 12, la concentración de salida de quinto efecto demora cerca de 5500 segundos en alcanzar condición estable si hay perturbación en temperatura del vapor de entrada (vapor de escape). Este hallazgo resalta la inercia del sistema en su etapa final frente a cambios térmicos en la alimentación de vapor.

Variación en temperatura de vapor de quinto efecto (T5) con 10% de aumento en temperatura de vapor de escape (TV0).

**Figura 13**

Respuesta de temperatura de vapor de V efecto perturbando temperatura de vapor de escape



Como se evidencia en la figura 13, una perturbación en temperatura del vapor de entrada (vapor de escape) provoca que temperatura del vapor en el quinto efecto se estabilice rápidamente, en aproximadamente 1 a 2 segundos. A diferencia del primer efecto, esta etapa final del sistema muestra una mayor estabilidad, ya que la temperatura se mantiene sin fluctuaciones significativas una vez alcanzado el estado estacionario.

#### 4.2.4 Efecto de variar temperatura de alimentación de jugo de caña

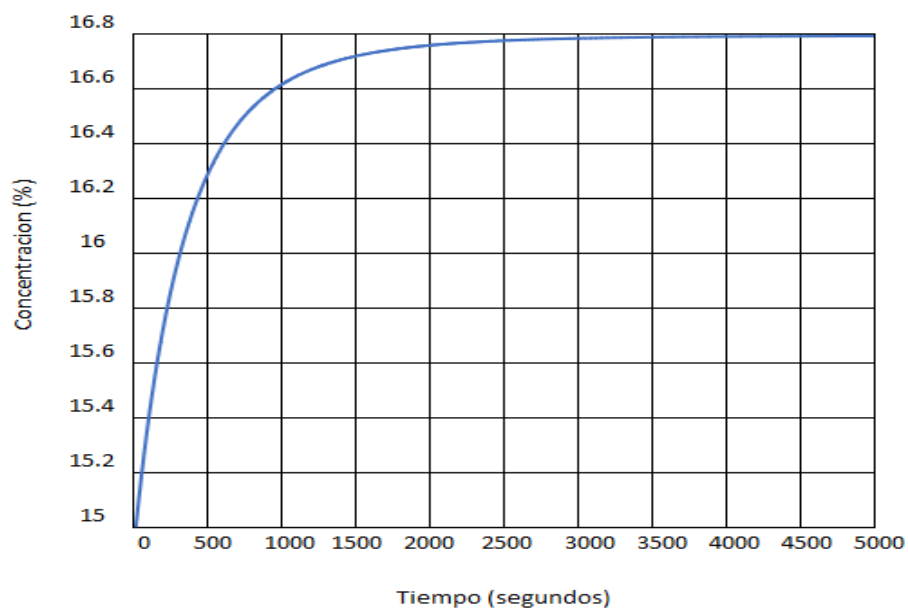
Las Figuras 13 a 16 nos muestran cómo un cambio brusco de 10% en temperatura de jugo que entra afecta temperatura del vapor ( $T_i$ ) y concentración ( $X_i$ ), tanto en el primer efecto como en el último.

De estas gráficas, desprendemos que cambiar la temperatura del jugo que entra no afecta mucho ni su concentración ni la temperatura del vapor. Y como ya hemos visto en otras ocasiones, la temperatura del vapor reacciona mucho más rápido que la concentración. Además, el primer efecto alcanza el estado estable con mayor celeridad que el quinto efecto. Estos hallazgos son consistentes con Kumar et al. (2014) en sus observaciones.

Variación en concentración de producto de primer efecto ( $X_1$ ) con 10% de aumento en temperatura de alimentación del jugo.

