Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Orizaba

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

"MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA PARA EVALUAR LAS VARIABLES CRÍTICAS QUE IMPACTAN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE CONCENTRACIÓN EN GRADOS BRIX DE LA VINAZA"

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:

Ing. Tomás Cosme Colohua

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Cuauhtémoc Sánchez Ramírez

CODIRECTORA DE TESIS:

Dra. Rocío Ramos Hernández

ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO. **JUNIO 2025**



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 29/mayo/2025
Dependencia: **División de Estudios de Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: **I**

C. COSME COLOHUA TOMAS
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PRESENTE

De acuerdo con el reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA PARA EVALUAR LAS VARIABLES CRÍTICAS QUE IMPACTAN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE CONCENTRACIÓN EN GRADOS BRIX DE LA VINAZA"

Comunico a usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OLE/jarh

OG-13-F06



2025 Año de La Mujer Indígena



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba Veracruz, 20/mayo/2025.
Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.:

COSME COLOHUA TOMAS

La cual lleva el título de:

MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA PARA EVALUAR LAS VARIABLES CRÍTICAS QUE IMPACTAN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE CONCENTRACIÓN EN GRADOS BRIX DE LA VINAZA

y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE:	DR. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ	FIRMA
SECRETARIO:	DRA. ROCIO RAMOS HERNANDEZ	FIRMA
VOCAL:	M.I.I. CONSTANTINO G. MORAS SÁNCHEZ	FIRMA
VOCAL SUP.:	M.C. JORGE ARTURO RAMIREZ HERNANDEZ	FIRMA

TA-09-F18



Av. Oriente 9 #852 Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz. Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: info@orizaba.tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx

100% LIBRE DE PLÁSTICO

Dedicatorias

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fuerza, la salud y la perseverancia para superar cada reto que implicó este trabajo. Su presencia fue una guía constante a lo largo de este camino.

A mis padres, Tomás Cosme Juárez y Felipa Colohua Tlaxcala, por ser un ejemplo firme de responsabilidad, esfuerzo y valores. Gracias por enseñarme con hechos lo que significa avanzar con dedicación, actuar con integridad y nunca rendirse. Todo lo que he logrado ha sido posible gracias a ustedes.

A mis hermanos Félix, Elena, Susan y Pati, por estar siempre presentes en mi vida. Gracias por escucharme, comprenderme y darme ánimo cuando más lo he necesitado. Su apoyo incondicional ha sido una base muy importante para mí.

A mis sobrinos Alexis, Jaziel, Arendy, Yael, Luis, Jomara, Samara, Josmar, Erick y Said, a quienes siempre he considerado como hermanos menores. Su cariño, entusiasmo y compañía me ayudaron a encontrar estabilidad y alegría en momentos difíciles. Siempre los voy a cuidar con el mismo cariño con el que me acompañaron.

A mis grandes amigos Víctor, Lupita y Raquel, por estar conmigo con sinceridad, firmeza y afecto. En los momentos complicados, me escucharon, me hablaron con claridad y me impulsaron a seguir adelante. Les tengo un aprecio muy profundo y agradezco de corazón todo lo que han hecho por mí.

A mis compañeras de maestría Indra, María José y Lucero, por su compromiso y apoyo dentro y fuera del aula. Compartimos proyectos, experiencias y momentos que hicieron este proceso más llevadero y especial. Me siento afortunado de haber contado con su amistad durante esta etapa.

Por último, a mis mascotas Perren, Lein, Gordita, Mari, Niña, Polar y Mambo, que me acompañaron en tantas horas de trabajo. Su presencia, aunque silenciosa, me dio consuelo y compañía cuando más lo necesitaba.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que hicieron posible este trabajo, tanto en el ámbito académico como profesional. Su apoyo y colaboración fueron clave en cada etapa del proceso.

En primer lugar, agradezco al Dr. Cuauhtémoc Sánchez Ramírez, director de esta tesis, por brindarme un caso de estudio real y por su constante orientación a lo largo de este proceso. Su experiencia, exigencia académica y acompañamiento fueron fundamentales para el desarrollo técnico y metodológico del trabajo.

A la Dra. Rocío Ramos Hernández, codirectora de este trabajo, por mantenerse siempre atenta al desarrollo del modelo, asegurándose de que cada decisión metodológica tuviera un fundamento sólido y guiándome con claridad cuando fue necesario.

Al Dr. Omar Merino Pérez, por su apoyo invaluable para comprender a profundidad el problema central de esta investigación. Gracias a sus conocimientos en el área, fue posible identificar con claridad las causas fundamentales del proceso analizado, lo que permitió enfocar el modelo con mayor precisión.

A mis profesores que contribuyeron a mi formación durante la maestría: Dr. Cuauhtémoc Sánchez Ramírez, M.C. Constantino Gerardo Moras Sánchez, M.C. Jorge Luis Mortera, Dr. Carlos Díaz Ramos y Dr. Alberto A. Aguilar Lasserre. Gracias por compartir sus conocimientos y por aportar herramientas clave que fortalecieron mi formación profesional.

Agradezco especialmente a la Dra. Susana Itzel Pérez Rodríguez y al Ing. Juan José Fuentes Baca, por su apoyo directo durante el trabajo en campo, así como a mis compañeros dentro de la planta: Antonio, César, Daniel, Elisandro, Francisco, Jesús y Luis. Su colaboración fue clave para comprender la operación real del sistema y validar los resultados obtenidos.

A la empresa que me permitió realizar este estudio, gracias por facilitar el acceso a sus instalaciones, procesos y datos. Sin esa apertura y disposición, el desarrollo de esta tesis no habría sido posible.

Finalmente, al CONACYT, por la beca brindada, que hizo posible la obtención del grado de Maestra en Ingeniería Industrial.

Resumen

La creciente demanda del mercado y la necesidad de incrementar la eficiencia operativa han llevado a las empresas agroindustriales a replantear sus procesos productivos, buscando soluciones rápidas y sostenibles. En este contexto, la empresa AL ha desarrollado un nuevo producto derivado de la vinaza, caracterizado por su alta densidad y concentración de sólidos, lo que ha abierto nuevas oportunidades en sectores industriales y ganaderos. Sin embargo, el aumento en la demanda de este producto ha implicado retos significativos para el proceso de evaporación, ya que requiere mantener una operación constante en un entorno técnico con limitaciones y variabilidad, donde cualquier disrupción, como mantenimientos o fluctuaciones en las condiciones del sistema, pueden comprometer la estabilidad de la producción.

Esta tesis tiene como objetivo desarrollar un modelo de simulación dinámica que represente el comportamiento del sistema de evaporación e identificar las variables clave afectan su desempeño. Como parte del enfoque metodológico, se aplicaron técnicas estadísticas para analizar el comportamiento de los datos y detectar relaciones entre variables, lo cual permitió sustentar la estructura conceptual del modelo. La simulación se desarrolló a partir de diagramas causales y de Forrester en la plataforma STELLA®, permitiendo analizar el comportamiento del sistema bajo distintos escenarios.

El modelo fue validado, mediante la revisión de su estructura causal y pruebas de comportamiento, asegurando que sus resultados fueran coherentes con el funcionamiento real del sistema. Además, se realizaron análisis de sensibilidad para evaluar cómo afectan los cambios en las variables más importantes. Los resultados permitieron proponer estrategias operativas enfocadas en estabilizar la producción, optimizar el uso de materia prima y mejorar la capacidad de respuesta ante condiciones desfavorables.

Abstract

The growing market demand and the need to improve operational efficiency have led agro-industrial companies to reassess their production processes in search of more agile and sustainable responses. In this context, the company AL developed a new high-density product derived from vinasse, opening opportunities in both industrial and livestock sectors. However, the increasing demand has introduced significant challenges to the evaporation process, which must operate continuously under variable conditions. Interruptions—such as maintenance shutdowns or fluctuations in operating parameters—can compromise the stability and responsiveness of the system.

This thesis aims to develop a system dynamics simulation model to analyze the behavior of the evaporation process and identify the key variables that influence its performance. Statistical tools, including correlation and linear regression analysis, were used to examine relationships between operational variables and system output, providing support for the model structure. The simulation was based on causal and Forrester diagrams and implemented in the STELLA® platform, enabling the evaluation of system behavior under various operating scenarios.

The model was validated through structural review and behavioral testing to ensure consistency with the real process. Sensitivity analyses were also conducted to assess the impact of changes in critical variables. Based on the results, operational strategies were proposed to stabilize production, optimize raw material usage, and improve system responsiveness under unexpected conditions.

Contenido

Introducción 1

Objetivo 2

Objetivo general 2

Objetivos específicos 2

Capítulo 1. Generalidades 3

1.1 La empresa AL 3

1.1.1 Misión y visión empresarial 4

1.1.2 Objetivos y valores empresariales 4

1.1.3 Gama de productos 5

1.1.4 Cadena de suministro 5

1.1.5 Procesos logísticos de la empresa AL 11

1.2 Alcances 16

1.3 Justificación 16

Capítulo 2. Marco teórico 18

2.1 Cadena de suministro 18

2.1.1 Miembros que componen a la cadena de suministro 21

2.1.2 Procesos logísticos 21

2.2 Gestión de la cadena de suministro 25

2.3 Simulación 26

2.3.1 Clasificación de los modelos de simulación 27

2.3.2 Etapas en un proyecto de simulación 29

2.4 Dinámica de sistemas 30

2.4.1 Diagramas causales y de Forrester 31

2.4.2 Modelización 34

2.5 Vinaza 36
2.5.1 Métodos de evaporación 37
2.6 Estado del arte 40
Capítulo 3. Metodología 45
3.1 Análisis el proceso productivo de evaporación de vinaza para identificar las variables presentes en el sistema. 45
3.1.1 Descripción del proceso de evaporación 46
3.2 Diagrama causal 49
3.2.1 Variables exógenas 49
3.2.2 Variables endógenas 50
3.2.3 Explicación del Diagrama Causal 51
3.3 Parámetros 57
3.3.1 Aprovisionamiento de vinaza 58
3.3.2 Producción de evaporación de vinaza 60
3.4 Diagrama de Forrester en STELLA® 71
Capítulo 4. Resultados y discusión 77
4.1 Prueba de consistencia dimensional 77
4.2 Prueba de valores extremos 78
4.3 Prueba de validación estadístico 81
4.4 Resultados 84
4.4.1 Modelo base 85
4.4.2 Indicadores de desempeño 92
Conclusiones 103
Trabajo futuro 106
Referencias bibliográficas 107

Lista de figuras 113

Lista de tablas 115

Lista de gráficas 115

Introducción

En la actualidad, las empresas agroindustriales enfrentan desafíos cada vez más complejos, derivados tanto del incremento en la demanda como de la necesidad de optimizar sus procesos productivos y reducir su impacto ambiental. En particular, la industria del alcohol genera grandes volúmenes de vinaza como subproducto, cuya gestión representa un reto ambiental relevante. Debido a esto, la empresa AL ha desarrollado un nuevo producto derivado de la vinaza, caracterizado por su alto contenido en sólidos y alta densidad. Esta solución no solo ha permitido reducir el impacto ambiental sino también ampliar la oferta a sectores como el industrial y el ganadero, generando oportunidades comerciales adicionales.

No obstante, la creciente demanda de este nuevo producto ha incrementado la exigencia del proceso de evaporación, etapa clave para alcanzar los niveles de densidad requeridos. Actualmente, este proceso opera cerca de su capacidad máxima, lo que implica mantenerlo en funcionamiento continuo para satisfacer la demanda. A esto se suma factores como las variaciones operativas, la falta de control sobre ciertas variables críticas y los paros por mantenimiento, que interrumpen la operación y complican la programación productiva, afectando directamente la capacidad de respuesta de la empresa. Estas condiciones generan incertidumbre sobre el desempeño del sistema y dificulta una gestión eficiente del proceso.

Ante este panorama, se plantea la necesidad de analizar el comportamiento del proceso de evaporación de manera integral, con el fin de entender cómo influyen las distintas variables operativas en la productividad. Para ello, se utilizarán, herramientas de análisis estadístico, orientadas a identificar los factores más relevantes del sistema y se desarrollará un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas que permitirá evaluar su comportamiento bajo distintos escenarios operativos. Este enfoque proporciona una base sólida para la toma de decisiones técnicas orientadas a mejorar la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta ante la demanda del mercado.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un modelo de simulación dinámica que permita analizar y evaluar las variables críticas que afectan la eficiencia en el proceso productivo de la evaporación de vinaza en una empresa agroindustrial, mediante análisis de correlaciones y de regresión lineal, con el fin de identificar áreas de oportunidad y mejorar la toma de decisiones.

Objetivos específicos

- Analizar y comprender el proceso productivo de la evaporación de vinaza para desarrollar de un modelo de simulación efectivo.
- Identificar las variables críticas que afectan la eficiencia del proceso productivo mediante un análisis de regresión, para determinar que variables tienen mayor impacto en la productividad.
- Desarrollar un diagrama causal, así como un diagrama de Forrester, para visualizar las relaciones entre las variables críticas y entender su impacto en el proceso productivo.
- Realizar un análisis de sensibilidad que permita evaluar el impacto de las variables críticas que afectan el proceso productivo.

Generalidades

En este capítulo se presenta la empresa y la problemática que motivó a crear un modelo de simulación con enfoque de Dinámica de Sistemas (DS), en el área de producción de evaporación de vinaza. Por lo cual, se presentan características clave de ciertos procesos logísticos, como el aprovisionamiento y la producción, siendo esta última el centro de la investigación, debido a que es necesario identificar que variables afectan el desempeño de la productividad, lo que justifica el desarrollo del modelo basando en el evaporación de vinaza

Es importante señalar que, por razones de confidencialidad, se ha modificado el nombre de la empresa.

1.1 La empresa AL

La empresa AL, en la cual se realizó el estudio presente, se especializa en destilar melaza extraída de la caña de azúcar para la producción de alcohol, el cual es utilizado en diferentes sectores como bebidas alcohólicas, biocombustible, farmacéuticos, suplementos alimenticios, entre otros.

Fundada en mayo de 2011 en el estado de Veracruz, la empresa AL forma parte integral de un destacado corporativo industrial mexicano. Dicha empresa es líder nacional en la producción de bioenergéticos, desempeñando un papel clave en el impulso de la economía nacional mediante la producción de caña de azúcar. Además, para la empresa preservar el equilibrio medio ambiental es primordial, por lo cual, aspira a convertirse en una cadena de suministro sustentable. En este sentido se encuentra inmersa en un proceso enfocado hacia el aprovechamiento de uno de sus subproductos que es considerado como contaminante para el medio ambiente. La transformación de dicho sub producto es utilizado como suplemento alimenticio y como aditivo en el sector industrial, debido a su alta densidad y su composición de minerales, siendo una opción rentable para ambos sectores.

1.1.1 Misión y visión empresarial

La misión, visión y políticas de calidad de la empresa AL son las siguientes:

MISIÓN

> "Ofrecer productos de calidad aumentando el valor agregado a nuestros clientes y proveedores, además de apoyar a nuestros empleados a formar equipos de trabajo auto dirigidos, productivos y comprometidos con su crecimiento personal y el de nuestra empresa."

VISIÓN

> "Ser una empresa de calidad internacional, líder en el mercado de transformación y comercialización de proteína concentrada, complemento alimenticio y bioenergía, reactivando la producción agrícola y empleando la tecnología de innovación en nuestros procesos."

POLÍTICA DE CALIDAD

> "Es responsabilidad de todo el personal de Fabricación agroindustrial de alimentos satisfacer plenamente los requerimientos y expectativas de nuestros clientes e impulsar una cultura de calidad basada en los principios de Respeto, Innovación y Lealtad, con el compromiso de mejora y seguridad en nuestras operaciones fomentando el valor agregado de nuestra empresa."

1.1.2 Objetivos y valores empresariales

Los objetivos empresariales son los siguientes:

- "Promover el desarrollo integral de nuestros colaboradores."
- "Fomentar el desarrollo agropecuario."
- "Impulsar políticas comprometidas con el medio ambiente y el entorno."
- "Dar certidumbre a nuestros accionistas e inversionistas."

Los valores empresariales son los siguientes:

- "Colaboración."

- "Compromiso."
- "Respeto."
- "Innovación."
- "Lealtad."

1.1.3 Gama de productos

La Empresa AL cuenta con la siguiente gama de productos:

- Alcohol: Es etanol al 96% en volumen, proveniente de la biomasa de la melaza, es uno de los productos principales de la empresa, por su naturaleza es utilizado para crear diferentes productos
- Bioetanol: Es etanol anhidro al 96% en volumen, proveniente de la melaza. Se encuentra dentro de unos de los principales productos de la empresa, siendo un aditivo con 90 octanos, el cual permite un mayor rendimiento en el consumo de combustible.
- Vinaza destilada: Es un subproducto generado a partir de la producción del alcohol proveniente de la melaza, este producto se caracteriza por tener una densidad alta con 60° brix y una composición rica en minerales superiores a la melaza. Inicialmente este producto era exclusivo para el sector ganadero como suplemento alimenticio, sin embargo, debido a su composición de sólidos y su alta densidad, resulta útil para el sector industrial especificadamente en las empresas cementeras.

1.1.4 Cadena de suministro

La cadena de suministro (CS) de la empresa AL se compone de diversos eslabones que interactúan y comparten información entre sí. En el diagrama de la Figura 1.1, se encuentran los proveedores, están clasificados en dos secciones uno de materias primas principales (insumos directos) y el otro en proveedores de materias primas menores (insumos indirectos). El departamento de producción es el eje central de la empresa, mientras que la distribución se encarga de conectar con distintos clientes.

En este capítulo se proporcionará un análisis detallado de los componentes presentados en la Figura 1.1. Es importante mencionar que en esta cadena de suministro se puede observar el flujo de materiales, abarcando el aprovisionamiento de insumos directos e indirectos, donde

la melaza es el principal insumo directo del cual se derivan los productos finales. Por otro lado, los insumos indirectos son aquellos materiales necesarios para llevar a cabo la fermentación de los componentes principales. Cabe señalar que, este proyecto se centra en el análisis del sub producto derivado de la producción del alcohol, la cual consta de evaporar el agua de la vinaza y hacerla más densa.

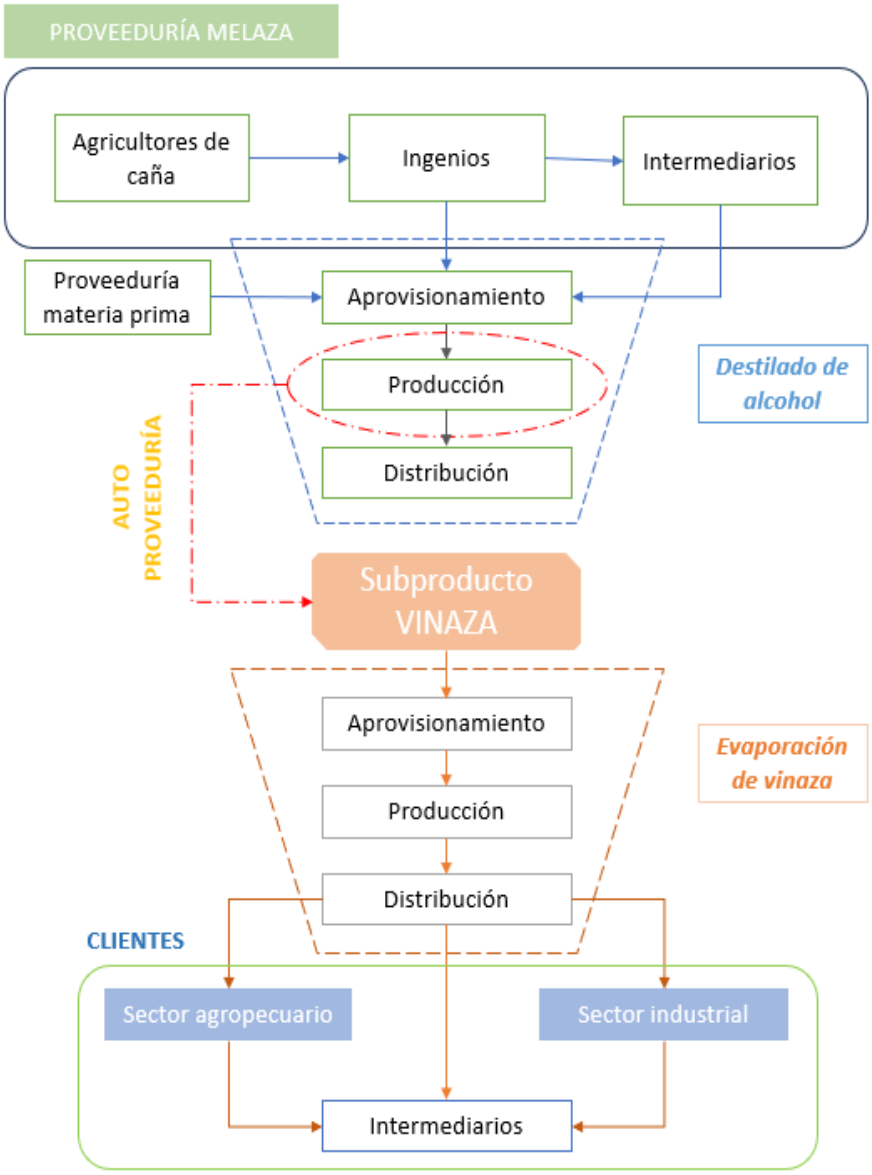


Figura 0.1 Cadena de suministro de la empresa AL
Fuente: (Ramos, 2016)

La Figura 1.2 presenta de manera gráfica la composición de la cadena de suministro de la empresa, destacando la CS asociada al proveedor de melaza, el cual, proviene de ingenios, en donde, se genera como subproducto inherente a su proceso. El proceso de destilar la melaza genera un subproducto llamado vinaza, que es la materia prima del producto de interés, este se distribuye a dos sectores el ganadero y el industrial.