**Figura 14**

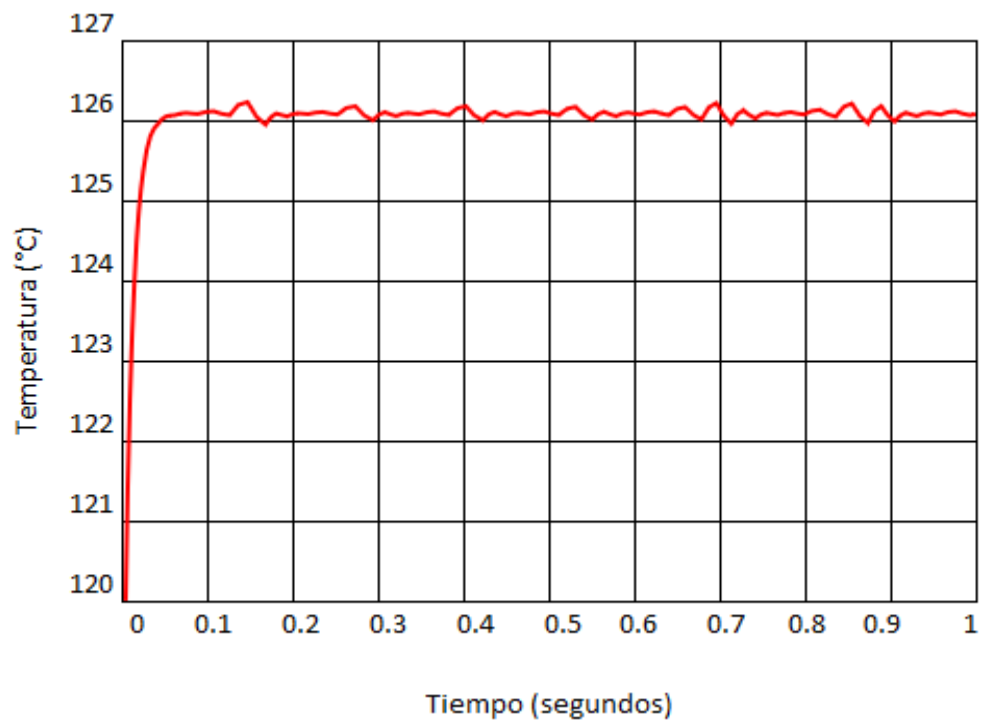
Respuesta de concentración de I efecto perturbando temperatura de alimentación de jugo.



Variación en temperatura de vapor de primer efecto (T1) con 10% de aumento en temperatura de alimentación de jugo.

**Figura 15**

Respuesta de temperatura de vapor de I efecto perturbando temperatura de alimentación del jugo.