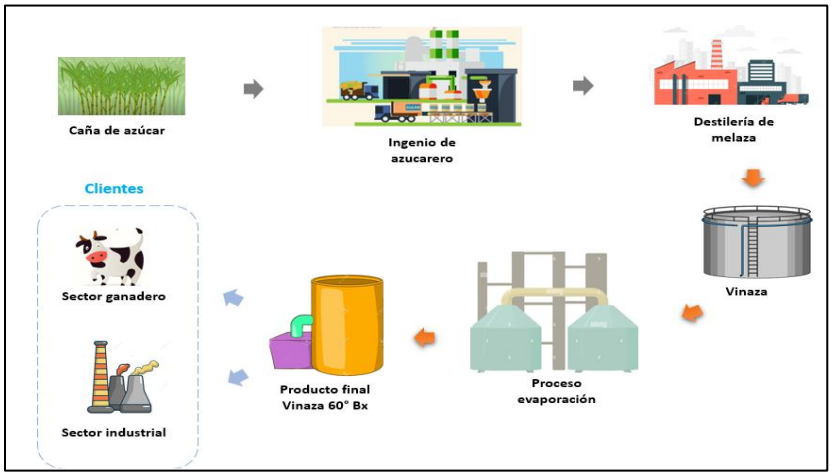


Figura 0.2 Cadena de suministro de la empresa (autoría propia)

1.1.4.1 Melaza

La melaza es el residuo final del proceso de cristalización del azúcar, del cual no es posible extraer más azúcar mediante métodos físicos. Su producción implica la ebullición del jugo de caña de azúcar hasta lograr la evaporación parcial del agua contenida, resultando en un producto meloso semicristalizado (Mangwanda et al., 2021)

Su apariencia se asemeja a la miel de abeja, con un tono oscuro (Figura 1.3). Se caracteriza por ser dulce y agradable, la tonalidad más oscura de la melaza se relaciona directamente con un mayor contenido de sabor y nutrientes.



Figura 0.3 Melaza
Fuente: (CONADESUCA, 2017)

En el mercado internacional, la melaza de caña tiene cuatro destinos básicos:

1. Alimento animal
2. Producción de alcohol
3. Reprocesamiento industrial para extraer el azúcar contenido en ella
4. Producciones industriales como: levadura, ácido cítrico, lisina, entre otros

La melaza de caña de azúcar o miel de caña es un subproducto que no cristaliza en el proceso de obtención del azúcar refinado. Se utiliza principalmente en la industria alcoholera y como alimento de ganado. La melaza es clasificada como un alimento energético que, junto con diversos elementos, como cereales, tubérculos, semillas de oleaginosas, grasas y aceites aportan altos niveles de energía, convirtiéndola en un componente altamente beneficioso en la alimentación del ganado. Por lo tanto, se incorporan de manera precisa en la dieta animal con el propósito de mejorar los nutrientes en los alimentos. FEDNA (2015), afirma que las melazas no solo son una fuente de energía valiosa, sino que también ofrecen un aporte nutricional diversificado que favorece la salud y el rendimiento óptimo del ganado.

La melaza de caña, proveniente principalmente de los ingenios azucareros ubicados en las zonas cañeras. En México, 16 estados son productores de caña de azúcar, al mismo tiempo que se posicionan como generadores clave de melaza. Sin embargo, los principales estados productores son Veracruz (37.5%) y Jalisco (13.1%), aportando el 50.6% de la producción total (CONADESUCA, 2017).

La distribución de ingenios por estado se ilustra en la Figura 1.4, mostrando una concentración significativa en las regiones de centro y Córdoba-Golfo, donde se ubican alrededor de 19 ingenios. Posteriormente, la región del Pacífico alberga 10 ingenios, seguida por el Noreste con 8 ingenios azucareros. En la parte inferior de la escala se encuentran el Sureste con 7 ingenios, así como el Noreste y el Centro del país, ambos con 3 ingenios azucarero.

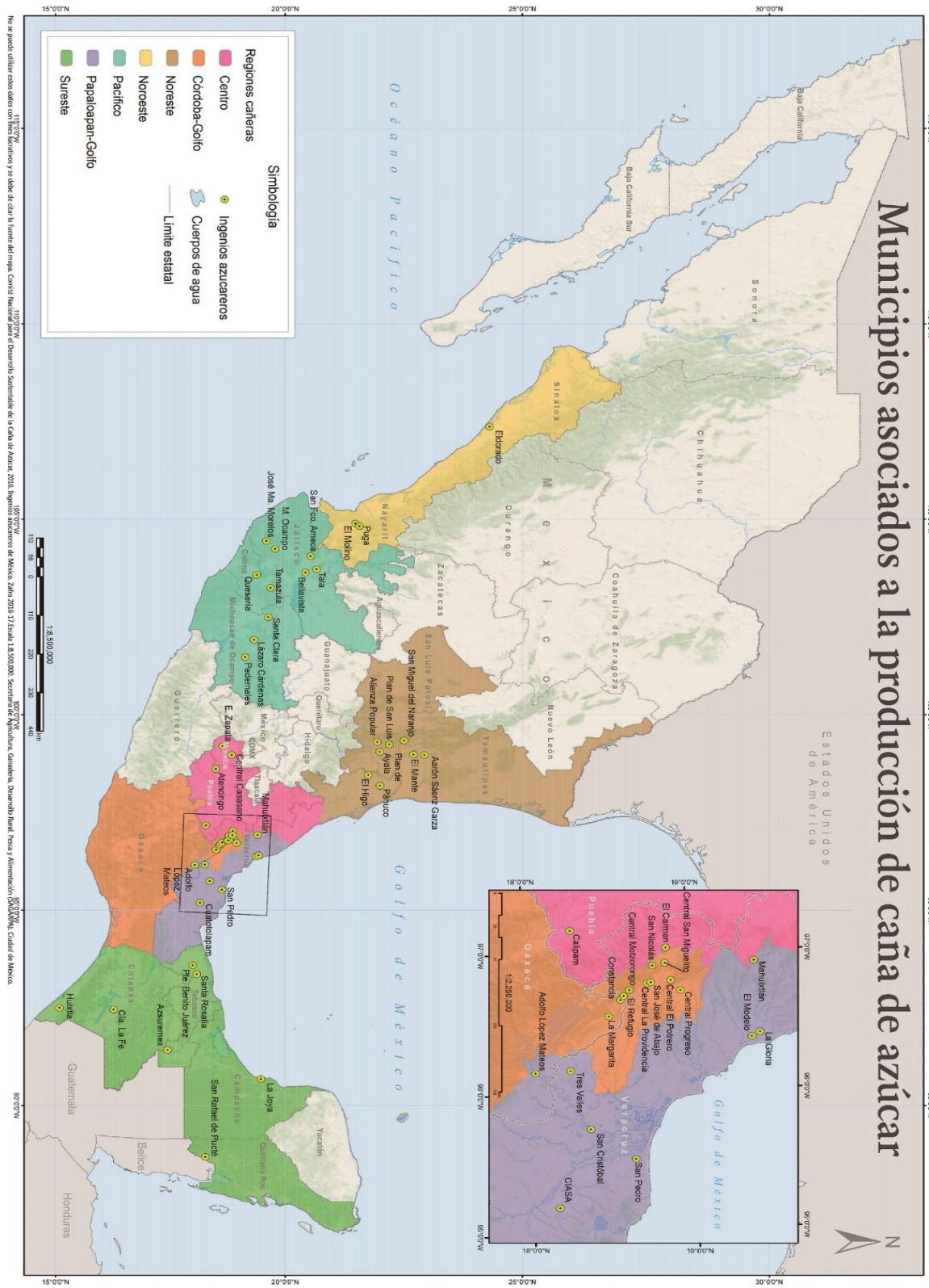


Figura 0.4 Ingenios azucareros en México
Fuente: (CONADESUCA, 2017)

1.1.4.2 Vinaza

La vinaza, proviene de la caña de azúcar, y se genera de la fermentación y destilación de las melazas en el proceso de obtención de alcohol. Es un líquido con tonalidad café, se caracterizan por poseer un bajo pH, un aroma dulce y un alto contenido de materia orgánica tanto disuelta como en suspensión (Ibarra et al., 2018). En la Tabla 1.1 se observa la composición física y química de la vinaza.

Tabla 0.1 Composición física y química de la vinaza

Composición	Indicador %
Brix	13.1
pH	4.1
Nitrógeno total	0.5
Sólidos totales	11.9
Ceniza	3.9
Materia orgánica	7.1
P205	0.014
Ca0	0.57
K20	1.53

Por su composición la vinaza es denominada como un líquido residual de destilerías, lo cual constituye un serio problema para el medio ambiente, ya que, por cada litro de alcohol producido se generan entre 12 y 15 litros de vinaza, lo que constituye una fuente importante de contaminación. En numerosas regiones, la vinaza es desechada sin tratamiento previo en ríos, lagos, presas y canales, generando una contaminación significativa en las fuentes de agua superficial y subterránea, con consecuencias severas para el medio ambiente.

Los impactos ambientales son los siguientes; reducción de luminosidad del agua, disminución de la actividad fotosintética y la concentración de oxígeno disuelto. Este proceso conduce a la eutrofización del agua, propiciando el aumento de poblaciones de insectos y vectores. Como resultado, se fomenta el desarrollo de enfermedades que afectan a la fauna acuática y a los seres humanos (Montiel et al., 2022).

La Universidad Autónoma de Chapingo (2016) menciona que, en una destilería de mediano tamaño que produce diariamente 50,000 litros de alcohol base 96°, se generan diariamente 750 m3 de vinaza, 225.000 m3 en 300 días de un año. Estas cifras reflejan la importancia de

implementar estrategias para el tratamiento y manejo de la vinaza, de lo contrario el volumen acumulado podría ocasionar severos problemas ambientales.

Actualmente existen diversas tecnologías para gestionar y aprovechar las vinazas generadas por una destilería. La elección depende del mercado de cada región, la escala económica de las destilerías y otros factores de índole social o político. Por lo cual, estas tecnologías buscan gestionar de manera eficaz los residuos, adaptándose a las necesidades particulares de cada región y promoviendo prácticas sostenibles en el manejo de estos subproductos industriales.

Según la CONADESUCA (2016) las principales tecnologías son las siguientes:

1. Producción de proteína unicelular, a través de fermentación aeróbica.
2. Producción de gas metano, a través de fermentación anaeróbica
3. Utilización agrícola sustituyendo total o parcialmente las fertilizaciones minerales.
4. Concentración (alrededor de 60° Brix), con las siguientes posibilidades de uso:
    a) Componentes de raciones animales
    b) Empleo de la levadura como fertilizante
    c) Incinerado para producir fertilizante

1.1.5 Procesos logísticos de la empresa AL

En esta sección, se detallan los procesos logísticos de la empresa AL, como lo son el aprovisionamiento de materia prima, la producción actual y la distribución. En el cual, se abordarán de manera general las características principales de dichos procesos.

1.1.5.1 Aprovisionamiento

En este apartado se describen los métodos ultimados para la obtención y gestión de la materia prima tanto de la vinaza como la melaza.

a) Melaza

En la Figura 1.5 se muestra el documento que utiliza la empresa para el aprovisionamiento de la melaza, se realiza mediante dos fuentes principales: los ingenios azucareros y los intermediarios. Se enfatiza que la adquisición directa a los ingenios es más rentable en comparación con la compra a través de intermediarios, sin embargo, los intermediarios no

presentan problemas de disponibilidad del producto. La política actual de aprovisionamiento es implementada de la siguiente manera:

Comprar melaza con un año de anticipación a los ingenios; por ejemplo, la melaza que se generó durante la zafra 2021-2022 se utilizó en la producción del año 2023. Esto es debido a la diversa y alta demanda de la melaza (integrada por la demanda de la industria ganadera, la industria alimenticia y la industria de bioenergéticos), por lo cual se firma un contrato u orden de compraventa, la cual se muestra en la Figura 1.5, para comprometer la melaza de un determinado ingenio. Este proceso asegura la adquisición anticipada y confiable de la melaza necesaria, permitiendo a la empresa gestionar de manera eficiente el suministro. Cabe mencionar que, si los ingenios no pueden satisfacer la demanda de melaza, la empresa acude a un intermediario.



ORDEN DE VENTA

No. Orden de Venta:
Fecha OV:
Num. Cliente:
Plazo de Pago:

COMPRADORA	VENDEDORA

La presente Orden de Venta confiere los terminos y condiciones por medio de los cuales
se obliga a suministrar y La Compradora se obliga a adquirir los siguientes productos

CANTIDAD TON	LUGAR DE ENTREGA	DESCRIPCION Producto/Empaque	VIGENCIA Inicio/Fin	PRECIO USD/TON + IVA	TERMINOS DE ENTREGA	ENTREGAS DE:

CONDICIONES ADICIONALES
Se considera una variabilidad de +/- 5 % en los volúmenes de consumo Las revisiones al cumplimiento en los volúmenes de consumo tendran lugar trimestralmente

La presente Orden de Venta esta sujeta a os terminos y condiciones que en ella se mencionan tanto en el anverso como en el reverso.

FIRMA	FIRMA
COMPRADORA NOMBRE: PUESTO:	VENDEDORA NOMBRE: PUESTO:

Figura 0.5 Ejemplo del formato de una orden de compra-venta de melaza
Fuente: (Chamorro, 2019)

El almacén de la melaza está compuesto de tres fosas de diferentes capacidades. La fosa 1 puede contener 9500 toneladas (Tn), la fosa 2 tiene una capacidad de 24000 Tn y la fosa 3 de 34500 Tn, en la Figura 1.6 se muestra el croquis de las fosas.



Figura 0.6 Fosas de melaza
Fuente: (Chamorro, 2019)

Es importante destacar que la cantidad de melaza recibida está sujeta a la planificación de requerimientos realizada por el departamento de producción. La descarga se encuentra limitada por cuestiones de infraestructura, lo que implica que la empresa puede descargar alrededor de 30 fletes diarios, cada uno con un contenido neto que oscila entre 30 y 40 toneladas. Estos fletes se transportan utilizando vehículos de 5 ejes, y se ajustan a las especificaciones establecidas en la normativa NOM-012-SCT-2-2008.

b) Vinaza

El suministro de vinaza está totalmente vinculado a las operaciones de la empresa, ya que se genera como un subproducto directo en el proceso de destilación de alcohol. Durante la producción, por cada litro de alcohol destilado se obtiene aproximadamente entre 12 y 15 litro de vinaza, lo que implica un volumen significativo de este residuo.

Una vez generada la vinaza, es dirigida a un tanque de almacenamiento de acero inoxidable con capacidad de 768,166 litros diseñado para almacenar grandes volúmenes y preservar su calidad. Este tanque permite monitorear el nivel de llenado y gestionar la cantidad de vinaza entrante.

Por otra parte, cuando la planta de vaporación está en funcionamiento y empieza a utilizar la materia prima, es crucial que el área de producción de alcohol mantenga un ritmo constante para evitar desabastos de vinaza. Por lo tanto, la coordinación entre ambas áreas es esencial para evitar interrupciones en el proceso productivo.

1.1.5.2 Producción

En esta sección se describirá únicamente el proceso de evaporación de vinaza.

El proceso lleva una sola operación continua, que consta de evaporar el agua de la vinaza para hacerlo más denso. Actualmente el área tiene la capacidad de procesar en promedio 36 toneladas (ton) por hora de vinaza con una productividad de producto final de 6 a 8 ton por hora. La producción es mediante ciclos que duran entre 10 a 12 días, parando 3 días por mantenimiento, estos paros son necesarios debido a cambios en los parámetros de producción (temperatura, presión de vacío y vapor) que afectan la eficiencia al transcurrir los días, es decir, mientras más días de operación el control en los parámetros y en la productividad disminuirá.

El producto obtenido se caracteriza por tener al menos 60° brix con una concentración alta en solidos como lo son: proteínas, magnesio, potasio, zinc, calcio, entre otro. Teniendo una aceptación positiva en el mercado alimenticio como el industrial por su composición y aportación. En la Figura 1.7 se tiene un diagrama que representa el proceso de producción.

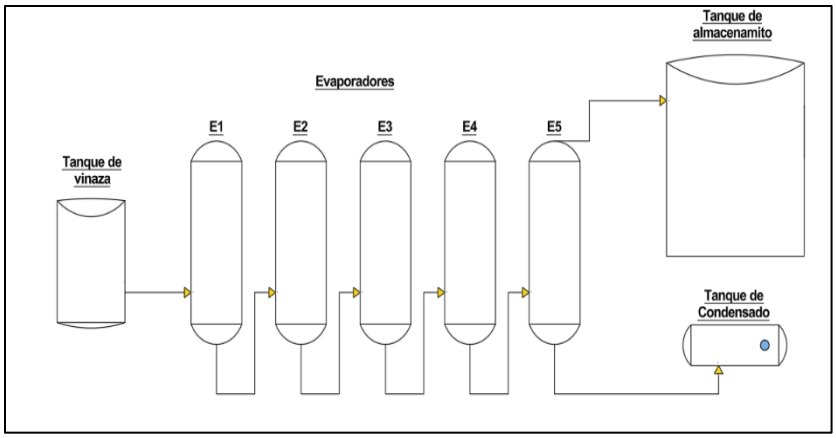


Figura 0.7 Esquema del sistema de evaporación (autora propia)

1.1.5.3 Distribución

La empresa gestiona su distribución de productos mediante servicios de transportes especializados en sustancias químicas, utilizando unidades que cuenten con diversas dimensiones. En la figura 1.8 se muestran los tres tipos de transportes. La pipa de 5 ejes tiene la capacidad de transportar entre 20 a 30 toneladas, seguida de la pipa de 6 ejes que transporta entre 30 a 40 toneladas y por último el full o de 9 ejes que transportar hasta 50 toneladas.

La mercancía envida debe cumplir con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana de 2008 y en el documento Técnico No. 40 sobre transportes de carga del IMP (SCT-IMP, 2008), véase en la Tabla 1.2

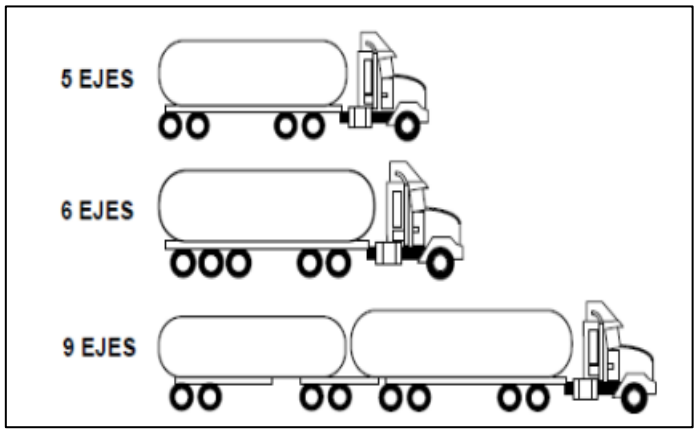


Figura 0.8 Tipos de transportes terrestres
Fuente: (Chamorro, 2019)

Tabla 1.2. Pesos brutos vehiculares en transportes de carga.
Fuente: (NOM, SCT-IMP, 2008)

Unidad	IN en norma	Peso en vacío	Peso bruto máximo
5 ejes	T3-S2	19.9	41.5
6 ejes	T3-S3	19.4	48
9 ejes	T3-S2-R4	30.5	66.5

1.2 Alcances

Para fines de esta investigación, se utiliza la metodología de dinámica de sistemas como para analizar y evaluar los procesos logísticos esenciales que componen la estructura de una cadena de suministro. Este enfoque permite modelar de manera efectiva las interacciones y retroalimentaciones en la cadena de suministro, proporcionando una perspectiva integral y robusta para comprender y mejorar la eficiencia de la CS. Particularmente, se analizará el proceso productivo de la evaporación de vinaza, siendo este un punto clave para la empresa y por el cual se genera incertidumbre asociada a las variables que influyen en el desempeño de la productividad.

En este estudio, se desarrolla un modelo de simulación enfocado exclusivamente en la producción, sin embargo, se consideran los niveles de inventario actuales y el aprovisionamiento de materia prima proveniente del proceso de alcohol, además, el modelo define indicadores de desempeño que permiten evaluar la situación actual del proceso productivo. Asimismo, mediante análisis de sensibilidad, se modificarán variables del sistema con el objetivo de observar su comportamiento e identificar aquellas variables que causan una relación significativa en el desempeño de la productividad.

Es importante resaltar que este trabajo no busca optimizar el proceso productivo, sino identificar y evaluar las variables que afectan la productividad al transcurrir los días operativos, esto es de suma importancia, ya que la demanda actual del producto está superando la productividad.

1.3 Justificación

La empresa AL, ha tenido un crecimiento significativo en la demanda de la vinaza de alta densidad, ha demostrado ser un producto versátil en el mercado, gracias a su alta concentración de solidos totales y su nivel de al menos 60° brix. Aunque este crecimiento ha representado una ventaja competitiva en el mercado, abriendo nuevas oportunidades de negocio y permitiendo una mayor diversificación del producto, también ha generado retos significativos en el proceso productivo, ya que, actualmente la producción apenas logra satisfacer la demanda. Esto deja vulnerable a la empresa ante cualquier disrupción operativa,

lo que compromete la capacidad de cumplir con pedidos pactados o demandas adicionales, afectando negativamente la satisfacción al cliente. Asimismo, la falta de control en los parámetros del proceso ha provocado un consumo excesivo de recursos, incrementando los costos operativos.

Ante esta situación, surge la necesidad de identificar y analizar las variables críticas que influyen directamente en el proceso productivo, con el fin de mejorar la eficiencia y el control operativo sin afectar la calidad del producto ni el servicio al cliente. Este proyecto de investigación se centra en el proceso de evaporación de la vinaza, por lo que, para realizar este análisis es necesario utilizar una herramienta que permita modelar las variables que afectan el desempeño en la productividad sin interrumpir el proceso. Para ello, se utilizará la simulación basada en dinámica de sistemas, una metodología ideal para modelar sistemas no lineales con múltiples interacciones entre variables, proporcionando una visión integral del sistema. Esta simulación estará respaldada por un riguroso análisis estadístico, utilizando correlaciones, regresiones lineales y pronósticos con el fin de aumentar la precisión en la identificación de parámetros claves, brindando mayor confiabilidad en la toma de decisiones y una mayor estabilidad en la producción.

La dinámica de sistemas como herramienta central, ofrece una perspectiva completa del sistema, permitiendo analizar cómo interactúan las variables y cómo impactan en el proceso, desde la gestión de recursos hasta la transformación de la vinaza en un nuevo producto. El análisis sistémico facilitará la identificación de áreas críticas que pueden afectar la eficiencia y la calidad de la evaporación de la vinaza. Además, esta metodología proporcionará una mejor toma de decisiones y brindará estrategias que ayuden a mejorar el desempeño productivo actual, cumpliendo así con los objetivos de la empresa en términos de rentabilidad.

Marco teórico

En esta sección, se describen conceptos teóricos, técnicas y herramientas utilizadas para desarrollar el proyecto de investigación, además, se revisaron trabajos relacionados al proyecto.

De esta manera, se definen conceptos de la cadena de suministro (CS), sus procesos logísticos y su administración. Posteriormente se define el enfoque de la Dinámica de Sistemas (DS), sus uso y características. De igual modo, se definirá el subproducto en cuestión y los métodos de producción utilizados por la empresa. Por último, se presentan trabajos que hacen uso a la DS para modelar la cadena de suministros

2.1 Cadena de suministro

La Cadena de Suministro (CS) es un concepto fundamental en la gestión empresarial, se caracteriza por ser una red de organizaciones y actividades interconectadas que colaboran en conjunto para gestionar el flujo de información y materiales. Diferentes autores han propuesto definiciones de la CS, a continuación, se presenta algunas de ellas:

Atún (2002) define a la cadena de suministros como una serie de procesos relacionados para intercambiar materiales y/o servicios, involucrando un constante flujo de información, que va desde la adquisición de materia prima hasta la entrega de productos terminados al consumidor final.

Según Render y Heizer (2014), la Cadena de suministro coordina todas las actividades, iniciando con las materias primas y finalizando con el consumidor final. En dichas actividades se involucran proveedores, fabricantes, distribuidores, mayoristas y minoristas que ofrecen el producto o servicio al cliente final.

Chase y Jacobs (2018), definen una Cadena de Suministro como los procesos que transportan información y material con destino a los procesos de la organización, proporcionando productos y servicios tanto en el extremo de entrada como en el de salida.

Por lo antes definido, los autores señalan que el objetivo de la CS pretende garantizar el flujo eficiente de materiales, servicios o información desde los proveedores hasta los clientes

finales minimizando costos y tiempo, también buscan incrementando sus estándares de calidad y mejorando sus procesos logísticos para poder asegurar su posicionamiento en el mercado. En esencia la CS se ha convertido en una forma de garantizar competitividad y calidad, convirtiéndose en un indicador que mide el nivel de desempeño. Es importante denotar que la competencia del entorno ya no es exclusiva de las organizaciones, sino también entre las mismas CS (Render & Heizer, 2014).

Para gestionar y optimizar la CS de manera eficiente, modelos como Supply Chain Operations Reference Model (SCOR, por sus siglas en inglés) se han convertido en una herramienta esencial para diagnosticar y mejorar la gestión en la Cadena de suministro. El modelo SCOR, desarrollado por Supply Chain Council, proporciona un marco estandarizado para diagnosticar y mejorar la administración de la CS. Además, su implementación es sencilla sin importar lo complejo del sistema. (Sun & Ni, 2012)

La estructura del modelo de SCOR tiene cinco procesos: planificación, aprovisionamiento, fabricación, entrega y retorno, en donde, se puede gestionar el flujo de materiales e información a lo largo de la CS, desde los proveedores iniciales hasta los consumidores finales, como se observa en la Figura 2.1

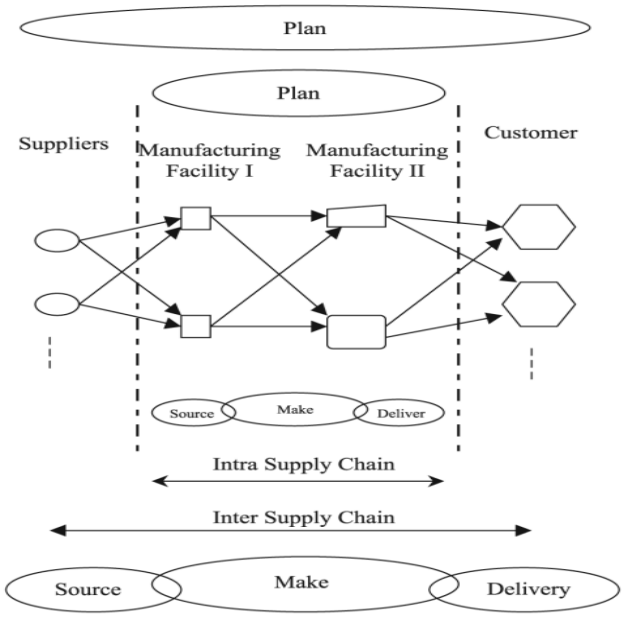


Figura 0.1 Estructura de una cadena de suministro
Fuente: (Sun & Ni, 2012)

El flujo de materiales en una cadena de suministros, comienza en la evaluación de recursos naturales, seguido de la extracción o adquisición de materia prima. Esta materia prima puede pasar por diferentes etapas de producción después se almacena y se distribuye para su consumo final. Por lo que, es importe coordinar y sincronizar la CS, ya que cualquier disrupción en uno de sus eslabones puede afectar negativamente a todo el proceso, generando cuellos de botella y problemas operativos, por lo cual, es importante regular y controlar el flujo del sistema

Dada la importancia de regular y controlar el flujo dentro de la CS, las empresas focales asumen un rol importante para coordinar las actividades entre varios proveedores y distribuidores, como se ve en la Figura 2.2. Una empresa manufacturera depende de diferentes niveles de proveedores; los proveedores de primer nivel suelen ser empresas de subensamblaje, los de segundo nivel entregan piezas más especializadas, mientras que los proveedores de tercer nivel abastecen materias primas o insumos básicos para la producción. Asimismo, por el lado de la distribución, los productos de la empresa llegan a los clientes de primer nivel (mayoristas), posteriormente pasan a clientes de segundo nivel (minoristas) y finalmente a clientes de tercer nivel, que son los consumidores finales (Ivanov & Dolgui, 2019). Esta estructura permite a la empresa mantener un flujo organizado y eficiente a lo largo de los niveles de la cadena de suministro.

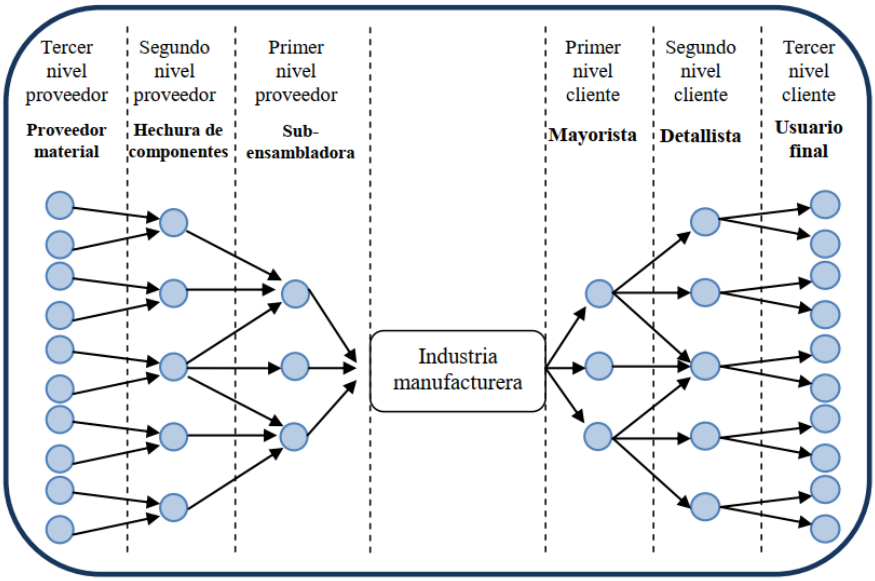


Figura 0.2 Cadena de suministro de una industria manufacturera.
Fuente: Adaptado de (Waters, 2003)

2.1.1 Miembros que componen a la cadena de suministro

Identificar los agentes que componen una cadena de suministro es complejo, ya que la variedad de las organizaciones involucradas en cada etapa del proceso es bastante amplia, que van desde los proveedores de materia primas hasta los clientes finales (KPMG, 2023). Por lo que, enfocarse en miembros críticos que agreguen valor a la CS es esencial para simplificar la estructura y mejorar le eficiencia operativa. Según Rushton et al. (2014) los principales participantes son: proveedores, intermediarios, manufactureros o clientes

Proveedores: Organizaciones o personas que proporcionan materia prima o componentes esenciales para la producción o venta. La relación con los proveedores es fundamental para garantizar la entrega en tiempo y forma.

Intermediarios: Son organizaciones que intervienen en el proceso de comercialización y distribución. Actúan como conexión entre la producción y cliente final, gestionando compras, almacenamiento y operaciones logísticas.

Manufactureros: Transforman la materia prima o componentes en producto finales. Los procesos eficientes son esenciales para mantener para no generar cuellos de botella.

Clientes: Representan la etapa final de la CS y su demanda dicta la producción y las estrategias de distribución. Comprender las necesidades del cliente permite optimizar la CS y garantizar la satisfacción del cliente.

2.1.2 Procesos logísticos

González y Escobar (2021) definen a la logística como el proceso que suma valor a la CS, debido a que es la combinación de gestión de pedidos, inventario, transporte, almacenamiento, manejo de materiales y embalaje integrado en una red de instalaciones. Por lo que, la gestión de la logística tiene un rol importante para la optimización de la interrelación entre los que participan en la CS, ya que conectan los puntos de origen hasta el cliente final.

Por otro lado, Chase y Jacobs (2021) describe los procesos logísticos como actividades que integran la CS, las cuales se componen de cinco procesos esenciales: planeación, aprovisionamiento, producción, distribución y devolución. La adecuada composición y

organización de estos procesos es indispensable para mejorar la eficiencia de las operaciones y la calidad de los productos, lo que permite una mejor comprensión y satisfacción del consumidor final. Sin embargo, Montalvo y Mendoza (2019) sugieren que estas actividades pueden simplificarse, destacando tres procesos logísticos clave: aprovisionamiento, producción y distribución.

En este contexto, la sincronización de estos procesos es fundamental para mejorar la eficiencia operativa la rentabilidad y la competitividad en una CS. Por lo tanto, una correcta coordinación entre las actividades de la logística garantiza que la información y los materiales fluyan con eficiencia a lo largo de la cadena. La Figura 2.3 se muestra la integración de los procesos clave: (1) la conexión de la empresa con su red de proveedores, (2) la gestión interna de la CS que abarca los procesos de aprovisionamiento, producción y distribución, (3) la relación de la empresa con sus clientes.

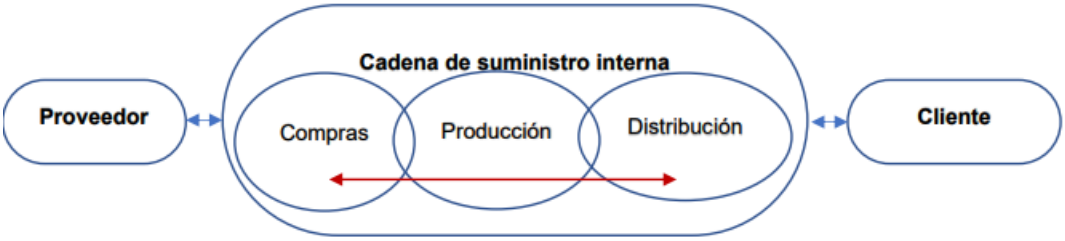


Figura 0.3 Cadena de suministro de una empresa
Fuente: (Chamorro, 2019)

2.1.2.1 Aprovisionamiento

El proceso logístico de aprovisionamiento comprende la adquisición de materiales esenciales para las operaciones de la empresa y su almacenamiento para posteriormente ser transformados en un producto de valor para el cliente. La relación clave en este proceso de aprovisionamiento es la conexión entre proveedor y el comprador, es decir, una coordinación eficiente entre ambas facilitara el intercambio de materia y servicios, además genera beneficios para ambas partes optimizando el flujo de insumos y mejorando la eficiencia en el suministro (Zhao et al., 2017).

Christopher (2016), menciona que los procesos logísticos abarcan tres áreas: gestión de compras, gestión almacenamiento y gestión inventarios

- Gestión de Compras: este proceso implicar la identificación, selección y adquisición de bienes o servicios. Incluye negociación de precios y coordinación de entregas de los bienes adquiridos. Esta etapa es fundamental para mantener la eficiencia de costos y garantizar que se adquiera los materiales correctos en tiempo y forma.
- Gestión de almacenamiento: esta parte se centra en la gestión y diseño de las operaciones del almacén. Además, debe garantizar la utilización optima del espacio, la manipulación correcta de los materiales y el mantenimiento de constante de los materiales. La gestión eficaz del almacenamiento optimiza el flujo de materiales a lo largo de la CS.
- Gestión de inventarios: Implica el seguimiento y el control continuo de los niveles de existencias para garantizar la disponibilidad de los materiales o productos en el momento adecuado. Asimismo, integra funciones de compra y almacenamiento para mantener niveles óptimos de inventario evitando desabastecimiento de materiales, reduciendo los riesgos de desabastecimiento o exceso de existencias, si la gestión de inventarios es eficiente los costos operativos disminuyen significativamente.

Por lo anterior, una coordinación eficiente entre las tres gestiones compras, almacenamiento e inventarios garantiza un mejor control de recursos, lo que impacta directamente en la capacidad de satisfacer la demanda.

2.1.2.2 Producción

La fase de producción es la actividad de transformar la materia prima en producto terminado, dentro de este proceso se contemplan actividades como recepción de materia prima, inventarios, programación, empaquetado, entrega de producto. Además, se define el proceso de producción más adecuado para la empresa. (Montalvo et al., 2019)

Dentro de este proceso logístico es importante gestionar eficientemente el flujo de las mercancías, desde la adquisición de materias primas hasta la entrega del producto terminado. Una manera eficaz de lograrlo es dividirlo en partes más pequeñas y abordar cada una de ellas por separado, esto se utiliza comúnmente para optimizar alguna aparte del proceso más compleja (Chen, 2019).

Para esta etapa la gestión de inventario es muy importante, ya que permite un mejor control en la productividad. Por lo que, seleccionar un sistema de control de inventarios ya sea Push o Pull optimizará la gestión de los materiales y permitirá ajustar la producción de manera que se minimicen los costos y se maximice la productividad.

Un sistema Push anticipa la demanda del cliente y asegura los niveles de inventariaros óptimos. Este método garantiza la disponibilidad del producto, ya que se produce el stock necesario para cumplir con la demanda prevista. No obstante, si este método no está bien controlado puede generar un exceso de existencias y aumentar los costos operativos y de almacenamiento. Un sistema Push como la Planificación de Requerimientos de material (MRP), integra las operaciones financieras y la operación logística esto permite gestionar de manera eficiente la disponibilidad de materias primas cuando sean necesarias

Por otra parte, el sistema Pull funciona con respecto a la demanda real, donde la producción comiza una vez recibido el pedido del cliente para reducir el exceso de inventario y los costos de almacenamiento, pero puede generar retardos si la producción no puede cubrir la demandad. El modelo Justo a tiempo es el más utilizado en un sistema Pull, su objetivo es mantener los niveles de inventario al mínimo reduciendo espacios de almacenamiento para reducir espacios y costos de almacenamiento (Jonsson, & Mattsson, 2016).

2.1.2.3 Distribución

El proceso logístico de distribución debe garantizar que los productos lleguen al cliente final. En esta etapa depende a gran medida la satisfacción del cliente, debido a que es la etapa donde se garantiza la adquisición del producto en tiempo y forma. Esta fase implica la gestión de los eslabones para trasladar los productos terminados desde la fábrica hasta el cliente final (Christopher, 2016).

De acuerdo con Jonsson, & Mattsson (2016), los canales de distribución bien estructurados optimizan el flujo de inventarios y minimiza cuellos de botella, lo que permite mantener un suministro conste de bienes. La red de distribución, no tan solo incluye a mayoristas y minoristas, sino también a organizaciones financieras y servicios logísticos que facilitan la distribución. Estos intermediarios agilizan la distribución y minimizan costos de transporte y almacenaje.

Este proceso logístico es uno de los más complejos dentro de la CS, ya que requiere una planificación y organización eficiente para cumplir con las entregas a tiempo y en forma. Además, la complejidad de la distribución aumenta debido a la necesidad de gestionar tanto a los recursos humanos como los tecnológicos, lo cual, requiere coordinar de manera precisa las rutas de transporte, el control de inventario y puntos de venta, es decir, esta parte del proceso logístico busca mover productos de manera sincronizada y ágil pese a cualquier cambio en la demanda o el entorno.

2.2 Gestión de la cadena de suministro

De acuerdo con Ivanov et al. (2020), la gestión de la CS (Supply Chain Management, SCM) ha evolucionado al integrar avances tecnológicos con las prácticas empresariales, permitiendo optimizar recursos y operaciones, lo cual, genera valor para la empresa como para sus socios comerciales. Por otra parte, Benton (2021) menciona que la SCM debe cumplir con un flujo adecuado de productos e información a lo largo de la cadena para cumplir con las expectativas del consumidor final y su vez garantizar la rentabilidad y la sostenibilidad en un entorno cada día más competitivo.

La SCM también coordina la interacción con proveedores, distribuidores y clientes, cada uno con sus propios intereses. Dichas diferencias de intereses pueden generar desafíos o problemas logísticos que son conocidos como efecto látigo, esta se produce cuando pequeñas variaciones en la demanda del consumidor final genera oscilaciones desproporcionadas en la CS. Lee et al. (2019) señalan que este problema surge porque las organizaciones ajustan sus pedidos en base a proyecciones de la demanda, lo que incrementa las variaciones conforme avanza la producción y la distribución. Para contrarrestar este problema y gestionar de manera eficiente la CS, es necesario que las empresas implementen sistemas de monitoreo y análisis que le permitan adaptarse a los cambios del mercado.

La SCM tiene como objetivo minimizar o eliminar inventarios intermedios que existen dentro de las organizaciones a lo largo de la CS esto se logra mediante el intercambio efectivo de información sobre la demanda y los niveles de inventarios en tiempo real. Este enfoque tiene con fin mejorar el servicio y mejorar la calidad del producto para los clientes.

2.3 Simulación

La simulación surge como una técnica de modelado y análisis s en el campo de la ingeniería y la ciencia. En la década de 1940, John Don Neumann y Estanislao Ulam desarrollaron el método de Monte Carlo. A partir de ahí, la simulación ha evolucionado y su implementación se amplió en diferentes campos, convirtiéndose en una herramienta esencial para la toma de daciones. (Ramos, 2016)

A mediados de la década de 1950, con el desarrollo de sistemas de computación, la simulación comenzó a utilizarse como una herramienta en la investigación de operaciones. Posteriormente en la década de 1970, se implementó el uso de la simulación, debido a la necesidad de mejorar los procesos y sistemas productivos, así como para evaluar diferentes escenarios y estrategias de mejora. (Corréa et al., 2018)

Según Piera et al. (2013), la simulación es una técnica que se utiliza para crear modelos matemáticos, estadísticos o informáticos que representan a un sistema real, permitiendo llevar a cabo experimentos y pruebas en un ambiente controlado, para pronosticar su comportamiento en diferentes situaciones y evaluar diferentes estrategias de mejora.

Díaz (2023), define a la simulación como una técnica que permite analizar y mejorar sistemas mediante la creación de modelos computacionales, dichos modelos deben tener un comportamiento lo más semejante a la realidad.

La simulacion tiene como objetivo representar un modelo de producción real evaluando diferentes escenarios para maximizar la eficiencia y la productividad. Por lo tanto, la simulación es una herramienta clave en el campo de la ingeniería, ya que, con ayuda de análisis estadísticos se puede seleccionar las condiciones ideales del proceso evaluado, con el fin de cumplir con los objetivos establecidos.

La estructura general de simulación se alinea con la formulación del problema, la recolección de datos, la formulación del modelo computarizado, la experimentación y las conclusiones. (Fullana & Urquía, 2009)

A modo de resumen, se enlistan algunas de las ventajas que ofrece el uso de los entornos de simulación (Díaz Z. , 2023).

- Permite estudiar un sistema complejo con un marco de tiempo largo en un menor tiempo.
- Muchos sistemas reales no pueden ser descritos por modelos matemáticos.
- Permite un análisis de variaciones del sistema desde una perspectiva más amplia
- Los simuladores permiten resaltar una realidad específica mediante un modelo matemático.
- Permite estudiar el efecto interactivo de componentes o variables individuales para detectar las más importantes.

Por lo anterior, la simulación es una herramienta útil para la toma de decisiones, ya que, al evaluar diferentes escenarios y analizar el impacto de las variables en el sistema, permite obtener resultados y conclusiones sin afectar el proceso o sistema que se esté evaluando. Sin embargo, es importante señalar que no es una técnica de optimización y que los modelos de simulación son representaciones de un sistema real, que son formados por las variables más representativas.

2.3.1 Clasificación de los modelos de simulación

Los modelos de simulación se clasifican de acuerdo al estado de sus variables, a la función de probabilidad que las define o de acuerdo al comportamiento de su desarrollado. De esta manera, Begoña (2013) clasifica a los modelos simulación de la siguiente forma:

- *Sistemas continuos*: el estado del sistema cambia de forma continua con el tiempo, lo que implica que las variables evolucionan sin interrupciones. Un ejemplo, es el movimiento de un tren por una vía, las variables de estado son posición, velocidad y aceleración. Los sistemas continuos se modelan mediante ecuaciones diferenciales que describen como las variables cambian constantemente.
- *Sistemas discretos:* Las variables de estado cambian en ciertos instantes de tiempo. Estos sistemas son impulsados por eventos que ocurren en momentos particulares, como la atención a clientes atendido por un solo servidor o el inicio de operación de una máquina. Este tipo de simulaciones rastrean cambios a lo largo del tiempo y se utilizan en modelos de colas o de gestión de inventario, ya que los eventos ocurren en intervalos y no continuamente.

De igual manera, los modelos de simulación pueden ser clasificados en base a otros criterios:

Según la evolución del tiempo:

- *Modelo estático:* Las variables del modelo no cambian en el tiempo. Por ejemplo, la distribución de planta de todos los departamentos de producción.
- *Modelos dinámicos:* Las variables del modelo sí cambian en el tiempo. Por ejemplo, todos los modelos de colas.