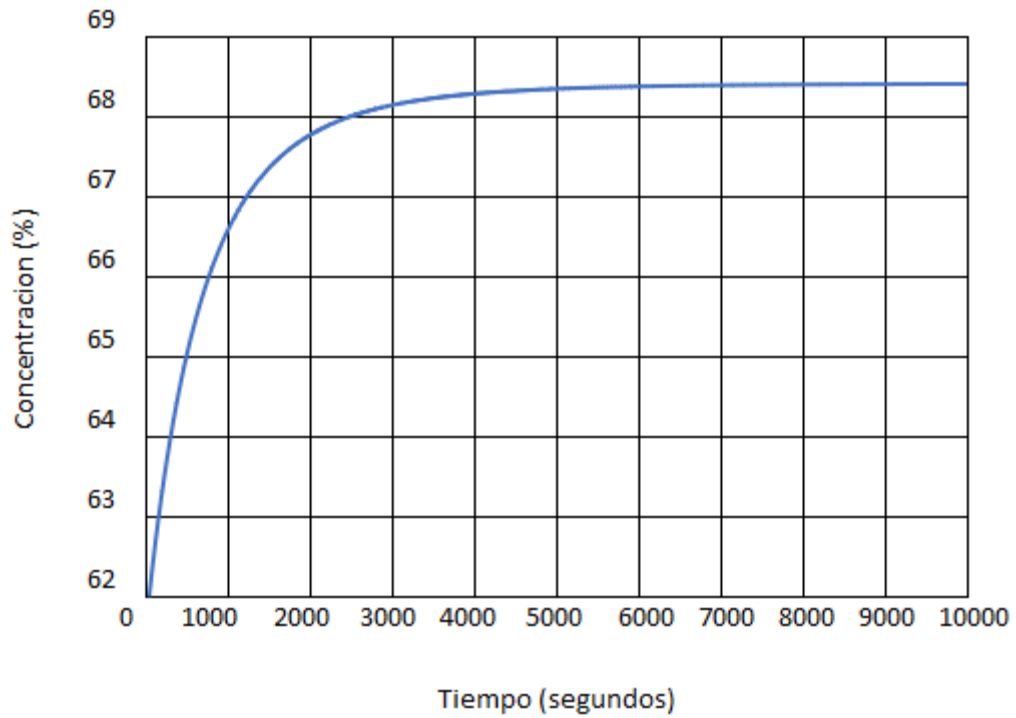


Como se aprecia en la figura 15, alcanza su estado estable de forma casi instantánea la temperatura del vapor en el primer efecto al alterar la temperatura de alimentación del jugo. Aunque se observan ligeras fluctuaciones, la variable se mantiene con gran estabilidad.

Variación en concentración de producto de quinto efecto (X5) con aumento de 10% en temperatura de alimentación de jugo.

**Figura 16**

Respuesta de la concentración de V efecto perturbando temperatura de alimentación del jugo.

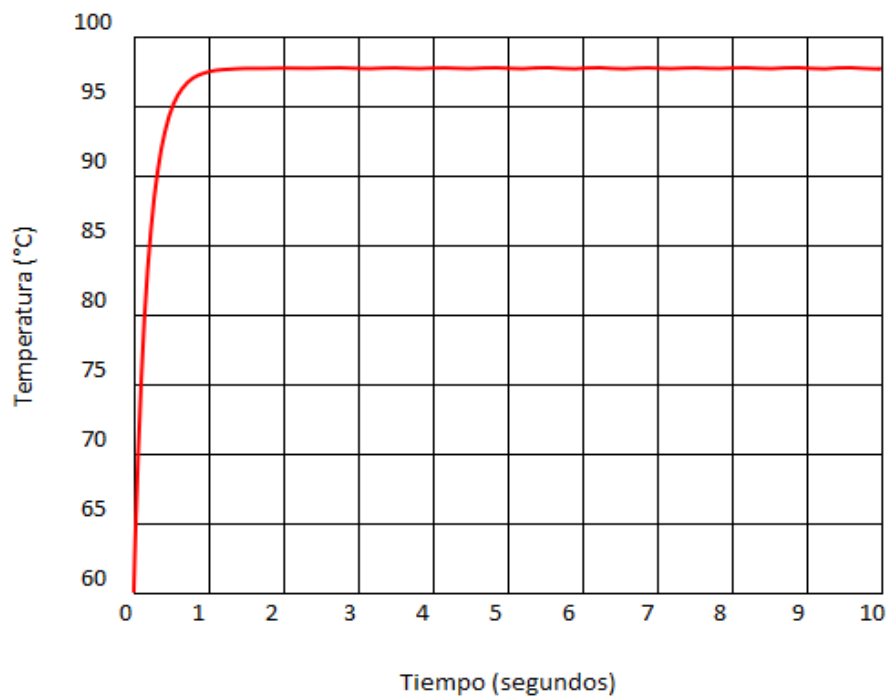


Según figura 16 la concentración de salida de quinto efecto tarda unos 5500 segundos en estabilizarse si la temperatura del jugo que entra cambia. Este hallazgo subraya la considerable inercia del sistema en su fase final frente a variaciones en la temperatura del jugo que ingresa.

Variación en temperatura de vapor de quinto efecto (T5) con aumento de 10% en temperatura de alimentación de jugo.

**Figura 17**

Respuesta de la concentración de V efecto perturbando temperatura de alimentación del jugo.



Como se observa en la figura 17, la temperatura del vapor en el quinto efecto se estabiliza rápidamente, en un lapso de 1 a 2 segundos si hay perturbación en la temperatura de alimentación del jugo de entrada. A diferencia del primer efecto, esta etapa final del sistema exhibe una mayor estabilidad, ya que la temperatura se mantiene sin fluctuaciones significativas una vez alcanzado el estado estacionario.