Según la aleatoriedad

- *Modelo probabilístico:* Contiene variables aleatorias que son definidas por una función de probabilidad. Por ejemplo, la simulación de un banco.
- *Modelo determinístico:* Contiene variables matemáticas que se conocen con certeza. Por ejemplo, la simulación de una línea de ensamble controlada por robots.

La clasificación de los modelos de simulación puede ser un proceso complejo debido sus diferentes tipos y lo complejo que resulta definir sus límites. Es por ello que, se clasifican con respecto al enfoque con los que fueron desarrollados, dicha clasificación se orienta en la metodología y las técnicas utilizadas para desarrollar el modelo. Se clasifica a la simulación de la siguiente forma:

Simulación de Eventos Discretos: En este tipo de simulación, las variables de estado del modelo evolucionan sobre un conjunto discreto de puntos (probablemente aleatorios) del eje de tiempos. Considerando que los flujos temporales entre los puntos del conjunto compiten unos con otros por el uso de los recursos. (Fullana & Urquía, 2009)

Simulación con enfoque de Dinámica de Sistemas: Permite obtener trayectorias para las variables incluidas en cualquier modelo mediante la aplicación de técnicas de integración numérica. (Martínez et al., 2013)

Simulación basada en agentes: Este modelo constituido por agentes que interaccionan entre sí dentro de un entorno para llevar a cabo experimentos virtuales. En este tipo de simulación se incluyen las técnicas de inteligencia artificial, como la lógica difusa y los algoritmos genéticos. (García & Valdecasas, 2011)

Simulación fluidodinámica: En este tipo de simulación se modela numéricamente el comportamiento de sistemas de flujo fluido, transferencia de calor, reacción química y otros fenómenos físicos relacionados.

Para el diseño del modelo que representará al sistema, es esencial contar con un equipo de cómputo que permita al usuario visualizar gráficamente el sistema estudiado, a su vez es necesario para agilizar los cálculos de las funciones de acumulación o ecuaciones diferenciales en el modelo. (Jahangirian et al.,2010)

2.3.2 Etapas en un proyecto de simulación

Para llevar a cabo un estudio de simulación exitoso, es necesario seguir determinados pasos. La metodología propuesta por Díaz (2023), parte de la construcción del modelo conceptual seguido de formulación del problema, fundamentada en la creación del diagrama (causal, de flujo, etc.), donde se muestren los diferentes procesos y variables que facilitaran el modelado en el software. Después de haber convertido el modelo conceptual a una representación computarizada y obtenidos resultados coherentes con la realidad, es importante realizar la verificación y validación del modelo, para asegurar que este correctamente calibrado y que su comportamiento sea consistente a la realidad, para todo esto es necesario realizar pruebas de ancho de intervalo con simulaciones piloto. Consecuentemente se calcula el número de réplicas necesarias para ajustar el modelo de simulación, de tal manera que los resultados obtenidos sean estadísticamente válidos.

Diaz (2023) presenta las principales etapas a seguir para realizar un estudio de simulación, con el objetivo de observar que el proceso general de simulación cumple con la formulación.

a) *Identificación del problema.* Se plantean los objetivos del estudio, las hipótesis básicas que pueden ser asumidas, los parámetros que intervienen, cuáles son las variables de estado del sistema y por tanto del modelo, etc.
b) *Construcción del modelo conceptual del sistema bajo estudio.* Especificación del modelo a partir de las características de los elementos del sistema a estudiar y sus interacciones teniendo en cuenta los objetivos del problema
c) *Recolección de datos y ajuste a una distribución de probabilidad*. Identificar, recoger y analizar los datos necesarios para el estudio.

d) *Construcción del modelo.* Construcción del modelo de simulación partiendo del modelo conceptual y de los datos.
e) *Verificación y validación del modelo computarizado.* Comprobar que el modelo se comporta como es de esperar y que existe la correspondencia adecuada entre el sistema real y el modelo.
f) *Diseño de experimentos.* En función de los objetivos del estudio, desarrollar las estrategias de definición de los escenarios a simular. Experimentar.
g) *Interpretación de resultados.* Analizar los resultados de la simulación con la finalidad de detectar problemas y recomendar mejoras o soluciones.
h) *Documentación.* Consiste en recopilar y mostrar bien la información obtenida de las simulaciones.
i) *Implementación.* Poner en práctica las decisiones efectuadas con el apoyo del estudio de simulación.

2.4 Dinámica de sistemas

Agudelo y López (2018) definen a la Dinámica de Sistemas (DS) como una metodología empleada para simular y analizar sistemas en tiempo real, en donde, el comportamiento de sus variables determina los cambios en el sistema, ya que, dichas variables interactúan entre sí. Por lo que, permite analizar el comportamiento de las relaciones entre diferentes variables que tradicionalmente son difíciles de medir.

La DS facilita observar el comportamiento de un conjunto de variables, sus retroalimentaciones y acumulaciones a través del tiempo. Las interacciones o relaciones causales de dichas variables son fundamentales para entender el comportamiento de un sistema (Forrester, 1992). En la Figura 2.4 se muestran los tipos de sistemas que de acuerdo a Hernández (2016) se puede estudiar mediante DS

Por otra parte, Leo et al. (2020), mencionan que este método utiliza modelos de simulación para estudiar el comportamiento e interacción entre variables de sistemas complejos. Además, permite analizar variables de forma aislada y busca explorar como sus interacciones generan dinámicas complejas que pueden ser difíciles de medir o predecir sin el uso de modelos adecuados.

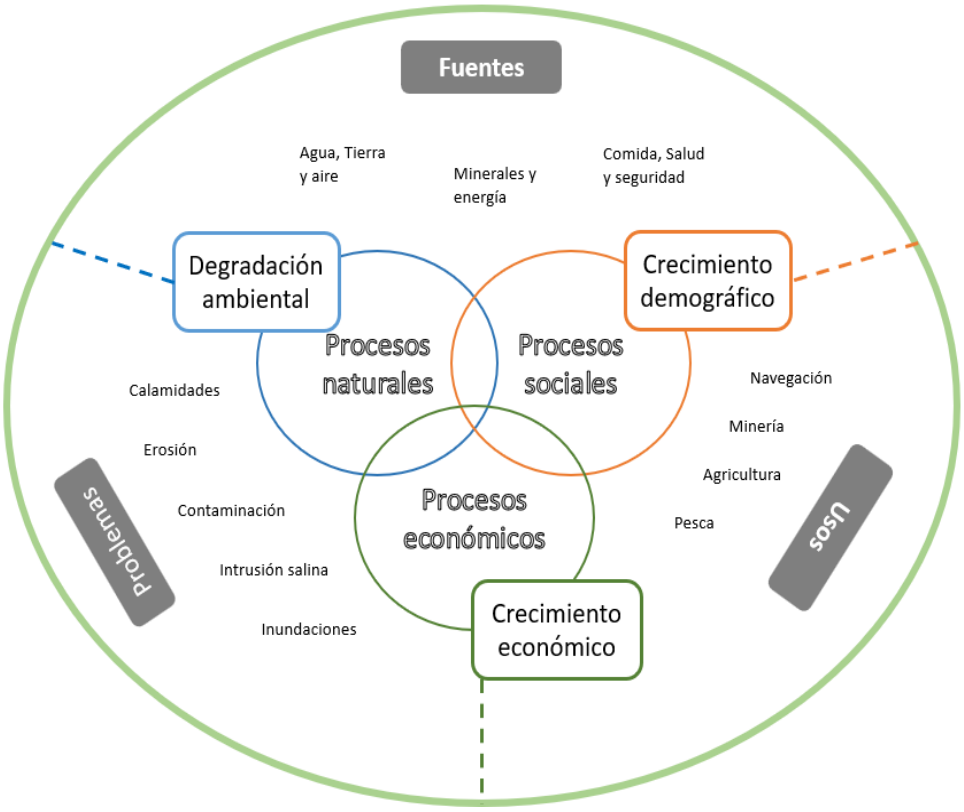


Figura 0.4 Tipos de modelos a estudiar con DS
Fuente: (Ramos, 2016)

Dado que, la estructura de un sistema está definida con la interacción causal entren variables que lo integran, se construye representaciones sistemáticas con flechas y puntos, en el cual se identifican los elementos del sistema y las relaciones de influencia, denominadas como diagramas causales.

2.4.1 Diagramas causales y de Forrester

Martínez et al. (2013) definen a un diagrama causal como una herramienta de modelado y análisis, representado gráficamente mediante nodos y conexiones. Siendo los nodos los elementos del sistema y las conexiones influencias entre los elementos. Además, los diagramas causales se componen de tres tipos de variables; exógenas, endógenas y excluidas.

Las variables exógenas afectan el comportamiento del sistema desde el exterior, por lo tanto, no se pueden controlar, ni estimar su probabilidad de ocurrencia. Por lo contrario, las endógenas afectan el comportamiento del sistema, cambiando dinámicamente dentro de él, asimismo, se pueden controlar a partir de otras variables endógenas o inclusive exógenas.

Mientras que la excluidas no se consideran en la estructura del sistema dinámico, por lo cual, el efecto que generan puede despreciarse (de acuerdo al tipo de estudio).

La estructura del diagrama causal es esencial para determinar las propiedades sistémicas, mediante grafos orientados, en donde, una flecha representa una relación causal entre variables conectadas, dicho vinculo tendrá una polaridad que denota el tipo de influencia, ya sea, con signo positivo o negativo

El signo negativo representa un cambio con efecto contrario, mientras que, el signo positivo figura un cambio de variable origen de la flecha produciendo un cambio del mismo sentido de la variable.

En la Figura 2.5, se observa la estructura básica de un diagrama causal, en donde, la variable A y B hay un vínculo causal de influencia positiva, es decir, si la variable A se incremente la variable B igual, de esta manera, si la variable A disminuye la variable B también lo hará. Por lo contrario, si la variable tuviera una influencia negativa el efecto en B seria inverso, es decir, si la variable A incrementa la B disminuiría, y viceversa, si la A disminuye la variable B aumentaría.

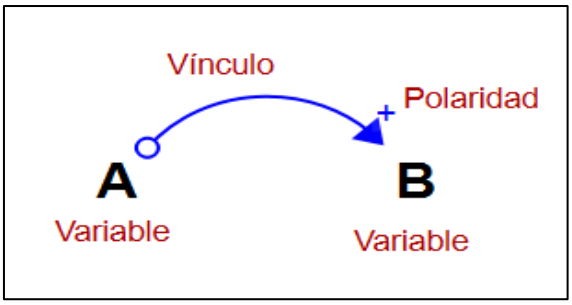


Figura 0.5 Estructura básica de los DC's (autoría propia).

En los modelos de Dinámica de Sistemas existen bucles de retroalimentación, los cuales son cadenas cerradas de relaciones causales, esto ocurre cuando diferentes variables se asocian utilizando la estructura básica del grafo orientado con signo, estos proporcionan una transmisión de información circular de manera continua ya sea de influencia negativa o positiva.

Según Leo et al. (2020), los bucles de retroalimentación negativa tienden a anular perturbaciones externas, actuando como elementos estabilizadores de un sistema. Mientras

que, los bucles de retroalimentación positiva, hacen al modelo inestable al tener elementos de reforzamiento y ser independientes a la situación de partida. Lo antes mencionado, se puede observar en la Figura 2.6.

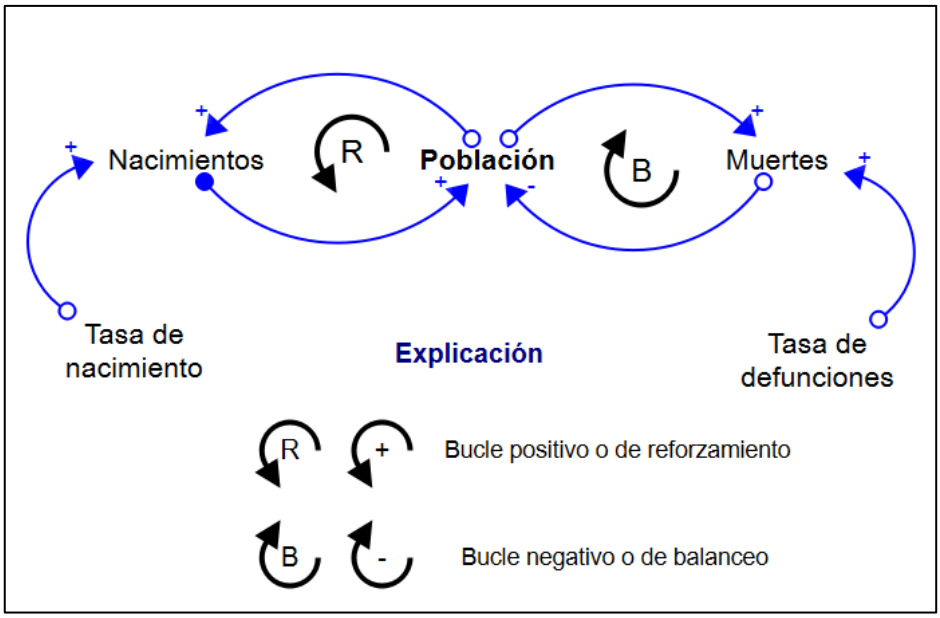


Figura 0.6 Ejemplo de diagrama causal y bucles de retroalimentación (autoría propia)

Una vez construido el diagrama causal se transforma a uno de Forrester, el cual es una representación de las variables de nivel, flujo y auxiliares, este constituye un punto intermedio entre el diagrama causal y el sistema de ecuaciones diferenciales. Las variables de nivel son las más significativas, se definen como magnitudes que acumulan resultados. Asociada a estas se encuentran las variables de flujo que expresan como se convierte la información del sistema en una acción. Por último, las variables auxiliares, las cuales, representan pasos en donde se descompone el cálculo de una variable de flujo, a partir de los valores tomados por niveles.

En la Figura 2.7 se muestra la representación del diagrama de Forrester, desarrollado a partir del diagrama causal de la Figura 2.6, el cual representa el modelo de un sistema poblacional.

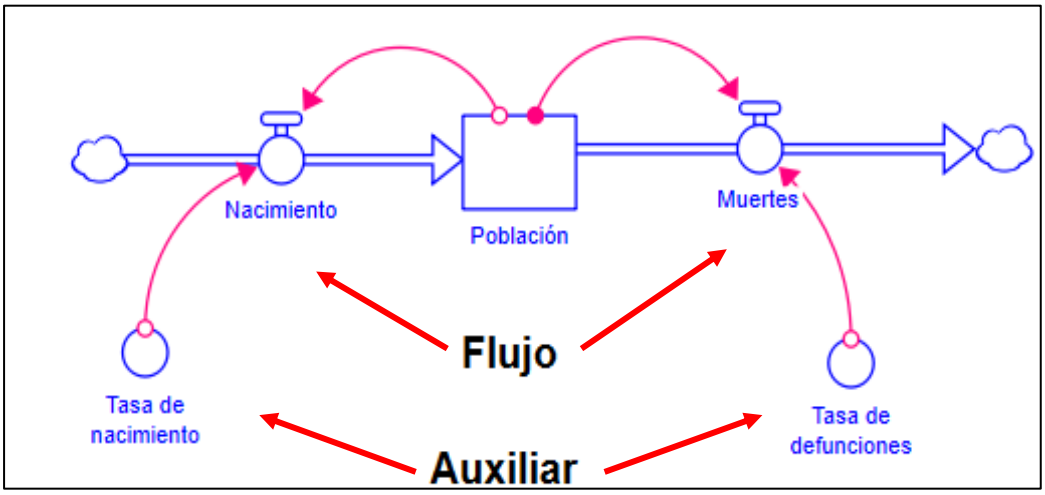


Figura 0.7 Representación gráfica de las variables en un diagrama de Forrester (autoría propia)

2.4.2 Modelización

Después de la primera fase cualitativa de análisis causal, sigue la fase de modelización. Debido a que el objetivo primario de la técnica de dinámica de sistemas es conocer la evolución de un sistema, la fase de formalización matemática es una etapa importante del análisis. En consecuencia, se recomiendan tres etapas para la modelización

Recalcando que posterior a la fase cualitativa del análisis causal, procede la fase de modelización. Considerando el objetivo de la Dinámica de Sistemas, la cual es conocer la evolución del sistema estudiado, la fase de modelización matemática es una parte fundamental para el análisis. (Agudelo & López, 2018)

A manera de resumen, Cedillo & Sánchez (2008) proponen el desarrollo de modelos de simulación con las siguientes fases: 1) conceptualización, 2) formulación, 3) evaluación y 4) implementación.

Primera fase: Conceptualización

- Definir el propósito del modelo: define la razón por la cual se realizará el análisis.
- Identificar las variables críticas y los límites del modelo: se identifican variables que influyen en el modelo y se definen alcances.
- Establecer el horizonte de tiempo: Basándose en la definición del propósito, se debe establecer el tiempo durante el cual se evaluará el sistema mediante el modelo.

- Establecer las relaciones entre las variables: Es necesario distinguir el tipo de influencia causal que presentan las variables del modelo.
- Desarrollar el DC: Utilizando grafos orientados se estructura el DC, y se identifican los bucles de retroalimentación.

Segunda fase: Formulación

- Desarrollar el DF o FSD: El DC se transforma en un DF, haciendo uso de un programa de simulación; las variables endógenas se trasforman en flujos y niveles, y las exógenas en variables auxiliares.
- Determinar las ecuaciones matemáticas del modelo: Se pueden determinar las ecuaciones diferenciadas en el tiempo, que rigen el modelo de simulación.
- Estimar y seleccionar los parámetros del modelo: Es necesario contar con información para iniciar la simulación, por lo cual, será necesario definir parámetros estadísticos, probabilidades de ocurrencia, funciones de probabilidad y valores determinísticos que definan con precisión el comportamiento de una variable.

Tercera fase: Evaluación

- Simular el modelo y probar las relaciones del DC: Esto se refiere a la validación y verificación del modelo, para tal tarea existen un conjunto de técnicas que pueden ser utilizadas; una de las pruebas más utilizadas es la de condiciones extremas.
- Probar el modelo bajo diferentes supuestos: Probar las condiciones actuales del sistema, o modificar alguna variable de la cual se piensa que modifica el desempeño del sistema significativamente (hipótesis dinámica).
- Respuesta del modelo con análisis de sensibilidad: Se realiza un análisis de sensibilidad con diferentes variables, que a su vez definan un conjunto determinado de políticas (posibles a implementar en el sistema), y de esa forma observar y documentar los resultados que el modelo arroja.

Cuarta fase. Implementación

- Presentar el modelo en una forma accesible al usuario: Debe presentarse de tal manera que cualquier persona sin conocimientos en DS pueda utilizarlo y obtener información útil.
- Observar el comportamiento del modelo bajo diferentes políticas: El modelo final y accesible, dará a conocer el comportamiento a futuro de las políticas que se le alimenten, convirtiéndose en una herramienta diaria para la planeación táctica y operacional.

La simulación del modelo de este trabajo se llevará a cabo con el programa STELLA ARCHITECT®, desarrollado por Isee Systems; el cual permite modelar y simular sistemas complejos de forma dinámica

2.5 Vinaza

Reis et al. (2019), definen a la vinaza como un subproducto liquido generado principalmente en la producción de bioetanol o alcohol. Se compone por solidos disueltos como proteínas, carbohidratos y sales minales (magnesio, calcio y potasio), por su composición y su carga orgánica se le considera como un agente altamente contaminante para el medio ambiente en general. Debido a que México se ha consolidado como uno de los productores principales de bioetanol, con una producción anual de aproximadamente 400 millones de litros destinados que se comercializan tanto nacional como internacionalmente (INEGI, 2020). En este contexto, la vinaza ha generado preocupaciones ambientales ya que por cada litro de alcohol producido se generan entre 10 a 15 litros de vinaza.

En los últimos años México ha minimizado el impacto de las vinazas mediante estrategias de reutilización y en algunos casos particulares transformándolo en un nuevo producto, se ha utilizado como fertilizantes y también como aditivos tanto para el sector industrial como para el ganadero. La reutilización de la vinaza ha contribuido a la economía circular, reduciendo la contaminación y aprovechando los sub productos para generar valor agregado. (Díaz & Mahdi, 2023)

El creciente esfuerzo por reducir el impacto de estas aguas residuales ha generado diferentes métodos para reutilizar la vinaza, impulsando la investigación en la tecnología que permita aprovechar la composición del subproducto de manera más eficiente, siendo la evaporación uno de los procesos clave, ya que, mediante este proceso, es posible concentrar la vinaza eliminando el exceso de agua y obteniendo un producto más denso con mayor valor agregado.

2.5.1 Métodos de evaporación

Los métodos de evaporación son fundamentales en la concentración de diferentes productos, ya que permiten eliminar un gran porcentaje de agua y concentrar los sólidos disueltos, facilitando el manejo de residuos o subproductos. Este proceso no tan solo reduce costos logísticos, sino también facilita su reutilización como suplemento alimenticio y como aditivo para sectores industriales.

Según Somchart (2020), el proceso de evaporación permite reducir hasta un 90% del volumen original, concentrando sus componentes más valiosos (proteína, magnesio y potasio). Los métodos más utilizados en la evaporación para el tratamiento de la vinaza son los de película descendente y de película ascendente, dichos métodos son los adecuados para manipular líquidos con diferentes niveles de viscosidad y solidos suspendido, permitiendo un proceso más eficiente.

2.5.1.1 Evaporación película descendente

Según Geankoplis (2003), el método de evaporación de película descendente es el más utilizado por la industria debido a su alta eficiencia en la concentración de líquidos sensibles al calor, como: jugos, productos lácteos, y subproductos generados a partir de otro proceso, en este método, el líquido fluye como una película delgada que desciende a lo largo de la superficie interna de tubos verticales debido a la gravedad (no utiliza algún motor que lo impulse). El calor se suministra a través del vapor (energía) en el exterior de los tubos, cabe mencionar que los líquidos que transfieren calor nunca tienen contacto con los líquidos que reciben el calor. Esto provoca la evaporación del agua y permite concentrar los sólidos disueltos. En la Figura 2.8 se puede observar el equipo de evaporación de película descendente.

Andrey et al (2021), menciona que el método de película descendente al vacío es ampliamente utilizado en la industria de productos lácteos, no obstante, pude escalar a cualquier otro producto, este método permite reducir volúmenes importantes de producto y eliminar cantidades significativas de agua, sin degradación terminada de la materia prima. Operar con una presión baja, disminuye el punto de ebullición de los líquidos y no pierde propiedades químicas que afecten la calidad del producto, a su vez, permite al sistema evaporar a bajas temperaturas a comparación de métodos tradicionales. Otro beneficio es la reducción de consumo energético, ya que el tiempo de evaporación reduce considerablemente.

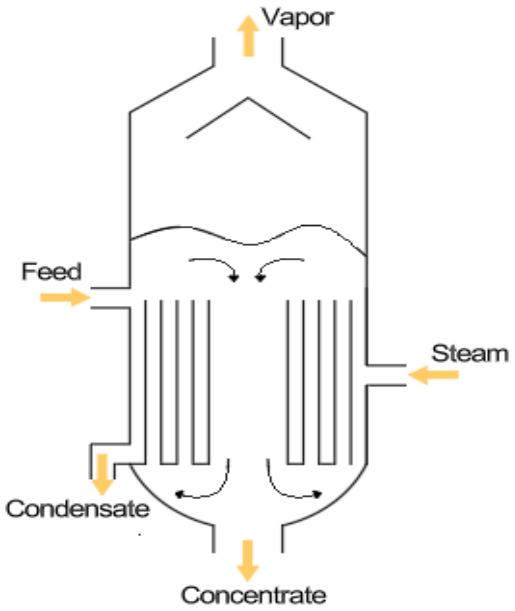


Figura 0.8 Sistema de evaporación de película descendente
Fuente: (Geankoplis, 2003)

2.5.1.2 Evaporación película ascendente

Los evaporadores de película ascendente son ampliamente utilizados en proceso de líquidos con viscosidad alta. Este equipo está conformado por tubos por los que circula el líquido de forma ascendente, existen diferentes métodos de recircular el fluido, una de ellas es con motores que impulsan el fluido hacia arriba y otra que consiste en diferencias de temperaturas entre el producto y el vapor, dicha diferencia debe ser de al menos 14°C. este método es ideal para procesar soluciones alimenticias que ya fueron expuestas a altas temperaturas y que su composición fue alterada. Por esta razón los evaporadores que operan al vacío son una mejora

opción ya que reducen el tiempo de exposición a altas temperaturas disminuyendo el riesgo de daño térmico (Guachamin, 2023). En la Figura 2.9, se pude observa el sistema de evaporación de película ascendente.

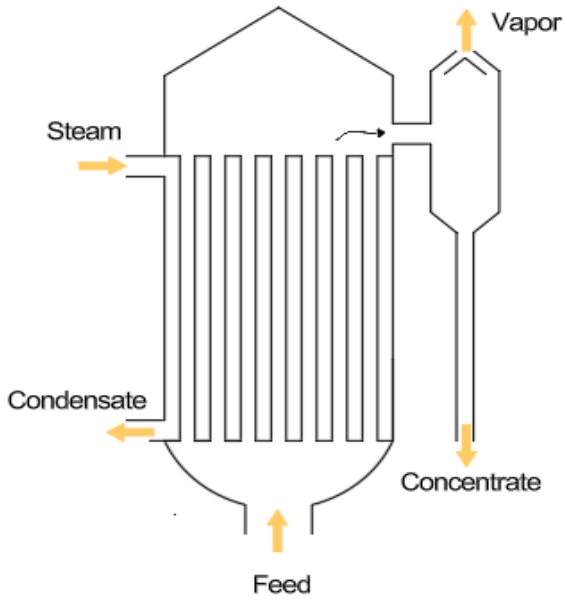


Figura 0.9 Sistema de evaporación de película ascendente
Fuente: (Geankoplis, 2003)

2.6 Estado del arte

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, se consultaron diferentes fuentes de información con metodologías o casos similares a la que se presenta la tesis, en general, utilizando la Dinámica de Sistemas como técnica principal para evaluar el comportamiento de las variables y análisis estadísticos, esto se puede observar en la Tabla 2.1.

Tabla 0.1 Estado del arte (Autoría propia)

Título y año del artículo	Autores y revista	Objetivo	Resultados	Metodología
Environmental Simulation Model Using System Dynamics to Estimate Air Pollution: A Case Study of Mexico City Metropolitan Area (2024)	Godínez H., Miranda A., Lezama M. & Ramirez A. (Sustainability)	Desarrollar un modelo de simulación ambiental basado en la DS para estimar niveles de contaminación del aire en la Ciudad de México	El uso de análisis de sensibilidad y validación estadística hicieron al modelo más robusto asegurando que las políticas propuestas pudieran adaptarse en diferentes escenarios. Por otra parte, el modelo estimo una reducción de contaminante menores a las esperadas por el gobierno.	Dinámica de sistemas Promedios móviles Pronósticos Análisis de sensibilidad
Industrial Process Management Model to Improve Productivity and Reduce Waste (2024)	Ortiz C., Quezada L. & Oddershede A. (Sustainability)	Desarrollar un modelo de gestión de proceso industriales utilizando DS para mejorar la productividad y reducir desperdicios	La implementación de la DS facilito la comprensión y generación de planes de acción preventivos y correctivo, esto mediante el diseño de un sistema de comunicación integrado que	Dinámica de sistemas Lean manufacturing Evolución de datos históricos

			comprende niveles operativos, tácticos y estratégicos en la empresa, agilizando los procesos y la toma de decisiones	
Progress of Optimization in Manufacturing Industries and Energy System (2024)	Zhang D., Yang Q., & Yuwen Y. (Processes)	Desarrollar un enfoque integral que combine la simulación y análisis estadístico como la regresión lineal para identificar variables clave que afectan la productividad en un proceso industrial	La investigación permitió identificar y ajustar las variables clave del proceso, además, logro aumentar el 12% de la productividad. Por otra parte, se mejoró el proceso reduciendo recurso que afectaban la productividad	Simulación dinámica Regresión lineal.
Design and Development of a Mathematical Model for an Industrial Process, in a System Dynamics Environment (2022)	Barrios M., Baeza R., & Bianchetti M. (Applied sciences)	Desarrollar un modelo matemático para mejorar la eficiencia operativa de un proceso industrial mediante validación analítica en un entorno dinámico	El modelo permitió identificar cuellos de botella y mejorar las variables críticas del proceso, reduciendo el tiempo muerto de los procesos operativos. Con ello se lograron estandarizar procesos y se mejoró la respuesta a variaciones en el sistema	Dinámica de sistemas Función de transferencias
Development of a System	Gallego S. García, M.,	Desarrollar un modelo	El modelo permitió a la organización	Dinámica de sistemas

Dynamics Simulation for Assessing Manufacturing Systems Based on the Digital Twin Concept (2022)	Gajo J. & Reschke J. (Applied sciences)	integral para simulación dinámica que permita optimizar el control de calidad, la productividad y el mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de los activos industriales	monitorear de manera efectiva los flujos y aplicar estrategias optimas de calidad y mantenimiento. También obtuvieron mejorar significativas en la rentabilidad y los niveles de servicio al cliente, ya que, sus KPI se elevaron después de la implementación del modelo	Lean manufacturing Mantenimiento productivo total
A System Dynamics Modeling Support System Based on Computational Intelligence (2019)	Hassan A., & Kamran S. (Systems)	Desarrollar un sistema de soporte de modelación de dinámica de sistemas que aproveche técnicas de inteligencia artificial (IA) para automatizar modelos complejos	El sistema facilito la creación de diagramas causales, de stock y de flujo, así como una mejor interpretación de los parámetros del sistema real. El modelo genero series de tiempo semejantes a los del sistema real esto permitió responder efectivamente al momento de ingresar grandes cantidades de información, anteriormente esto era imposible.	Dinámica de sistemas. Simulación de monte Carlo Algoritmos de programación genética Optimización por temple simulado

Application of Linear Regression for Evaluation of Production Processes Effectiveness (2019)	Borucka A., Grzelak M., & Guzanek P (Applied sciences)	Evaluar la efectividad de los procesos de producción mediante el uso de análisis de regresión lineal para optimizar un proceso productivo	El análisis de regresión lineal permitió identificar las relaciones críticas entre variable. Logrando mejorar la predicción en la capacidad de producir, también redujeron los tiempos muertos en un 10% y aumentaron la eficiencia operativa en un 12% según sus indicadores.	Análisis de regresión lineal y de correlación Modelos predictivos Simulación discreta
Performance Analysis of Evaporation System in Sugar Industry Using RAMD Analysis (2019)	Saini M. & Kumar A. (Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering)	Analizar el rendimiento del sistema de evaporación en la industria azucarera utilizando un enfoque de análisis de confiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y dependencia (RAMD) para mejorar la eficiencia energética	El estudio identifico los subsistemas más sensibles dentro del sistema de evaporación que afectaban el rendimiento energético (vapor), esto permitió mejorar los tiempos de operación y reducir paros por fallas. Gracias estas mejoras los costos disminuyeron significativamente.	Análisis RAMD Diagrama de transición de estados Simulación de escenarios Modelo de ecuaciones Chapman-Kolmogorov
System Dynamics: Modelling and	Bilash K., Fatima M., & Mohd K. (Springer)	Proporcionar un enfoque integral para modelar y	La investigación logro identificar bucles de retroalimentación	Dinámica de sistemas Diagramas de flujo

Simulation (2017)		simular sistemas dinámicos que utilice técnicas de diagramas causales para analizar interacciones entre múltiples variables en sectores agrícolas	clave que permitieron estudiar la CS con una mayor precisión. El desarrollo del modelo permitió mejorar la compresión y la toma de decisiones mejorando la gestión de recursos en la CS.	Análisis de sensibilidad
Modelling and Control of Dynamic Systems Using Gaussian Process Models (2016)	Kocijan J. (Springer)	Aplicar modelo de proceso gaussianos en la identificación y control de sistemas dinámicos en industrias de separación de gas-liquido	El proceso gaussiano permitió interpretar y mejorar las predicciones sobre el comportamiento del sistema, lo que llevo a una optimización en el control del proceso real, especialmente en el modelo de separación de gas-líquido, obteniendo resultados de mejora del 18% reduciendo significativamente los erros de deviaciones estándar.	Procesos gaussianos Simulación Dinámica de sistemas

Metodología

En este capítulo, se detalla la metodología que se utiliza para analizar y evaluar, el proceso productivo de la evaporación de vinaza, mediante la implementación de herramientas y técnicas de ingeniería industrial como la dinámica de sistemas y enfoques de evaluación multicriterio, con el fin de dar solución a temas de interés para la empresa. A continuación, se describen las actividades realizadas para el desarrollo del proyecto.

- Analizar el proceso productivo de evaporación de vinaza para identificar las variables presentes en el sistema.
- Identificar las variables críticas que afectan la eficiencia del proceso productivo mediante un análisis estadístico para determinar cuales tienen mayor impacto en la productividad.
- Desarrollar un diagrama causal para visualizar la interacción entre las variables más importantes.
- Crear un diagrama de Forrester para simular el comportamiento dinámico del sistema y evaluar su impacto en la eficiencia operativa.
- Realizar un modelo de simulación del proceso de evaporación de vinaza basado en el diagrama de Forrester, con el fin de analizar el comportamiento del sistema en diferentes escenarios.
- Realizar un análisis de sensibilidad que permita evaluar el impacto de las variables críticas que afectan el proceso productivo

3.1 Análisis del proceso productivo de evaporación de vinaza para identificar las variables presentes en el sistema.

En esta sección se realiza un análisis detallado del proceso productivo de evaporación de vinaza con el propósito de identificar las principales variables involucradas en su operación. Para ello, se describe el funcionamiento general del sistema, incluyendo la configuración de los equipos las condiciones de operación, los flujos de materia y energía, así como los factores que afectan la eficiencia del proceso.

El objetivo es tener una visión integral del sistema, resaltando los parámetros físicos y técnicos que afectan el comportamiento del proceso. Esto servirá como base para comprender las dinámicas del sistema y su relación con la productividad, permitiendo el desarrollar del modelo de simulación y el análisis de escenarios.

3.1.1 Descripción del proceso de evaporación

El proceso se lleva a cabo de manera continua, con el objetivo aumentar la densidad (grados brix) de la vinaza mediante la eliminación de agua, lo que resulta en un producto más concentrado. Actualmente el área opera las 24 horas del día, durante 10 días consecutivos, con paros de 2 a 3 días para mantenimiento. Durante el ciclo operativo, la composición química de la vinaza genera incrustaciones que se adhieren a los equipos, reduciendo la eficiencia del sistema debido a la disminución en la transferencia de calor. Por esta razón, el mantenimiento es fundamental para limpiar lo evaporadores y restablecer las condiciones óptimas de operación

El sistema de evaporación consta de cinco evaporadores con su respectivo contenedor o separador, cuatro de ellos son de película descendente, donde la vinaza fluye por gravedad y uno de tiro forzado o de película ascendente, el cual la vinaza fluye hacia arriba con la ayuda de una bomba. Cada evaporador está equipado con una bomba que facilita la administrar y recircular la vinaza.

La función de los evaporadores es intercambiar o aumentar calor mediante fluidos a través de sus paredes sin que estos entren en contacto(Jaramillo, 2007). En este caso, el fluido que cede calor es el vapor de calderas con una temperatura promedio de 120 °C.

El proceso es llevado a cabo en un sistema de alineado de cinco efectos, donde la vinaza y el vapor fluyen consecutivamente del efecto 1 al 5, lo que maximiza la eficiencia energética y permite alcanzar los grados brix requeridos, ya que, la vinaza gana densidad por cada efecto que pasa. Cabe mencionar que el vapor de calderas es suministrado directamente al efecto 1 y 5 debido a la necesidad de aumentar el calor en la etapa inicial y final del sistema, mientras que en el efecto 2, 3 y 4 el vapor es generado en los separadores mediante condensación del mismo proceso. Una vez utilizado el vapor se recircula a tanques de condensados y

posteriormente se distribuye a diferentes áreas de la planta. El esquema de los evaporadores se puede observar en la Figura 3.1.

Para iniciar un ciclo de producción el área debe controlar ciertos parámetros, los cuales son: la temperatura, la presión de vacío, disponibilidad de vinaza, vapor de calderas disponible, bombas funcionando y alineación de tuberías. Una vez asegurados estos aspectos el ciclo comienza con el llenado de vinaza en lo separadores y la extracción de aire en los equipos mediante bombas de vacío para tener un punto de ebullición más bajo. Una vez, controlados los parámetros el área comienza con la recirculación de la vinaza en los evaporadores y la gestión de vapor de calderas, la cantidad de vapor inicial es de 10 toneladas e incrementa según lo requieran los equipos.

El proceso de evaporación se realiza mediante presión al vacío, esto permite reducir el punto de ebullición, mejorando el uso de energía (vapor) y protegiendo los componentes de la vinaza ante la degradación térmica (Saini & Kumar, 2019). En condiciones ideales, el sistema opera con un punto de ebullición de entre 70°C y 75 °C, a una presión de 0.40 bares. Sin embargo; a medida que pasan los días y el sistema pierde vacío, la presión aumenta alcanzando los 0.88 bares y en casos extremos 1.00 bar de presión, esto eleva el punto de ebullición a los 98°C, afectando negativamente la productividad y la eficiencia del proceso. Cabe mencionar que la presión de vacío disminuye por la generación de incrustación en las tuberías. Además, las incrustaciones también afectan la transferencia de calor haciendo más difícil alcanzar los grados brix requeridos.

Actualmente los equipos permiten un flujo constante de vinaza de 43 m^3 por hora, con un suministro de vapor de entre 13 a 15 toneladas por hora, lo que resulta en una producción de 8 toneladas por hora de producto final en condiciones ideales. Dicho producto tiene una densidad promedio de 1.2957 gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) y al menos 60° Brix, así mismo, contiene 53% de sólidos totales, entre los que incluye: magnesio, proteína, minerales, azufre, aminoácidos, calcio, entre otros.

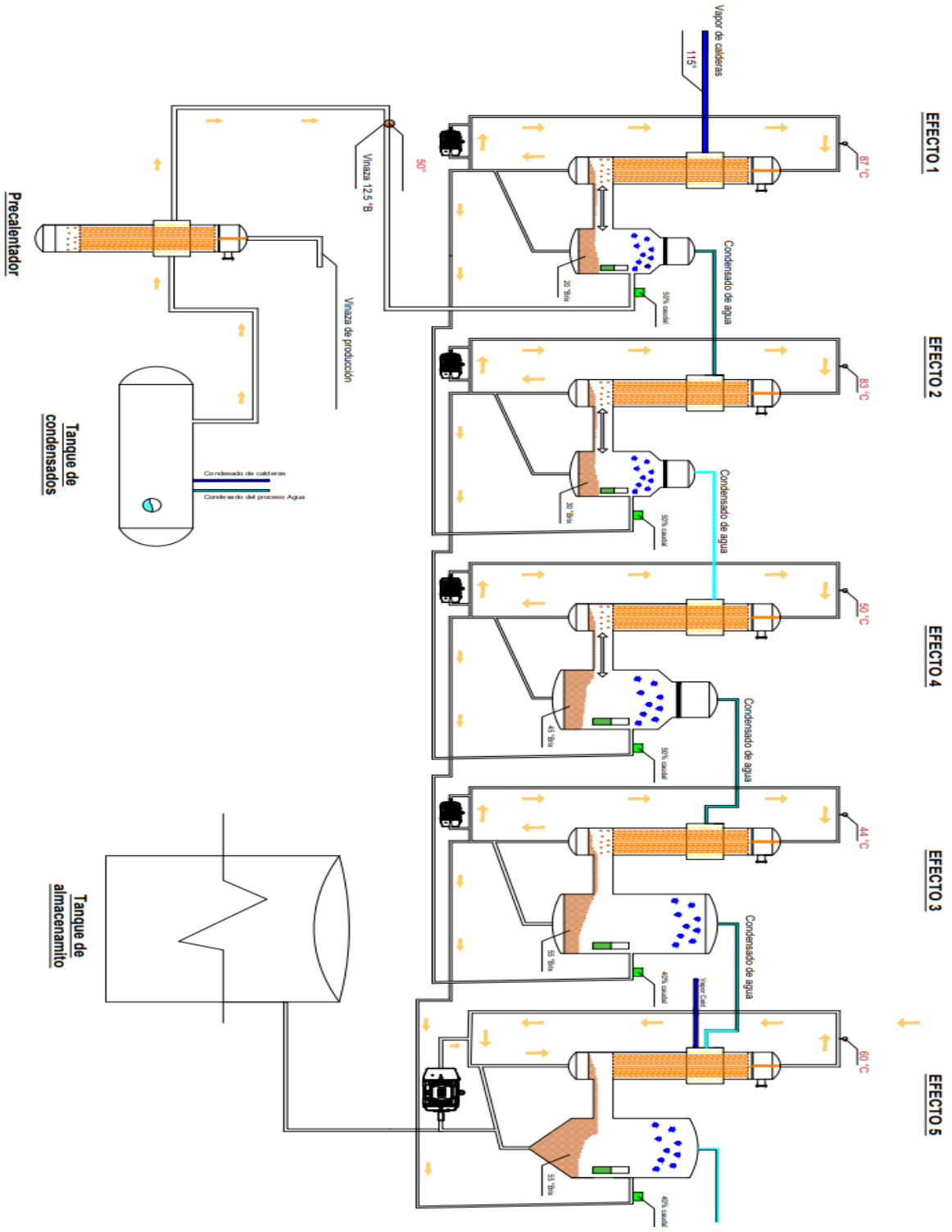


Figura 0.1 Esquema del proceso de evaporación empresa AL (autoría propia)

3.2 Diagrama causal

El modelo de simulación utilizado está basado en la metodología de la dinámica de sistemas (DS). El primer paso es crear un diagrama causal (DC), el cual permite visualizar como las variables interactúan entre sí.

Para desarrollar el diagrama causal, se identificaron las variables clave dentro del proceso y se clasificaron en variables controlables (endógenas) y no controlables (exógenas) con respecto a su influencia en el sistema. El diagrama refleja únicamente las variables críticas que afectan la eficiencia del proceso de evaporación, mostrando sus relaciones y bucles de retroalimentación, lo cual permite comprender mejor la dinámica del proceso.

El siguiente apartado describe cada elemento del diagrama causal, así como sus componentes.

3.2.1 Variables exógenas

A continuación, se describen las variables principales del proceso de evaporación de la vinaza que no pueden ser controlar.

- *Incrustaciones en el equipo:* Las incrustaciones son depósitos de vinaza sólidos formados por acumulación de minerales y sólidos disueltos, que se adhieren en las paredes de los tubos. Este fenómeno reduce la eficiencia de la transferencia de calor y disminuyen la productividad.
- *Composición de la materia prima:* La variabilidad en la composición química de la vinaza altera el comportamiento del proceso, afectando la eficiencia y la cantidad de energía necesaria para alcanzar los grados brix deseados.
- *Condesados de agua:* Los condensados se generan en el proceso de evaporación y pueden afectar la temperatura de la vinaza al entrar en el sistema. La gestión adecuada de los condensados es crucial para mejorar la eficiencia térmica del proceso.
- *Incremento de grados brix por efecto:* Cada etapa en el sistema de evaporación aumenta los grados brix de la vinaza, lo que indica un aumento en la concentración de sólidos. Este incremento depende de factores como la eficiencia en la transferencia de calor las características iniciales de la vinaza

- *Variabilidad en las condiciones ambientales:* Representa los factores como la temperatura ambiente o la temperatura del agua. Afectar la eficiencia de la evaporación.
- *Instrumentos de monitoreo:* Aparatos para monitorear las características de la vinaza en cada etapa del proceso.
- *Sólidos totales iniciales:* representa la cantidad de los sólidos totales en la vinaza. Una mayor cantidad de sólidos puede requerir un mayor esfuerzo para alcanzar la concentración deseada, por lo tanto, puede afectar el tiempo de producción y los costos energéticos.

3.2.2 Variables endógenas

A continuación, se describen variables principales del modelo, las cuales si pueden ser controladas operativamente.