**Tabla 5**

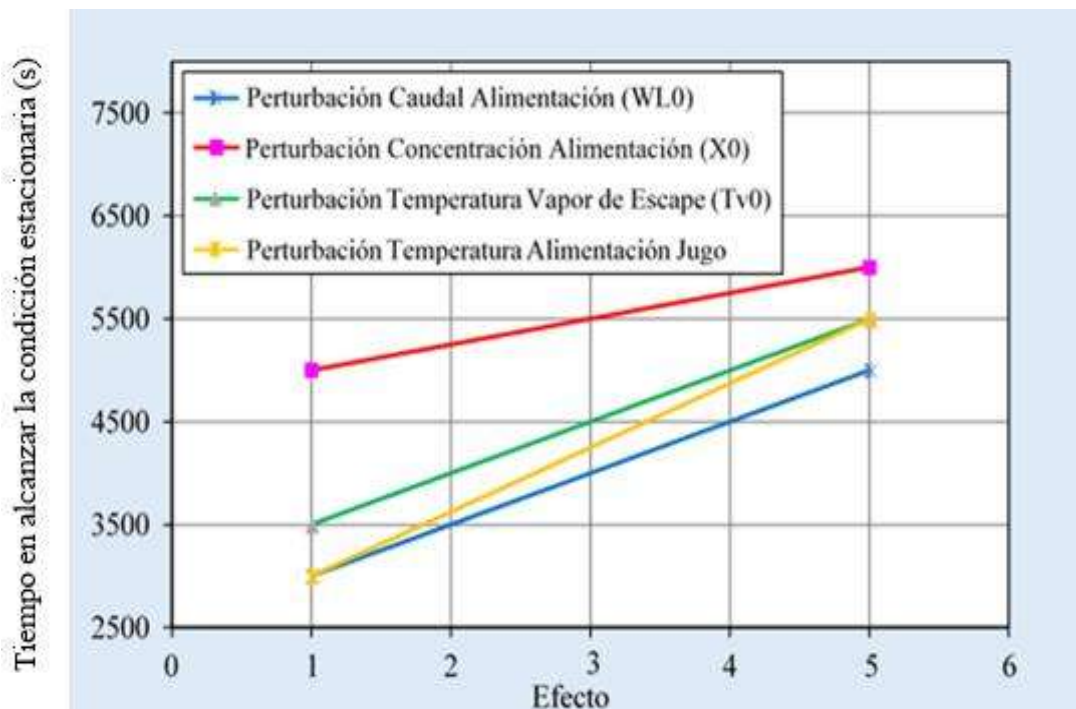
La perturbación y su efecto sobre la concentración ( $X_i$ )

Perturbación	Efecto	Tiempo (S)
Caudal de alimentación (Kg/s)	I	3000
	V	5000
Concentración de alimentación ( $X_0$ , %)	I	5000
	V	6000
Temperatura del vapor de escape ( $T_{v0}$ , °C)	I	3500
	V	5500
Alimentación de jugo (°C)	I	3000
	V	5500

Nota: Elaboración propia

**Figura 18**

La perturbación y su efecto sobre concentración de I y V efecto.



Al examinar tabla 5 y figura 18, resulta evidente que requieren un tiempo considerablemente mayor las perturbaciones en la concentración de alimentación ( $X_0$ ) para que el sistema alcance una condición estacionaria, un efecto que se acentúa aún más en el último efecto del evaporador. Por lo tanto, se concluye que esta variación en concentración de alimentación ( $X_0$ ) es la que más influye en la concentración final del jarabe, que es el producto clave de la etapa de evaporación.

**Tabla 6**

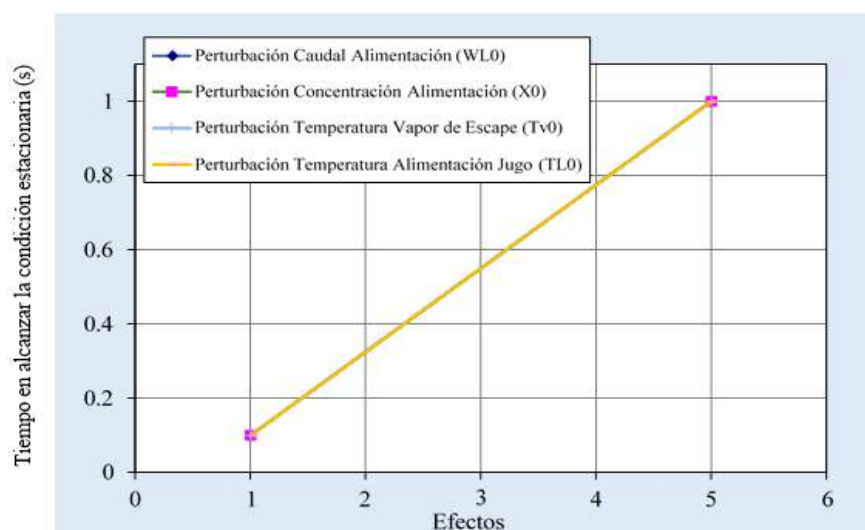
*La perturbación y su efecto sobre temperatura ( $T_i$ )*

Perturbación	Efecto	Tiempo (S)
Caudal de alimentación (Kg/s)	I	0.1
	V	1
Concentración de alimentación ( $X_0$ , %)	I	0.1
	V	1
Temperatura del vapor de escape ( $^{\circ}\text{C}$ )	I	0.1
	V	1
Alimentación de jugo ( $^{\circ}\text{C}$ )	I	0.1
	V	1

Nota: Elaboración propia

**Figura 19**

La perturbación y su efecto sobre Temperatura de I y V efecto.



## Capítulo V

### DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Discusión

Según figura 14, si la temperatura del jugo que entra cambia, tardará unos 3000 segundos en estabilizarse la concentración de salida del primer efecto. Además, a diferencia de lo que ocurre con los cambios en la concentración de entrada del jugo, la concentración de salida es menos sensible si se altera el flujo de vapor.

Las tablas 5 y 6 ofrecen una síntesis del impacto de las diversas perturbaciones en la concentración ( $X_i$ ) y la temperatura ( $T_i$ ) del sistema de evaporación, mostrando el tiempo requerido para que cada variable alcance el estado estacionario.

Un análisis comparativo entre la tabla 9 y la figura 19 revela que, sorprendentemente, todas las perturbaciones estudiadas resultan en tiempos de estabilización idénticos. Sin embargo, al observar las Figuras 18 y 19, se hace evidente que la concentración en el último efecto es la variable que exhibe la mayor sensibilidad a las perturbaciones de entrada analizadas. Esto sugiere que, aunque los tiempos de estabilización puedan ser similares, el impacto inicial y la magnitud de la desviación son más pronunciados en esta variable crítica.

## 5.2 Conclusiones

- El sistema de evaporación que analizamos tiene cinco evaporadores de película descendente. En este arreglo, entra el jugo clarificado ya precalentado a  $116^{\circ}\text{C}$  en un primer efecto. Además, el vapor se saca en primeros cuatro efectos.

Estas dos cosas — calentar el jugo desde el principio a la temperatura de trabajo del primer efecto y sacar vapor en las etapas intermedias — ayudan un montón a que se ahorre más vapor en general. Gracias a esto, la economía del sistema ( $E_c$ ) llega a 2.99, y la eficiencia del sistema ( $E_f$ ) es un excelente 95.7%. Esto pasa porque se usa mucho menos vapor, lo que hace que el ingenio sea mucho más eficiente.

- Para entender cómo reaccionaba el proceso cuando las cosas cambiaban, empezamos con los valores de las variables que el sistema tenía cuando estaba estable. El estudio consistió en ingresar cuatro tipos de cambios controlados:
  - Modificaciones en la cantidad de alimento que entraba.
  - Variaciones en concentración de ese alimento.
  - Alteraciones en temperatura de vapor de escape.
  - Cambios en temperatura del jugo que alimentaba.