- *Presión de vacío:* Es un parámetro que reduce el punto de ebullición de la vinaza, mejorando la eficiencia de la transferencia de calor y optimiza la evaporación del agua. Además, permite controlar la velocidad de evaporación y la calidad del producto final.
- *Días operativos:* Representa los días productivos del proceso de evaporación, en donde, se transforma la vinaza en producto terminado
- *Días de mantenimiento a equipos:* Son los días de paro por mantenimiento tanto de equipos de evaporación como para tuberías.
- *Cantidad de Vinaza:* Esta representa la cantidad de materia prima utilizada al inicio del proceso afecta al volumen de producción y la cantidad de evaporación de agua. Controlar el flujo de vinaza permite optimizar el uso de energía y la cantidad de producto terminado.
- *Grados brix iniciales:* Es la concentración de sólidos solubles en la vinaza antes de iniciar el proceso de evaporación.
- *PH inicial:* Esta variable influye en la estabilidad química de ciertos compuestos orgánicos en la vinaza afectando la calidad del producto

- *Densidad inicial:* La densidad representa un indicar de la concentración de sólidos y líquidos en la mezcla. Controlar la densidad inicial ayuda a regular las condiciones necesarias para una mejor evaporación.
- *Producción del producto terminado*: Representa la cantidad de producto terminado con las características deseadas por el cliente.
- *Inventario de vinaza*: Esta variable representa el inventario disponible de la materia prima para el proceso de evaporación.
- *Inventario del producto terminado:* Representa la cantidad de producto terminado con el que cuenta la empresa para satisfacer su demanda

3.2.3 Explicación del Diagrama Causal

Una vez se han identificado y clasificado las variables clave del proceso de producción, se establecen las relaciones causales entre ellas, las cuales se representan de manera grafica en el diagrama causal que se muestra en la Figura 3.2. Este análisis ha permitido identificar tres bucles de retroalimentación que explican el comportamiento dinámico del sistema y la interacción entre las variables. Para facilitar su compresión, el diagrama se ha dividido en secciones, cada una correspondiente a un conjunto de variables interrelacionadas, lo que permite un análisis más preciso y detallado de cada viable y bucle.

En la Figura 3.3 se muestra el primer bucle de retroalimentación y las relaciones causales involucradas: *Producción de alcohol, Vinaza disponible, Consumo de vinaza, Producción de vinaza AD (alta densidad) y capacidad de producción*.

La Producción de alcohol tiene un efecto directo sobre la cantidad de vinaza disponible, ya que la vinaza es un subproducto generado a partir del proceso de producción del alcohol. A medida que la producción de alcohol aumenta, también incrementara la cantidad de vinaza disponible, permitiendo que se utilice en la producción de vinaza AD.

No obstante, la variable *Producción de vinaza de AD* está limitada por la capacidad de producción de la planta. Esta capacidad define cuánta vinaza puede ser procesada durante un ciclo, ya que, a mayor capacidad de producción, mayor será la cantidad de vinaza que puede ser procesada.

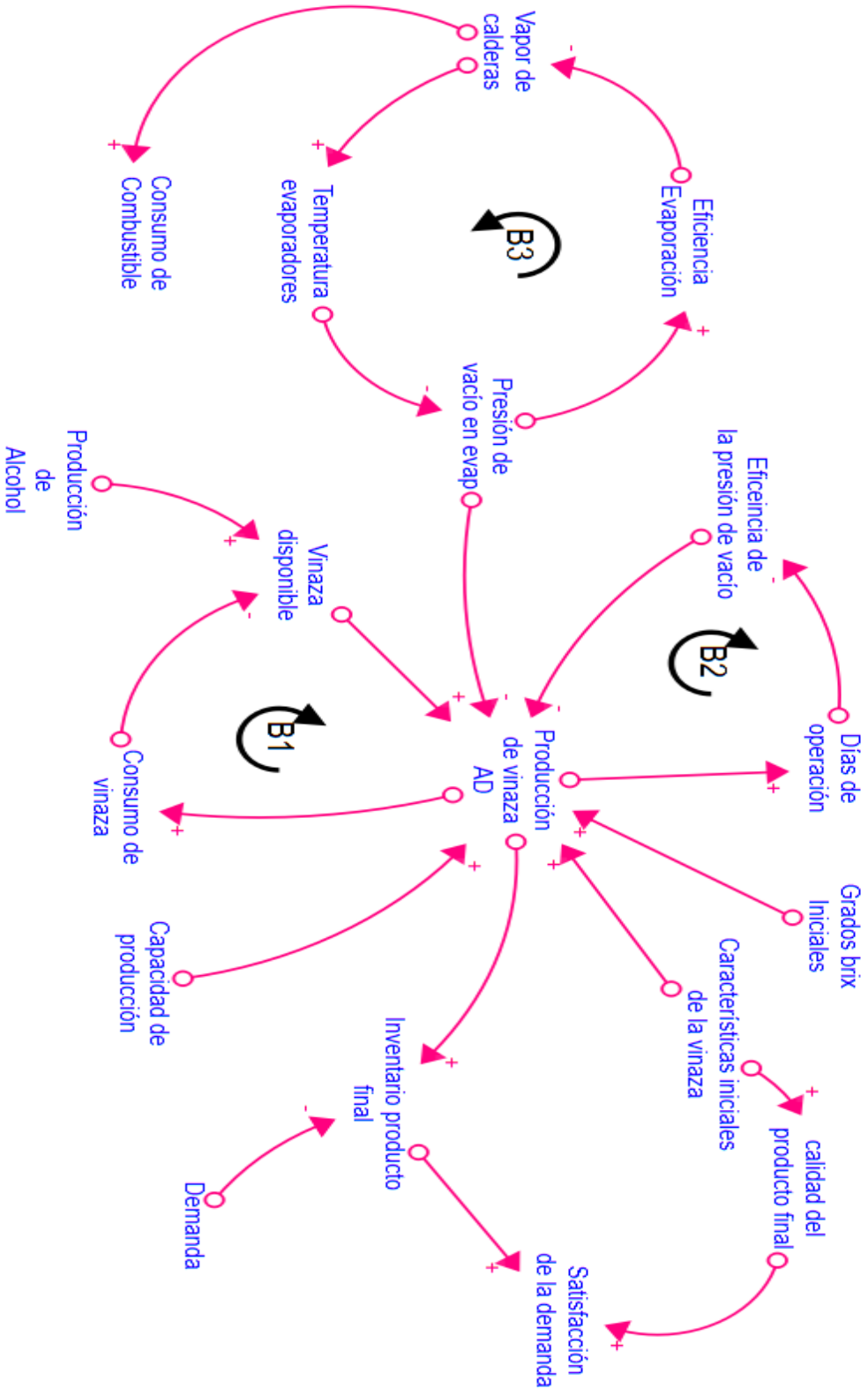


Figura 0.2 Diagrama causal del proceso de evaporación de la vinaza (autoría propia)

La *producción de vinaza AD* incrementa el *consumo de vinaza,* ya que, al aumentar la producción es necesario consumir más vinaza. Este aumento en el consumo, a su vez, reduce la cantidad de vinaza disponible, lo que, genera una retroalimentación negativa, formando el primer bucle B1. En la Figura 3.3 se puede observar lo antes mencionado.

Es importante mencionar que la variable *consumo de vinaza* funciona como un regulador del flujo de materia prima, permitiendo mantener el equilibrio en el sistema. De esta forma, se asegura que el sistema no consuma más vinaza de la que puede regenerarse o almacenarse, evitando la saturación del proceso y asegurando el uso eficiente de la materia prima.

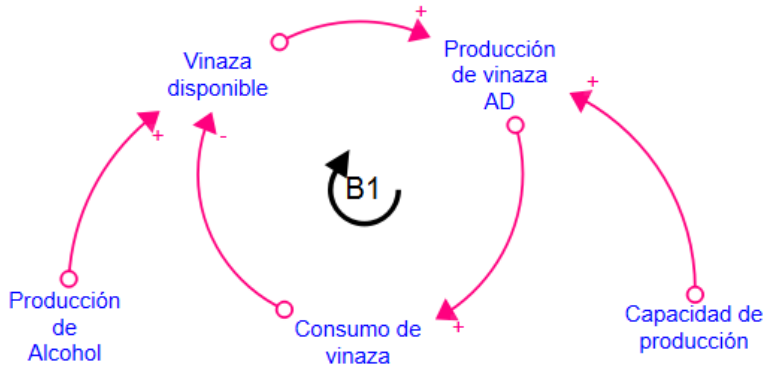


Figura 0.3. Diagrama causal, bucle de retroalimentación negativa B1(autoría propia)

La Figura 3.4 representa el segundo bucle de retroalimentación negativa (B2), mostrando las relaciones causales entre las variables: *Días de operación, eficiencia de la presión de vacío*, *producción diaria de AD* y *Producción de vinaza AD.* A medida que los días de operación avanzan, la eficiencia de la presión de vacío disminuye, lo que afecta negativamente el rendimiento del proceso. Esta disminución en la eficiencia es provocada por la acumulación de vinaza cristalizada (incrustaciones) que se genera de manera natural conforme pasan los días operativos.

La eficiencia de la presión de vacío es fundamental en el proceso de producción, ya que, a mayor eficiencia, el sistema de evaporación funciona de manera óptima, lo que resulta en una mayor producción diaria de vinaza AD. Sin embargo, si la eficiencia del vacío disminuye, todas las demás variables se ven afectadas.

Por último, cuando la producción diaria de vinaza AD aumenta, es necesario extender los días de operación para cumplir con la demanda, ya que la producción no es estable durante todo el ciclo operativo. Durante los primeros días, la productividad es baja mientras se controla la evaporación; posteriormente, la producción se estabiliza y se estandariza. Sin embargo, conforme avanzan los días operativos, la producción comienza a disminuir nuevamente. En ese momento, la planta debe decidir entre aumentar el consumo de vapor para mantener la producción o continuar con el mismo nivel de vapor, lo que resultaría en una disminución en la productividad.

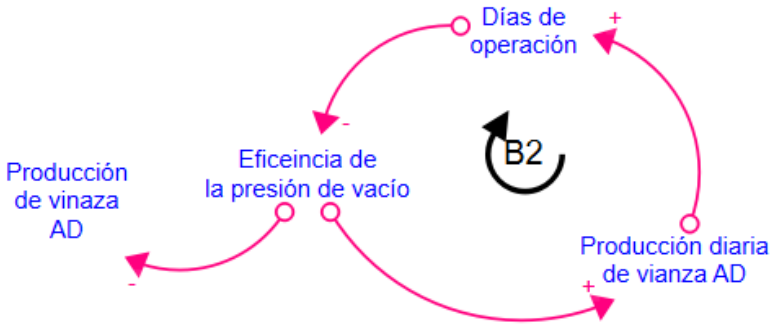


Figura 0.4 Diagrama causal, bucle de retroalimentación negativa B2 (autoría propia)

En la Figura 3.5 se muestra el tercer bucle de retroalimentación negativa (B3) y las relaciones causales entre variables*: Vapor de calderas, Temperatura de evaporadores, Presión de vacío en evaporadores, Eficiencia de evaporación, Consumo de combustible* y *Producción de vinaza.* Este bucle describe como el proceso busca regularse mediante la cantidad de vapor suministrada por calderas.

El vapor de calderas incrementa directamente la temperatura en los evaporadores, lo que genera un aumento en la presión de vacío. Este incremento en la presión de vacío eleva el punto de ebullición del agua en la vinaza y afecta de manera negativa la eficiencia de la evaporación.

La eficiencia de evaporación es fundamental en el proceso, ya que, cuando disminuye es necesario aumentar el vapor de calderas para compensar el descenso de la productividad. No obstante, este incremento de vapor no soluciona la ineficiencia del sistema, sino que provoca

un incremento en las temperaturas y en el consumo de combustible, sin mejorar el rendimiento del proceso.

Finalmente, el aumento de la presión de vacío impacta negativamente la producción de vinaza AD, ya que, a medida que la presión se incrementa, la producción disminuye. Esto hace que el sistema necesite más vapor y combustible para intentar mantener la productividad, generando un ciclo ineficiente.

Es importante destacar que la temperatura en los evaporadores y la presión de vacío son los principales indicadores de la estabilidad del proceso. Operativamente, estos parámetros reflejan la eficiencia del sistema; cuando sus valores están elevados, indican que el equipo está trabajando bajo condiciones forzadas o presionadas, lo cual resulta en mejor productividad. Además, se requiere un mayor consumo de recursos para intentar alcanzar los niveles óptimos de producción

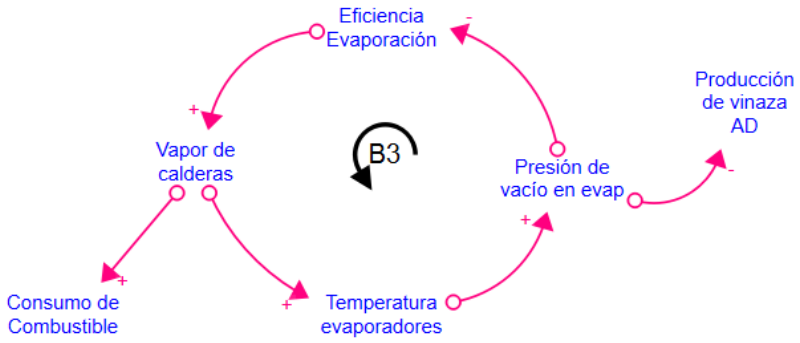


Figura 0.5 Diagrama causal, bucle de retroalimentación negativa B3 (autoría propia)

En la Figura 3.6 se muestran las relaciones causales entre variables: *grados Brix iniciales*, *Características iniciales de la vinaza, Producción de vinaza AD, Inventario de producto final, Calidad de producto final, Demanda* y *Satisfacción de la demanda.* Partiendo de los grados brix iniciales, esta variable indica la concentración de sólidos suspendidos en la materia al comienzo del proceso. Si los grados Brix son elevados, la evaporación es más eficiente y requiere menos energía, por consiguiente, aumenta la producción de vinaza AD. Por el contrario, si los grados Brix son bajos, el proceso será más lento y costoso, reduciendo la producción.

Las características iniciales de la vinaza influyen en el rendimiento del proceso y en la calidad del producto final. Las características iniciales se refieren a la composición físicas y químicas (contenido de sólidos, pH, temperatura y densidad). Si la vinaza entra al proceso con características ideales el resultado será un producto final de mayor calidad con al menos 60 grados Brix. De lo contrario, el producto alcanzará los grados brix requeridos, pero con una calidad baja.

La producción de vinaza AD impacta al inventario de producto final. A mayor producción, el inventario de producto terminado aumentará, lo que permitirá satisfacer mejor la demanda. Por otra parte, el inventario de producto final también se ve afectado por la demanda; cuando la demanda crece, el inventario disminuye lo que puede provocar un desabastecimiento si no se ajusta el proceso productivo.

Para concluir, la calidad del producto final influye positivamente en la satisfacción de la demanda. Un producto con mayor calidad incrementa la satisfacción de los clientes y, en consecuencia, mejora la probabilidad de cubrir la demanda. Este ciclo de influencias entre las características iniciales, la producción y la calidad del producto final es fundamental para mantener la estabilidad del sistema de producción.

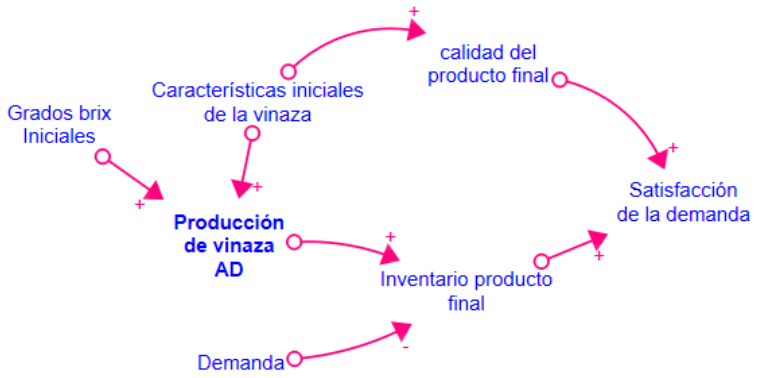


Figura 0.6 Diagrama causal, sección de retroalimentación entre variables (autoría propia)

3.3 Parámetros

En esta fase de la metodología de dinámica de sistemas, se procede a la formulación del modelo dentro del software de simulación. Por lo cual, se deben establecer los valores iniciales de las variables clave, así como el uso de técnicas que permitan estimar los valores o parámetros de los que no dispone de datos exactos, utilizando en su lugar series de datos históricos.

Los parámetros que se incorporan al modelo corresponden a los procesos clave en la concentración de vinaza. Por lo tanto, se realiza un análisis detallado de estos parámetros, los cuales se definen en la Tabla 3.1, donde la primera columna clasifica las principales variables evaluadas, la segunda identifica los parámetros críticos y la tercera describe el parámetro y las unidades de media empleados.

Tabla 0.1 Parámetros principales del proceso de evaporación (autoría propia).

Variables evaluadas	Parámetros específicos	Descripción
Vinaza	Brix iniciales	Grados Brix por lote (°Bx)
	Densidad inicial	Densidad medida en g/cm³
	pH Inicial	Nivel de acidez (pH)
	Sólidos Totales	Porcentaje de sólidos disueltos (%)
Proceso operativo	Temperatura	Temperatura en evaporadores (°C)
	Presión de vacío	Presión aplicada (bares)
	Producción de Alcohol	Cantidad de vinaza generada (kg/día)
	Consumo de vinaza	Cantidad de vinaza utilizada (kg/día)
	Condensados	Agua generada al día (m³/día)
	Cantidad de vapor	Vapor utilizado (kg/día)
	Días de mantenimiento	Tiempo de mantenimiento (días)
	Días de operación	Tiempo de operación(días)
	Demanda	Requerimientos de producción al día

3.3.1 Aprovisionamiento de vinaza

El aprovisionamiento de vinaza está directamente vinculado al proceso de producción de alcohol, ya que la planta de vinaza AD depende producción de alcohol para obtener materia prima. Esto obliga a ambas plantas a coordinarse para evitar desabasto en la planta de vinaza AD.

Cabe mencionar que la planta no almacena grandes lotes de vinaza, sino lo necesario para arrancar el proceso, ya que el consumo de materia prima ocurre en tiempo real, es decir, conforme se va generando la vinaza se va consumiendo. En este contexto, es importante monitorear de manera continua el consumo de vinaza para que la planta de alcohol pueda ajustar su producción en función a la demanda de vinaza.

En este estudio la producción diaria de vinaza se estimó con base al consumo de la planta AD. Los datos se recopilaron del 6 de enero de 2024 al 8 de marzo de 2024, cubriendo un total de 8 ciclos de producción. La Tabla 3.2 se muestra un resumen de los datos de consumo de materia prima.

Tabla 0.2 Datos diarios de consumo de vinaza (autoría propia)

Consumo de Vinaza kg/día				
767.12	341.31	650.77	1037.79	787.17
904.04	716.72	786.17	892.05	371.26
772.61	788.25	796.27	1098.16	864.33
399.03	900.77	946.12	885.18	894.21
578.40	875.21	1020.66	784.62	416.51
752.37	831.92	1029.02	476.63	1025.85
791.24	772.19	1044.85	1047.03	1021.13
765.28	366.72	1067.41	876.45	1022.75
652.71	881.27	1060.18	279.26	1005.86
903.56	932.50	1081.64	973.66	1000.42
875.22	945.65	1052.71	985.25	971.16
873.10	981.03	1069.18	1028.30	953.82
853.62	964.82	889.26	1032.85	868.85
836.92	949.79	676.39	1052.43	646.74
820.94	984.02	1030.97	1057.02	801.74
743.36	945.04	1071.14	1060.21	654.34
		Promedio al día	857.66	
		Promedio por hora	35.73	

La Tabla 3.2 muestra los datos diarios del aprovisionamiento de la vinaza en kg/día, con un promedio de 857.6 kg/día. Para obtener el consumo promedio por hora, se dividió el promedio diario entre las 24 horas de producción, resultando en un promedio de 35.73 kg/hora.

Para modelar adecuadamente los datos y garantizar que se asemejen a la realidad, es esencial identificar el tipo de distribución que siguen los datos. Para ello, se realizó una prueba de bondad (Figura 3.7). Los resultados indicaron que ninguna de las distribuciones evaluadas se ajusta correctamente al comportamiento del consumo de vinaza. Según los criterios estadísticos, si el valor de *p* es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula, lo que significa que los datos no siguen esa distribución. En este caso, todas las distribuciones analizadas como la normal, exponencial, lognormal y gamma, mostraron valores de *p* inferiores a 0.05. Por lo que, ninguna distribución es adecuada para modelar estos datos.

Dado que ninguna distribución se ajustarse a los datos, se optó por introducir una variable aleatoria con un rango entre 35 y 40 kg/hora para la simulación. Esto permitirá estimar la producción de vinaza semejante al proceso real sin depender de un modelo de distribución estadístico. Cabe destacar, que para esta sección no es necesario ser preciso, ya que el consumo de vinaza suele ser considerablemente menor que la cantidad de vinaza producida.

Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P	LRT P
Normal	2.714	<0.005	
Transformación Box-Cox	0.793	0.038	
Lognormal	5.649	<0.005	
Lognormal de 3 parámetros	2.721	*	0.000
Exponencial	22.658	<0.003	
Exponencial de 2 parámetros	16.969	<0.010	0.000
Weibull	1.946	<0.010	
Weibull de 3 parámetros	0.925	0.005	0.000
Valor extremo más pequeño	0.921	0.019	
Valor extremo por máximos	5.763	<0.010	
Gamma	4.561	<0.005	
Gamma de 3 parámetros	3.210	*	0.000
Logística	1.758	<0.005	
Loglogística	3.244	<0.005	
Loglogística de 3 parámetros	1.763	*	0.000
Transformación de Johnson	0.360	0.440	

Figura 0.7 Identificación de distribución para el aprovisionamiento de la vinaza en Minitab

3.3.2 Producción de evaporación de vinaza

En este apartado se analizó el comportamiento de las variables principales que afectan al proceso de evaporación de vinaza, con el fin de identificar cómo pueden ser representadas dentro del modelo de simulación. Para cada variable se evaluaron sus datos históricos y su comportamiento estadístico, buscando determinar el tipo de distribución o ajuste más adecuado para simular su variación en condiciones reales. Este análisis permitió obtener ecuaciones y patrones que serán utilizados en el simulador para reproducir con mayor exactitud el sistema real.

3.3.2.1 Arranque del proceso de evaporación

Durante el arranque, se determina cuanta vinaza se consume y se regula el flujo para garantizar la estabilidad del proceso desde el inicio. Para modelar esta etapa, se utiliza la variable del consumo de vinaza. Sin embargo, como se demostró anteriormente, esta variable no sigue una distribución estadística. Por ello, se realizó un análisis estadístico para identificar el comportamiento del consumo de vinaza y definir una forma adecuada de incorporarla en la simulación.

El análisis mostró que el consumo de vinaza cambia significativamente conforme avanza cada ciclo productivo. en lugar de considerar valores globales por ciclo completo, se optó por analizar los datos por día especifico. Se observo que el consumo del mismo día en diferentes ciclos tiene un comportamiento similar, lo que permitió identificar patrones diarios más consistentes. Esto facilito el cálculo de promedios y desviaciones por día, proporcionando una base más sólida para el modelo

La Tabla 3.3 muestra los datos organizados bajo este enfoque, cada fila corresponde a un ciclo de operación y cada columna representa un día especifico dentro de ese ciclo. A partir de esta estructura, se calcularon las medias y desviaciones estándar, lo que permitió detectar valores atípicos que incrementaban significativamente la dispersión de algunos días.

Tabla 0.3 Datos agrupados del consumo de vinaza distribuidos por día (autoría propia).

Consumo de vinaza										
	Días									
Ciclos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	501.2	904.0	772.6	772.6	399	578.4	752.4	791.2	765.3	652.7
2	556.4	875.2	873.1	853.6	836.9	820.9	743.4			
3	341.3	716.7	788.3	900.8	875.2	831.9	772.2			
4	598.4	881.3	932.5	945.6	981	964.8	949.8	984	945	650.8
5	466.6	946.1	1020.7	1029	1044.9	1067.4	1060.2	1081.6	1052.7	1069.2
6	676.4	960.2	1071.1	1037.8	892.1	1098.2	885.2	784.6	787.2	1047
7	416.5	973.7	985.2	1028.3	1032.9	1052.4	1057	1060.2	868.8	646.7
8	466.4	712.4	1021.1	1022.7	1005.9	1000.4	971.2	953.8	476.6	371.3
Prom.	568.4	919.2	933.1	902.1	905.9	948.6	903.8	938.3	797.2	757.0
Desv.	243.3	101.5	111.8	214.6	153.2	130.2	125.7	135.1	207.9	297.4

Una vez agrupados los datos, se procedió a buscar un modelo que pudiera ajustarse de manera precisa al comportamiento observado esto con el fin de poder modelarlo sin la necesidad de usar una distribución. Por lo cual, se llevó a cabo un análisis de regresión lineal. Dado que las relaciones entre los datos mostraban una naturaliza no lineal.

Para comparar los datos reales y los datos generados por el modelo de regresión, se realizó una prueba no paramétrica utilizando el método de Mann-Whitney (esto porque los datos no siguen una distribución normal). En la Figura 3.8, se muestra el resultado de la prueba, arrojando un valor de p= 0.005, siendo menor al nivel de significancia ($p<0.05$). Por lo que, se rechaza la hipótesis nula (Ho), lo que significa que entre los datos reales y los simulados hay una diferencia estadística significativa. Este resultado indicó la presencia de datos atípicos que distorsionaban el ajuste del modelo.

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$
Hipótesis alterna $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Valor W	Valor p
6086.00	0.005

Figura 0.8 Prueba de Mann-Whitney, modelo no ajustado consumo de vinaza en Minitab

Con el objetivo de mejorar la precisión del modelo, se eliminaron los valores atípicos, que no representaban el comportamiento real del consumo de vinaza. Estos datos fueron identificados como inconsistentes con respecto al patrón general. Esta decisión fue respaldada por el personal operativo, quienes confirmaron que dichos valores no representaban condiciones normales del proceso.

Posteriormente, se calcularon los promedios de consumo para cada día del ciclo y se generó una nueva ecuación de ajuste polinómico de grado 6, que describe mejor la relación entre los datos observados. Además, para agregar variabilidad al modelo de regresión, se incorporó una variable aleatoria basada en el rango intercuartílico (IQR) de los datos de consumo de vinaza. La ecuación obtenida se muestra en Ecuación 3.1.

$$y= (-0.0978x^6 + 3.5054x^5 - 49.578x^4 + 352.38x^3 - 1324.7x^2 + 2505x - 925.91) \pm \text{aleatorio} \quad \textit{(Ec. 0.1)}$$

Donde:

y= consumo de vinaza

x= día de producción

Aleatorio = IQR

El ajuste fue validado mediante un modelo de regresión lineal polinómica de grado 6 con un coeficiente de determinación (R^2) del 0.9596. De acuerdo con los criterios estadísticos aceptados (Frost, 2021), un valor de R^2 superior al 80% indica un ajuste confiable del modelo.

Se realizo una prueba de hipótesis para verificar si el modelo de simulación refleja correctamente el comportamiento del sistema. Es importante señalar que este planteamiento se utilizó en todas las pruebas de hipótesis con datos que no siguen una distribución especifica.

El planteamiento de la prueba es la siguiente:

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencia significativa entre la mediana de los datos reales y la mediana de los datos simulados; $(\eta_1 - \eta_2 = 0)$ *(Ec. 0.2)*

Hipótesis nula (H_1): Existe diferencia significativa entre la mediana de los datos reales y la mediana de los datos simulados; $(\eta_1 - \eta_2 \neq 0)$ *(Ec. 0.3)*

La Figura 3.9, muestra los resultados obtenidos en la nueva prueba de Mann-Whitney con los datos ajustados. En este análisis, se obtuvo un valor de p= 0.836. Dado que el valor de *p* es mayor que el nivel de significancia (P>0.05), no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no hay diferencia significativa entre los datos simulados y los datos reales. Por lo tanto, el modelo ajustado refleja correctamente el comportamiento del consumo de vinaza.

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$
Hipótesis alterna $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Valor W	Valor p
5530.00	0.836

Figura 0.9 Prueba de Mann-Whitney, consumo de vinaza en Minitab

3.3.2.2 Proceso de producción del sistema de evaporación

En este apartado, se analizan las variables clave que influyen en la producción. Para cada variable fue necesario hacer un modelo de regresión lineal, con el objetivo de identificar la relación entre la producción y los parámetros, mejorando su funcionalidad dentro del modelo y mejorando la precisión de la simulación.

A) Presión de vacío

Se inicia analizando los datos de la presión de vacío, al igual que los datos del consumo de vinaza se clasifico por días y se aplicó un modelo de regresión para ajustar su comportamiento a la simulación. En la Tabla 3.4 se muestran los datos agrupados por día, así como los promedios y desviación estándar.

Tabla 0.4 Datos agrupados de la presión de vacío por día (autoría propia).

	Producción (Presión vacío)									
	Días									
Ciclos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.39	0.43	0.54	0.39	0.53	0.69	0.77	0.78	0.81	
2	0.56	0.66	0.69	0.72	0.72	0.75	0.77			
3	0.37	0.57	0.69	0.97	1.06	1.24	1.40			
4	0.33	0.47	0.54	0.63	0.71	0.74	0.70	0.74	0.72	0.68
5	0.38	0.42	0.52	0.54	0.55	0.57	0.59	0.60	0.60	0.63
6	0.35	0.40	0.42	0.42	0.42	0.48	0.52	0.53	0.60	0.64

7	0.34	0.38	0.40	0.42	0.51	0.55	0.59	0.63	0.69	0.56
8	0.34	0.33	0.36	0.43	0.48	0.56	0.63	0.73	0.80	0.84
Prom.	0.38	0.46	0.52	0.57	0.62	0.70	0.74	0.67	0.70	0.67
Ecua.	0.38	0.45	0.52	0.58	0.64	0.68	0.71	0.72	0.71	0.67

Los datos agrupados permitieron crear una ecuación mediante un modelo de regresión lineal (polinómica de grado 3) que representa el comportamiento de la presión de vacío, con un ajuste de R^2= 0.9651, esto sugiere un excelente arreglo para simular la variable. A esta ecuación se le agrego una variable aleatoria (la desviación estándar de los datos) para hacerla más precisa. La ecuación obtenida se observa en la Ecuación. 3.4

$$y= (– 0.0006x^3 +0.0033\ x^2 + 0.0618x + 0.3193) \pm \text{aleatorio} \qquad \textit{(Ec. 0.4)}$$

Donde:

y= Presión de vacío

x= Día de producción

Aleatorio = Desviación estándar

Para validar que los datos simulados se asemejan a los datos reales, se realizó una prueba de hipótesis utilizando una prueba no paramétrica (Mann-Whitney). El planteamiento se puede observar en las Ecuaciones 3.2 y 3.3.

En la prueba realizada, se obtuvo un valor de p= 0.153. Dado que el valor de *p* es mayor que el nivel de significancia (0.05), no se rechaza la hipótesis nula, por lo cual, no hay una diferencia significativa entre los datos simulados y los reales. En la Figura 3.10, se muestra el resultado obtenido de la prueba de Mann-Whitney.

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	5731.00	0.153
Ajustado para empates	5731.00	0.153

Figura 0.10 Prueba de Man-Whitney, presión de vacío en Minitab

B) Temperatura del proceso

Dado que la presión de vacío y la temperatura mantienen una relación directamente proporcional en el proceso de evaporación, el ajuste de regresión lineal también fue directo mediante una ecuación. En la Figura 3.11, se presenta el resumen del modelo ajustado, con un R^2 ajustado de 85.38%, lo que significa que el modelo es capaz de explicar el 85.38% de datos de temperatura en función de la presión de vacío. Este nivel de ajuste es aceptable, ya que supera el 80%, asegurando una presentación confiable del comportamiento del sistema (Montgomery, Peck, & Vining, 2012). Además, el R^2 predicho es de 84.77% sugiriendo que el modelo también tiene una excelente capacidad predictiva. La ecuación generada se muestra en la Ecuación 3.5.

Temperatura de Proceso = 63.13 + 36.92 (Presión de vacío) *(Ec. 0.5)*

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2.49501	85.58%	85.38%	84.77%

Figura 0.11 Ajuste del modelo de regresión, temperatura en Minitab

Se realizó la prueba Mann-Whitney para comparar los datos simulados con los reales, obteniendo un valor de p= 0.201. Al ser el valor de p mayor que el nivel de significancia (p>0.05) no se rechaza la hipótesis nula, por lo que, no existe diferencias significativas entre los dos conjuntos de datos. En la Figura 3.12, se observan el valor de *p* obtenido de la prueba no paramétrica.

Prueba

Hipótesis nula	$H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$
Hipótesis alterna	$H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Valor W	Valor p
5693.00	0.201

Figura 0.12 Prueba de Mann-Whitney, Temperatura del proceso en Minitab

C) Densidad de la vinaza

Para modelar el comportamiento de la densidad, se desarrolló una ecuación cubica con una variable aleatoria basada en rango intercuartílico (IQR, por sus siglas en ingles), dado que este indicador es más robusto frente a valores atípicos en comparación a la desviación estándar. Para evitar sobreestimar la dispersión, se utiliza IQR/2, esto permitirá incorporar una variabilidad realista sin afectar la estabilidad del modelo.

Por otra parte, el ajuste al modelo de regresión lineal polinómico de grado 3, obtuvo un R^2=0.926, siendo un valor confiable para simular la variable. La ecuación generada se muestra en Ecuación 3.6

$$y= (0.0000129x^3 – 0.0002499x^2 + 0.001619\ x + 1.0484) \pm \text{aleatorio} \qquad \textit{(Ec. 0.6)}$$

Donde:

y= Densidad de la vinaza

x= Día de producción

Aleatorio = IQR/2

Para comprobar la similitud de los datos, se llevó a cabo una nueva prueba de hipótesis, obteniendo un valor de p= 0.88. Dado que este valor es superior al nivel de significancia de 0.05, la hipótesis nula no se rechaza. Esto significa que no existen diferencia significativa entre los datos reales y los simulados. Los resultados de la prueba no paramétrica se muestran en la Figura 3.13.

Prueba

Hipótesis nula H_0: $\eta_1 - \eta_2 = 0$

Hipótesis alterna H_1: $\eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	5402.00	0.888
Ajustado para empates	5402.00	0.888

Figura 0.13 Prueba Mann-Whitney, densidad en Minitab

D) Grados brix

Esta variable se obtuvo me mediante una ecuación de regresión que relaciona los grados Brix con la densidad, ya que ambos parámetros están estrechamente relacionados dentro del proceso. Esta correlación permitió modelar y predecir los grados brix en función a la densidad. En la Figura 3.14, se muestra un coeficiente de determinación del 90.06%, indicando una fuerte correlación y confiabilidad entre las variables. La ecuación se presenta en Ecuación 3.7

$$\text{Grados Brix} = -205.70 + 208.2\ (\text{Densidad}) \qquad \textit{(Ec. 0.7)}$$

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.196942	90.06%	89.93%	87.95%

Figura 0.14 Ajuste modelo de regresión, grados brix en Minitab

Posteriormente, se realizó la prueba de hipótesis para comprobar la similitud entre datos. La Figura 3.15 muestra los resultados, donde el valor de p=0.301, al ser mayor que el nivel de significancia de 0.05, no se rechaza la hipótesis nula. Por lo que, no existe una diferencia significativa entre los datos reales y los simulados.

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$
Hipótesis alterna $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	5630.00	0.301
Ajustado para empates	5630.00	0.301

Figura 0.15 Prueba de Mann-Whitney, grados Brix en Minitab

E) pH de la vinaza

Para la variable del pH se utilizó una ecuación cubica que incorpora una variable aleatoria basada en el IQR. Dando un ajuste del 89.41%, por lo que la confiabilidad es aceptable. La ecuación obtenida se muestra en Ecuación 3.8

$$y= (4.1175 + 0.0801x – 0.005x^2) \pm \text{aleatorio} \qquad \textit{Ec. 0.8}$$

Donde:

x= Día de producción

y= pH

Aleatorio = IQR/2

En la Figura 3.16, se observa la comprobación de la similitud entre los datos, dando como resultado un valor de p mayor al nivel de significancia (0.594>0.05), por lo que no se rechaza la hipótesis nula. Esto significa que no hay una diferencia significativa entre los datos simulados y los reales.

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	5502.00	0.595
Ajustado para empates	5502.00	0.594

Figura 0.16 Prueba Mann-whitney, pH en Minitab

F) Sólidos totales de la materia prima

Para el análisis de los sólidos totales de la vinaza, no se agregó la variable aleatoria debido a la alta dispersión de los datos, no permitían un ajuste adecuado en las pruebas de hipótesis. Cabe mencionar que la inestabilidad en los sólidos hace difícil obtener valores consistentes, por lo que mantener la ecuación original resultó más eficiente. Además, la ecuación presenta un R^2 de 80.86%, lo cual es aceptable para el modelo. La ecuación se define como 3.9

$$y= – 0.0006x^4 + 0.0133x^3 - 0.1261x^2 + 0.5638x + 10.2992 \qquad \textit{(Ec. 0.9)}$$

Donde:

x= Día de producción

y= Sólidos totales

En la Figura 3.17, se presentan los resultados de la prueba de hipótesis, donde el valor de *p* es superior al nivel de significancia (0.331>0.05), lo que significa que no hay diferencia significativa en los datos reales y los simulados. Este resultado señala que, aunque los sólidos son variables, el modelo es confiable para representar los datos.

Prueba

Hipótesis nula H_0: $\eta_1 - \eta_2 = 0$
Hipótesis alterna H_1: $\eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	5614.00	0.332
Ajustado para empates	5614.00	0.331

Figura 0.17 Prueba Mann-Whitney, sólidos totales en Minitab

G) Producción de vinaza AD

Con el fin de simular la producción de vinaza AD en función de diversas variables, se realizó un análisis de regresión múltiple que incluyo variables previamente estudiadas: presión de vacío, temperatura, pH, sólidos totales, consumo de vinaza, densidad y grados brix. este modelo predictivo logró un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 93.37, lo que sugiere una alta precisión en la capacidad predictiva del modelo. En la Figura 3.18 se muestra el valor de R^2 y en la Ecuación 3.10 se presenta la fórmula obtenida a partir de este análisis de regresión.

$$y_I = 2559 + 0.382(\text{temperatura}) + 1.0(\text{presión de vacío}) + 0.21975(\text{Consumo de vinaza}) + 12.49\ (\text{grados brix}) - 2741\ (\text{densidad}) + 14.5\ (\text{pH}) + 3.68\ (\text{solidos totales}) \quad \textit{(Ec. 0.10)}$$

Donde:

y_I= Producción de vinaza AD

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
12.7251	93.37%	92.71%	90.63%

Figura 0.18 Ajuste del modelo de regresión, producción vinaza AD en Minitab

Para validar los datos, se realizó una prueba de hipótesis (Figura 3.19), obteniendo un valor de p=0.827, superior al nivel de significancia (0.05), lo cual señala que no existe diferencia significativa entre los datos reales y los simulados. Esto confirma que la ecuación generada, simula correctamente la producción

Prueba

Hipótesis nula H_0: $\eta_1 - \eta_2 = 0$
Hipótesis alterna H_1: $\eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	5309.00	0.827
Ajustado para empates	5309.00	0.827

Figura 0.19 Prueba Man-Whitney, producción de vinaza AD en Minitab

H) Demanda

La demanda se simulo mediante una modalidad de *demanda normal*, ya que los datos históricos presentan una distribución normal, Esto se confirma mediante la prueba de bondad de ajuste (Figura 3.20). Este enfoque permite utilizar la media (145.74 toneladas) y la desviación estándar (65.45 toneladas) de los datos históricos para generar valores aleatorios en cada periodo, replicando las variaciones propias de la demanda.

Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P
Normal	0.237	0.781
Lognormal de 3 parámetros	0.263	*
Exponencial de 2 parámetros	14.471	<0.010
Weibull de 3 parámetros	0.229	>0.500
Valor extremo más pequeño	1.064	<0.010

Figura 0.20 Identificación de distribución de la demanda en Minitab

Para esta variable se utilizó una prueba de hipótesis *t* para dos muestras independientes con el objetivo de determinar si existe una diferencia significativa entre los datos simulados y los reales. La formulación de la hipótesis es la siguiente:

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencia significativa entre la media de los datos simulados y la media de los datos reales; $(\mu_1 - \mu_2 = 0)$ *(Ec. 0.11)*

Hipótesis nula (H_1): Existe diferencia significativa entre la media de los datos simulados y la media de los datos reales; $(\mu_1 - \mu_2 \neq 0)$ *(Ec. 0.12)*

Los resultados de la prueba se muestran en la Figura 3.21, en donde el valor de *p* es de 0.217, superior al nivel de significancia de 0.05. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que la simulación representa adecuadamente el comportamiento de los datos.

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
1.24	175	0.217

Figura 0.21 Prueba t dos muestras, demanda en Minitab

3.4 Diagrama de Forrester en STELLA®

En esta sección de la metodología de dinámica de sistemas (DS), se transforma el diagrama causal en un diagrama de Forrester, utilizando el software STELLA®. Este modelo de simulación se centra en el proceso de evaporación de la vinaza. Para ello, se desarrollaron varios submodelos que conforman el modelo principal, destacando las áreas de aprovisionamiento, producción y demanda del producto. Asimismo, se integran variables adicionales que no fueron consideradas en el DC original, pero que son esenciales para una evaluación precisa del proceso productivo.

3.4.1.1 Horizonte de simulación

El software STELLA® permite seleccionar las unidades de tiempo con las que opera el modelo de simulación, así como el intervalo de tiempo para realizar el análisis. Cabe destacar que, el proceso se simuló en días en una longitud total de 365 días, debido a la complejidad del sistema, lo que, facilitó una simulación más precisa y controlable. Los parámetros del horizonte de simulación se muestran en la Figura 3.22.

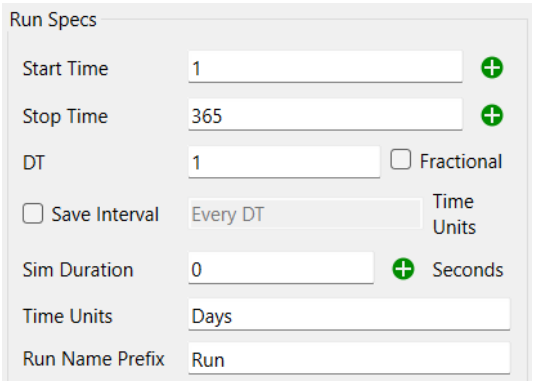


Figura 0.22 Parámetros del horizonte de simulación

3.4.1.2 Módulos de Aprovisionamiento

Se construyó un modelo para definir el proceso de aprovisionamiento de vinaza, cuyo objetivo es predecir cuanta vinaza se genera diariamente, En la Figura 3.23, la variable *Entrada_vinaza_m3* representa los metros cúbicos de vinaza que ingresan al sistema de evaporación y contiene el promedio diario de dicho volumen. Por otra parte, la variable *Densidad_D* simula la densidad inicial del proceso. El modelo multiplica las variables antes mencionadas para convertir el volumen en toneladas, una medida más precisa y estandarizada para todo el proceso.

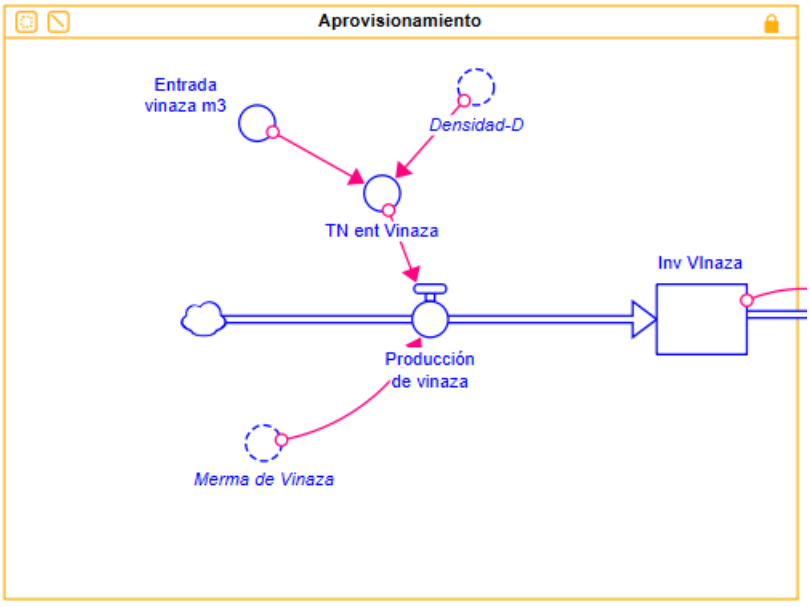


Figura 0.23 Modulo de aprovisionamiento de vinaza

Al ingresar la materia prima al proceso de evaporación, se tiene una merma del 5%, ajuste que se realiza en la válvula de *Producción_vinaza* antes de ser almacenada. Es importante señalar que el tanque de almacenamiento no acumula grandes cantidades de materia prima, ya que esta se utiliza continuamente a medida que se produce.