Cada uno de estos cambios se aplicó de forma gradual, con un 10% de aumento. Lo que vigilamos de cerca en el sistema fue temperatura del vapor, así como concentración de salida en cada etapa.

- En esta investigación, creamos un modelo matemático que agrupa parámetros y simula un estado inestable, basándonos en balance de materia y energía. Lo hicimos en el sistema de evaporador de película descendente de quintuple efecto. Al final, este modelo resultó ser muy bueno para describir cómo se comporta la dinámica en un sistema de evaporación.

- Para crear un modelo matemático que describe el estado estacionario, que incluye ecuaciones no lineales, usamos método de mínimos cuadrados, implementado con el solucionador de Matlab. Por otro lado, para desarrollar un modelo matemático en estado dinámico, tratándose de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, utilizamos solucionador de Matlab. Este último basado en método de Runge-Kutta y nos sirvió para ver cómo cambian la temperatura, la concentración y el nivel a lo largo del tiempo. La simulación de modelo en estado estacionario la validamos con datos reales que nos dio la industria azucarera que estábamos estudiando. Aunque no teníamos datos dinámicos para una validación extra, consideramos en estado estacionario la validación es robusta y, con la forma en que respuestas dinámicas coincidieron con lo que esperábamos del sistema, es suficiente para los objetivos de esta investigación.
- Al comparar lo que nos dio nuestro programa de simulación con los datos reales de evaporador en la fábrica de azúcar que estudiamos, vimos que el error máximo fue de solo 4% en temperatura del jugo del tercer efecto. Este nivel de error, que consideramos bajo, nos asegura que los resultados son confiables. Por todo esto, podemos decir con toda seguridad que el modelo de simulación que desarrollamos es bueno y representa de forma aceptable cómo se comporta el sistema de evaporación.
- Al analizar cómo respondía nuestro sistema de evaporación a diferentes cambios iniciales (como variaciones en el flujo de entrada, la concentración del alimento, la temperatura del vapor de escape y temperatura de jugo que entra), notamos patrones muy claros. En todos los casos que estudiamos, la temperatura del vapor se estabilizaba más rápido que la concentración de sólidos. Además, el primer efecto del evaporador siempre lograba estabilizarse

más velozmente que el quinto efecto.

Al analizar cómo se comportaba el sistema durante el régimen transitorio, los autores descubrieron que la concentración en el último efecto es la variable que más se ve afectada por los cambios que entran. Además, la concentración del jugo que se alimenta es la que más impacta en las variables que estudiaron (temperatura del vapor y concentración de salida), justo después le sigue temperatura del vapor de escape. Estos hallazgos no solo permitieron alcanzar el objetivo principal de la investigación, sino que también ofrecen una solución sólida al problema planteado en esta tesis.

### 5.3 Recomendaciones

- Nuestros hallazgos indican que la **concentración de salida del jugo** es la variable más susceptible a todas las perturbaciones analizadas en el sistema. Dada esta sensibilidad, sugerimos que futuras investigaciones se enfoquen en desarrollar e implementar **estrategias de control específicas** para optimizar esta variable crítica.
- Para el ámbito académico, se recomienda encarecidamente expandir la biblioteca de módulos de cálculo del simulador actual. El objetivo sería incorporar la totalidad del proceso en la industria azucarera, abarcando desde la **molienda** y **clarificación** hasta el **calentamiento** y la **crystalización**. Esta ampliación no solo beneficiaría futuras investigaciones al proporcionar una herramienta integral, sino que también permitiría a la universidad utilizar el simulador con fines didácticos en curso **Simulación de Proceso, Diseño de Proceso**, entre otros. De esta forma, se enriquecería significativamente la experiencia de aprendizaje de

los estudiantes.

- Para futuros trabajos de investigación en este campo, se aconseja **explorar y desarrollar nuevas ecuaciones matemáticas**. El objetivo sería lograr una representación más precisa y fiel del comportamiento del sistema de evaporación en condiciones reales. Este enfoque permitiría mejorar la exactitud de las simulaciones y el entendimiento profundo del proceso.
- Dada la inherente complejidad de los cálculos, se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en proponer y desarrollar métodos nuevos de más precisión que ajusten al modelo existente. Esto permitiría una representación aún más fiel del sistema, mejorando la robustez y exactitud de las simulaciones.
- Para próximos estudios en este campo, se sugiere investigar a fondo cómo las incrustaciones afectan el proceso de evaporación. Este análisis es crucial para comprender mejor el rendimiento y la eficiencia de los sistemas en condiciones operativas reales.

## Capítulo V

### FUENTES DE INFORMACIÓN

#### Fuentes Bibliográficas

Alzate, J. (2011). Análisis e interpretación de propuesta de desarrollo agroindustrial.

<http://www.eumed.net/libros/2009d/616/Analisis%20e%20Interpretacion%20de%20Propuesta%20de%20Desarrollo%20Agroindustrial.htm>

Bhargava, R., Khanamb, S., Mohanty, B., Ray, A. (2008). Selection of optimal feed flow sequence for a multiple effect evaporator system. *Computers and Chemical Engineering*. 32(10), 2203–2216.

<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2007.10.012>

Bohórquez, J. (2003). Oportunidades de producción más limpia en agroindustria panelera. CAR-CORPOICA. Banco Interamericano de Desarrollo, CINSET.

Cano, E., Romero, L. (2010). Dimensionamiento de cuerpos de un sistema de evaporación de múltiple efecto para producción de mieles a partir de jugos de caña. [Tesis de titulación]. Universidad industrial de Santander.

Castro, J. (2002). Operación y mantenimiento de calderas. Universidad Nacional de Colombia.

[https://descubridor.banrepcultural.org/discovery/fulldisplay/alma991007930059707486/57BDLRDC\\_INST:57BDLRDC\\_INST](https://descubridor.banrepcultural.org/discovery/fulldisplay/alma991007930059707486/57BDLRDC_INST:57BDLRDC_INST)

Cely, M. (2011). Determinación de parámetros de operación en una planta de producción de panela con evaporación múltiple efecto. Fundación Universidad de América.

- Dhara J., Ghagchandani, C. (2012). Design, Modelling and Simulation of Multiple Effect Evaporators. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 1(3), 1-5. <https://ijset.com/publication/v1/046.pdf>
- Duran, E. (2010). Determinación de eficiencia energética de un sistema de evaporación de múltiple efecto empleado en la concentración de jugos de caña panelera. Fundación Universidad de América.
- Hugot, E. (1986). Handbook of cane sugar engineering. Elsevier, 7(1), 1-1184 <https://es.scribd.com/document/332429693/Handbook-of-Cane-Sugar-Engineering-pdf>
- Fernández, N. (2003). Estudio para implementación de una planta de producción de panela. [Tesis de titulación, Universidad de San Carlos]. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_1091\\_IN.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1091_IN.pdf)
- García, H. (2009). Análisis de eficiencia para un trapiche de la hoyá del río Suárez. CIMPA-CORPOICA.
- García, H., Peña, A., López, R., Duran, E. (2011). Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de múltiple efecto para mejorar eficiencia térmica y productividad y disminuir impacto ambiental en la producción de panela. <https://repository.agrosavia.co/bitstreams/25f090dd-4f6b-474e-8b9c-f56b29d4428f/download>
- Gautami, G., Khanam, S. (2012). Selection of optimum configuration for multiple effect evaporator system. *Desalination*. 288(1), 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.12.005>

# **A N E X O S**

**Anexo 1: Matriz de Consistencia**

**Sistema de evaporación por quintuple efecto en la empresa Agroindustrial Paramonga S.A. aplicando simulación dinámica – Paramonga 2023**

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOS TECNICOS	INSTRUMENTOS
<p><b>Problema general</b> ¿Cómo aplicar un simulador dinámico para el diseño, funcionamiento y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.?</p> <p><b>Problemas específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Qué tablas de datos son necesarias desarrollar en el simulador dinámico en el diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la Empresa Aipsa?</li> <li>• ¿Qué datos operacionales son necesarios utilizar en el desarrollo del simulador dinámico para su funcionamiento?</li> <li>• ¿Cómo se desarrolla la programación del simulador dinámico, para el diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la Empresa AIPSA?</li> <li>• ¿Cómo se realiza la simulación en el simulador dinámico para la obtención de datos de diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la Empresa AIPSA?</li> </ul>	<p><b>Objetivo general</b> Desarrollar un simulador dinámico para el diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la industria azucarera.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollar las tablas de datos para el desarrollo del simulador dinámico para el diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la Empresa AIPSA.</li> <li>• Identificar los datos operacionales y técnicos en el desarrollo del simulador dinámico para el diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la industria azucarera.</li> <li>• Desarrollar la programación del simulador dinámico para el diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la industria azucarera.</li> <li>• Realizar la simulación en el simulador dinámico para la obtención de datos de diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la industria azucarera.</li> </ul>	<p><b>Hipótesis General</b> La implementación de un software de simulación dinámica en el Proceso de Elaboración de azúcar influye significativamente en la optimización y control del funcionamiento de la superficie calórica en el área de evaporación de un quintuple efecto.</p> <p><b>Hipótesis Específicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ El desarrollo de tablas de datos en el simulador dinámico influye significativamente para el diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.</li> <li>■ La implementación de un software de simulación dinámica influye significativamente en la optimización y control del consumo de vapor en el área de evaporación de un quintuple efecto en la Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.</li> <li>■ El desarrollo del simulador dinámico influye significativamente permitiendo identificar los datos operacionales y técnicos en el diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto en la industria azucarera.</li> <li>■ La implementación de un software de simulación dinámica influye significativamente para optimizar costos operativos por el consumo de vapor en la Empresa Agroindustrial Paramonga S.A.</li> </ul>	<p><b>Variable independiente(X):</b> Desarrollo de un simulador dinámico.</p> <p><b>Variable dependiente (Y):</b> Diseño y evaluación de evaporadores de quintuple efecto.</p> <p><b>Indicadores:</b> Para la variable independiente Vapor saturado Presiones Vapor saturado Temperaturas Densidad del jugo respecto a Brix Vapor vivo de calefacción Corrientes de jugo y jarabe Vapor vegetal producido en cada evaporador Tomas o sangrías de vapor de cada evaporador Condensados producidos en cada evaporador Recuperación de Reevaporizados a evaporadores Pérdida de energía en evaporadores Desarrollo del entorno del simulador Formulación de ecuaciones Codificación del simulador</p> <p>Para la variable dependiente Velocidades del vapor en el cuerpo Volumen de jugo en evaporadores Tiempo de retención en evaporadores Área de calefacción del evaporador Flux de evaporación en el evaporador Coeficiente global de transferencia de calor Porcentaje de área de calefacción utilizada Porcentaje de agua evaporada en evaporadores Variación de la presión en evaporadores Ratio agua evaporada/vapor consumido Ratio agua/Vapor a condensar en condensadores</p>	<p><b>Tipo de investigación</b> Tesis descriptiva y aplicada</p> <p><b>Diseño</b> Usamos en el trabajo, por ejemplo, el conjunto de técnicas, métodos y procedimientos que se deben seguir durante el desarrollo de un proceso, para producción de conocimiento acerca del tema determinado.</p> <p><b>Técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Documentales</li> <li>• De Observación</li> </ul>	<p><b>Fuentes Bibliográficas</b> Catálogo de equipos, especificaciones técnicas de productos, enciclopedias, diccionarios, guías, libros de textos, manuales, marchas analíticas estandarizadas, normas técnicas, revistas, tesis.</p> <p><b>Fuentes iconográficas:</b> Diapositivas, videos</p> <p><b>Fuentes magnéticas:</b> PC, CD-ROM.</p>