3.4.1.3 Módulo de producción

Para desarrollar el modelo del proceso de producción se crearon varios submodelos con el fin de generar ecuaciones que simulen los datos reales, basados en pruebas de hipótesis presentadas en el apartado anterior. Cada submodelo representa variables críticas que influyen en la eficiencia del proceso productivo, por lo que deben simularse con la mayor preciso posible.

En todos los submódulos las mismas características; un contador que acabar de 0 a 13 días, representado un ciclo de producción que incluye los días de mantenimiento. Después, se utiliza una ecuación de regresión que genera datos semejantes a los reales. Sin embargo, estos valores carecen de variabilidad, por lo cual, se le agrega otra variable que añade dispersión a los datos sin afectarlos de manera significativa. Esta variabilidad se logra mediante rangos intercuartílicos.

Este patrón se repite en todos los submodelos. Por ejemplo, en el submodelo de Consumo de vinaza, se utiliza el *Contador_días*, luego la variable *Consumo_de_vinaza_Ecu*, que aplica la ecuación de regresión sustituyendo los valores del *Contador_días* en la formula. Finalmente, la variable *Consumo_de_vinaza_D,* incorpora variabilidad a los datos. En la Figura 3.25 se muestra lo antes mencionado para cada submodelo.

Es importante destacar que hay dos pares de variables con una alta correlación, lo que significa que una puede predecir el comportamiento de la otra con base a los datos históricos. Estas variables son: presión de vacío con temperatura y densidad con grados brix. En este caso se realizó una regresión lineal que permite determinar los valores generados en función a sus predictores. Lo antes mencionado se puede observar en el submódulo de Temperatura y el submódulo de densidad-brix presentados en la Figura 3.24.

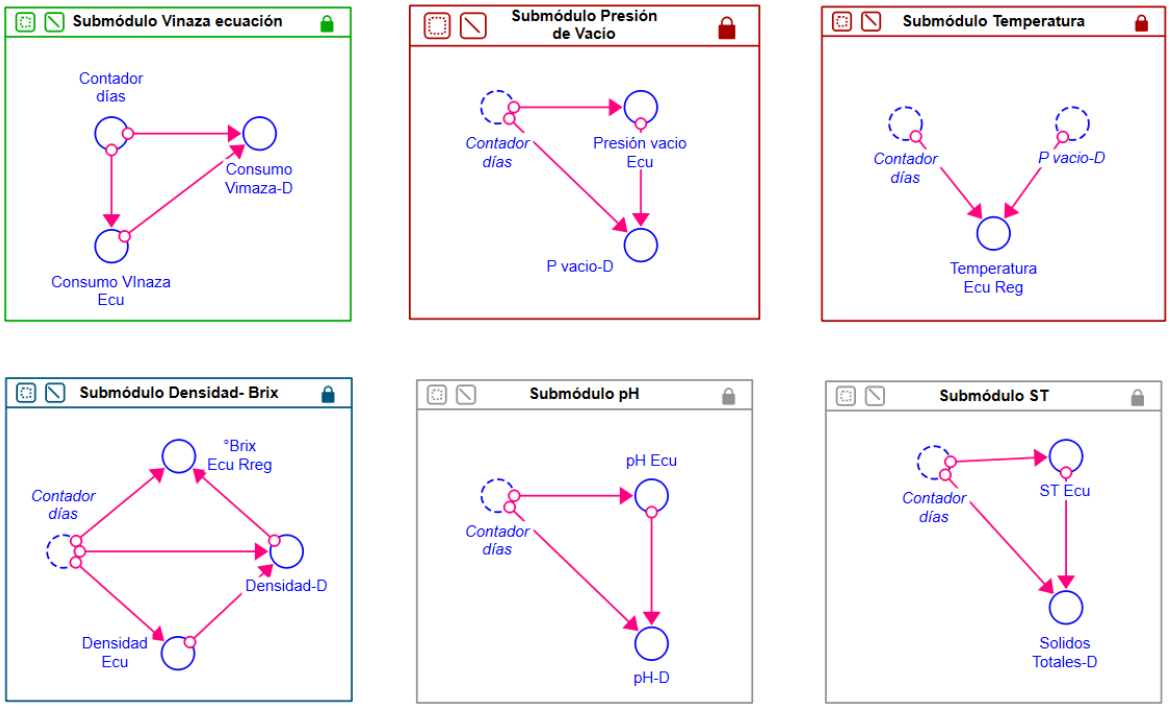


Figura 0.24 Submódulo del proceso de producción

Una vez comprobado que los datos de los submodelos son estadísticamente similares a los datos reales, se continua con el arranque. La válvula de *Entrada_Vinaza_Arranque,* evalúa que el *Inv_Vinaza* (Figura 3.25), tenga acumulado la vinaza necesaria para poder empezar con el proceso. Al mismo tiempo, el Contador_*días* regula la duración del suministro, estableciendo los días de producción y los periodos de mantenimiento o paros.

El tanque del *Evaporado* recibe la vinaza y separa dos flujos: producción de vinaza AD y condensados. La producción se estima a partir de la interacción entre los submodelos, utilizando una ecuación de regresión lineal para predecir la cantidad de vinaza AD producida (Figura 3.25). Cabe destacar que, en el primer ciclo, la producción se refleja a partir del tercer día, lo cual es necesario para calibrar adecuadamente el proceso.

Los condensados, se obtienen como resultado de restar la cantidad de vapor menos lo producido. Debido a la evaporación natural del proceso, no todos los concentrados (agua y vapor) son registrados por el sistema. A pesar de esto, el cálculo realizado sigue siendo teóricamente adecuado. Por último, tanto la vinaza AD como los condensados se almacenan en sus respectivos tanques.

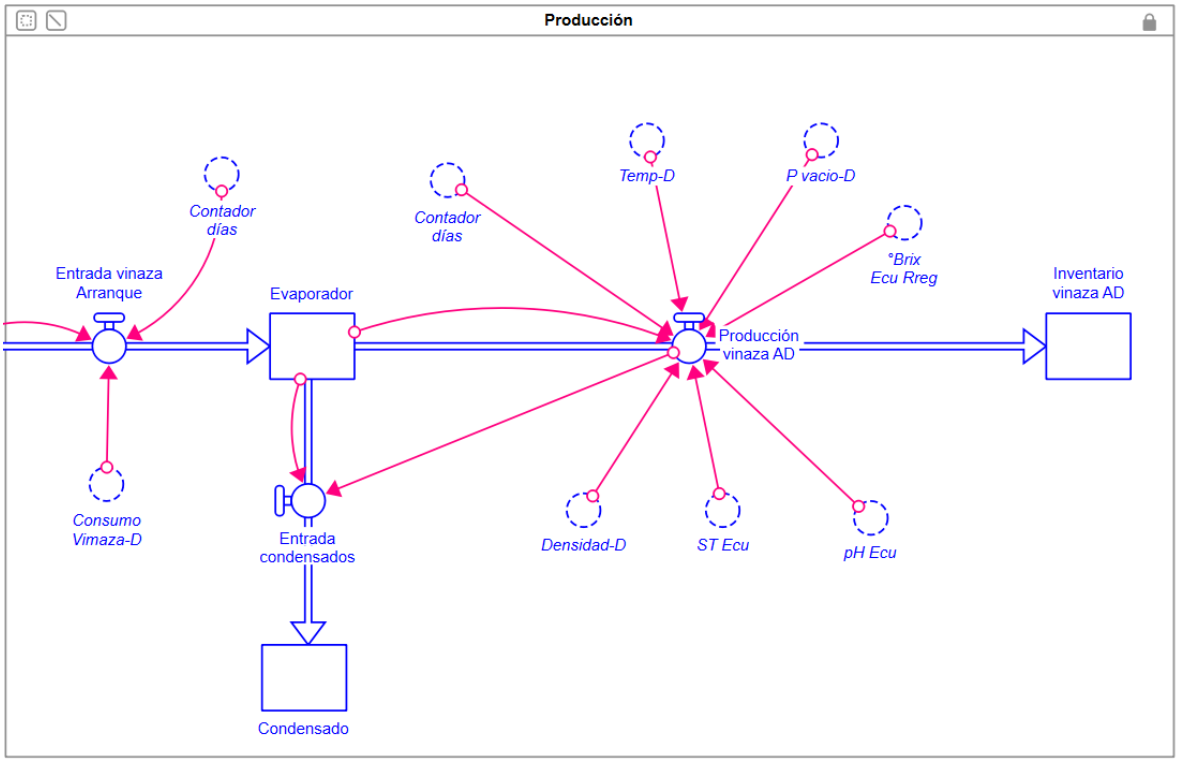


Figura 0.25 Submódulo de producción de vinaza AD

3.4.1.4 Módulo de la demanda

Para simular el comportamiento de la demanda y su impacto en la satisfacción del cliente, se desarrolló un submodelo que presenta las interacciones entre inventario de producto terminado, la demanda diaria y el nivel de cumplimiento de pedidos, con el propósito de reflejar las condiciones operativas y medir el desempeño del sistema.

En la Figura 3.26, se observa la estructura del modelo que cuantifica tanto la frecuencia como el volumen de producto faltante. La variable *Núm_faltante* contabiliza las veces en que la demanda diaria supera el inventario disponible de vinaza AD, indicando las ocasiones que no se logra satisfacer la demanda en su totalidad. Este indicador es fundamental para registrar la frecuencia de desabastecimiento en el sistema.

Por otra parte, la variable *Cantidad_faltante* acumula el volumen total del producto no disponible cada vez que el inventario de vinaza AD se agota, mostrando la magnitud del desabastecimiento. Este valor acumulado permite evaluar el impacto del déficit del inventario

y la producción actual en relación con la demanda. Cabe mencionar que el tanque *Inventario_vinaza_AD* está siendo vaciado por la variable *Dist_demanda* (Figura 3.26).

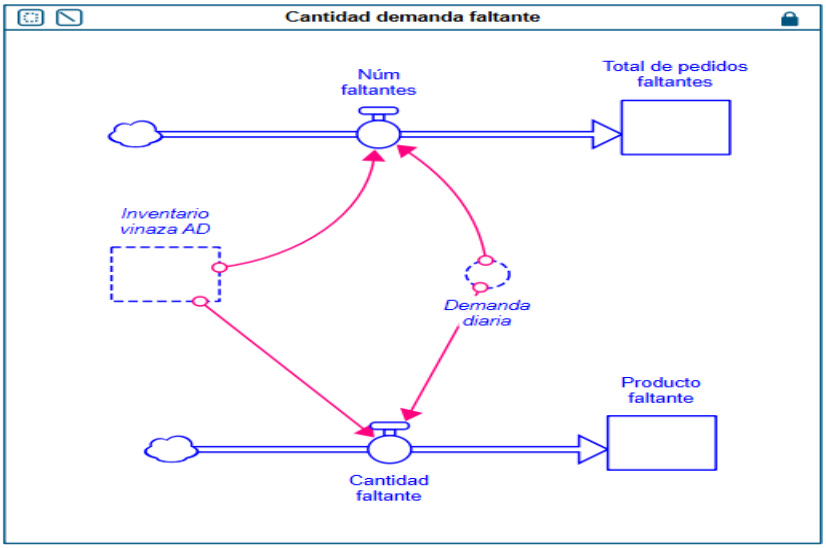


Figura 0.27 Submódulo cantidad demanda faltante

El submódulo de satisfacción del cliente (Figura 3.27) evalúa el cumplimiento de la demanda diaria de Vinaza AD en función a la producción diaria. Las variables *%_Satisfacción_cliente* mide el porcentaje de cumplimiento de la producción con respecto a la demanda. Esta sección proporciona un indicador clave que refleja la capacidad del sistema para satisfacer la demanda y permite evaluar cómo la eficiencia de la producción influye directamente en la satisfacción del cliente.

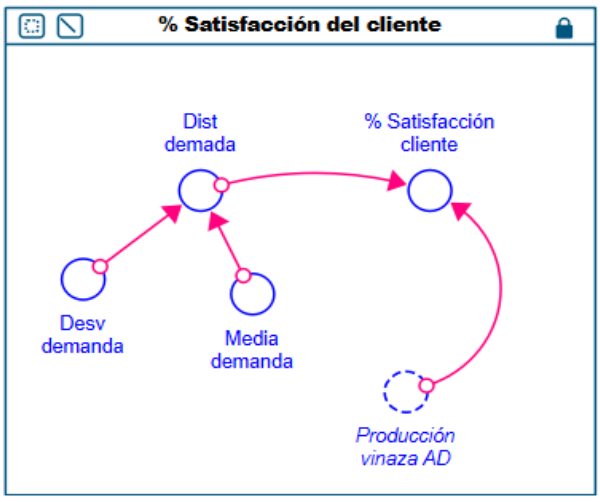


Figura 0.26 Submódulo % satisfacción del cliente

Resultados y discusión

En este capítulo se presenta las fases de verificación e implementación en la modelación con enfoque de DS. Primero, se verifica que el modelo funcione correctamente mediante tres pruebas: la prueba de consistencia dimensional, que asegura la coherencia de las unidades y su correcta interpretación en el modelo, la prueba de valores extremos, que corrobora el funcionamiento lógico del modelo cuando las variables alcanzan valores máximos o mínimos y la prueba de validación estadística, que permite confirmar la similitud de los datos simulados contra los datos reales.

4.1 Prueba de consistencia dimensional

Esta prueba consiste en revisar que las unidades asignadas a cada variable dentro del modelo sean coherentes, de manera que las interacciones entre variables no generen inconsistencias en las unidades, ya que podrían provocar errores en los resultados de la simulación.

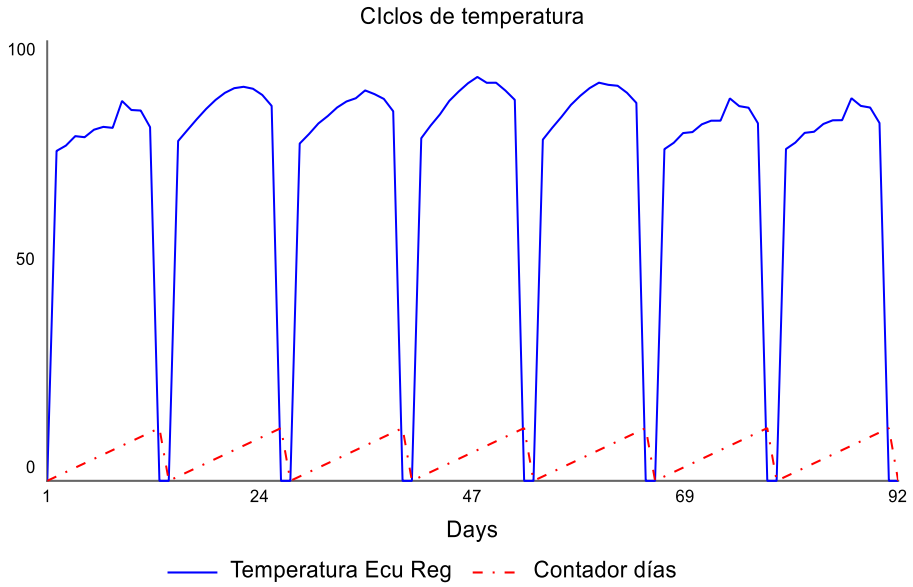
Para asegurar la coherencia, se revisó que las unidades de los parámetros estén correctamente asignadas en el modelo y que todas las variables utilicen las unidades de mediada de la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**.

Tabla 0.1 Unidades de medición (Autoría propia)

Dimensión	Unidad
Temperatura	Grados centígrados (°C)
Presión de vacío	Bares (bar)
Volumen	Metros cúbicos (m^3)
Peso	Toneladas (Ton)
Tiempo	Días

Además, se verifico que cada dimensión tenga un comportamiento lógico y esperado de acuerdo con las condiciones del sistema real. En la Gráfica 4.1 Ciclos de la temperatura se presenta el comportamiento de la temperatura (variable clave para la eficiencia del sistema) pronosticada a lo largo de 8 ciclos de producción, donde se observa como la temperatura aumenta progresivamente con el paso de los días de producción, alcanzando un punto máximo antes de finalizar cada ciclo.

Este patrón de aumento es coherente con respecto al proceso real, ya que, a medida que avanza la producción el sistema acumula calor, lo que incrementa gradualmente la temperatura hasta llegar a un límite operativo. La gráfica muestra un comportamiento lógico y predecible, esto indica que la prueba cumple con la consistencia dimensional.



Gráfica 0.1 Ciclos de la temperatura

4.2 Prueba de valores extremos

La prueba de valores extremos se utiliza para verificar la capacidad del modelo para responder adecuadamente bajo condiciones limite. En el enfoque de DS, esta prueba se apoya en el DC, que tiene validez conceptual desde su diseño. Para identificar las variables que impactan en mayor medida a la producción, se realizó un análisis de correlación (Figura 4.1), en el cual se identificó que el consumo de vinaza es la variable con la mayor correlación respecto a la producción de vinaza AD.

Correlaciones

	Temperatura	°Brix				Consumo
	Ecu Reg P vacio-D	Ecu Rreg Densidad-D		ST Ecu	pH Ecu	Vimaza-D
P vacio-D	0.885					
°Brix Ecu Rreg	0.599	0.686				
Densidad-D	0.599	0.686	1.000			
ST Ecu	0.131	0.116	0.262	0.262		
pH Ecu	0.713	0.718	0.456	0.456	0.263	
Consumo Vimaza-D	0.584	0.629	0.556	0.556	0.375	0.681
Producción vinaza AD	0.626	0.673	0.577	0.577	0.386	0.718

Figura 0.2. Correlación de variables (Autoría propia)

Una vez identificada la variable con mayor impacto en la producción de vinaza AD, se selecciona el bucle B1 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) del DC como referencia para aplicar la prueba de valores extremos.

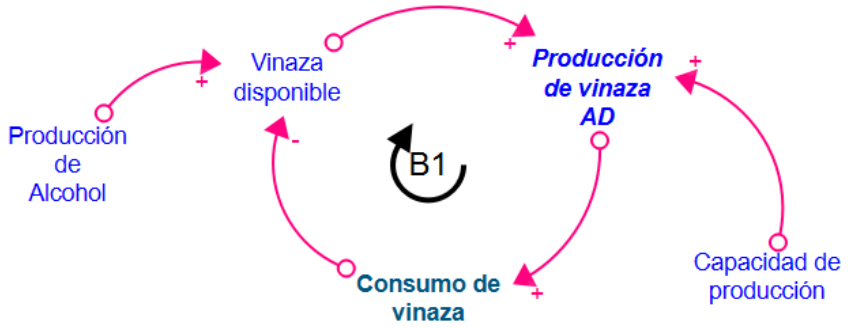


Figura 0.1 Segmento para validación (autoría propia)

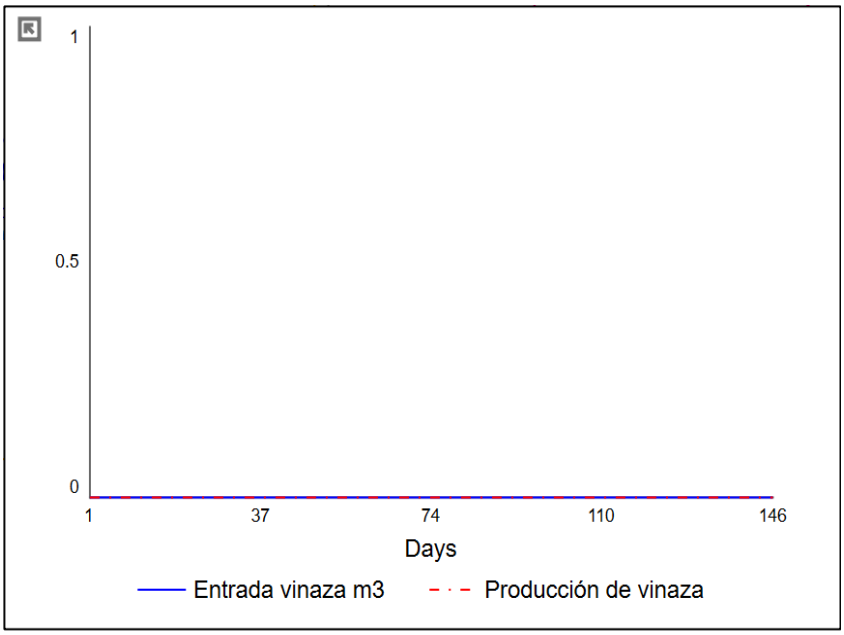
Para validar la prueba, el modelo debe tener un comportamiento lógico ante situaciones extremas. En la primera evaluación, el modelo debe reflejar que no puede haber producción sin vinaza (condición extrema inferior), esta evaluación es clave, debido a que el consumo de vinaza está predicho por una ecuación que involucra múltiples variables. Si esta ecuación no funciona correctamente, podría generar variabilidad adicional en el modelo, afectando la precisión de la producción.

Asimismo, el modelo debe mostrar un comportamiento coherente respecto a su capacidad máxima de producción (condición superior). Esto significa que, independiente de la cantidad de vinaza que se introduzca en los contenedores, los equipos de evaporación están limitados

a una producción máxima de 220 toneladas por día, debido a las restricciones físicas propias del sistema. Los dos escenarios se muestran a continuación.

La Gráfica 4.2 Prueba de valores extremos inferiores (autoría propia) muestra el comportamiento esperado de la producción de vinaza AD bajo condiciones extremas inferiores. En este escenario, la entrada de vinaza al sistema (línea azul) se reduce a cero, lo cual hace que la producción de vinaza (línea roja discontinua) también sea cero durante todo el periodo de simulación. Para reiterar esto, en la Gráfica 4.3, se puede apreciar en los días de mantenimiento, donde no hay entrada de vinaza una producción igual a cero.

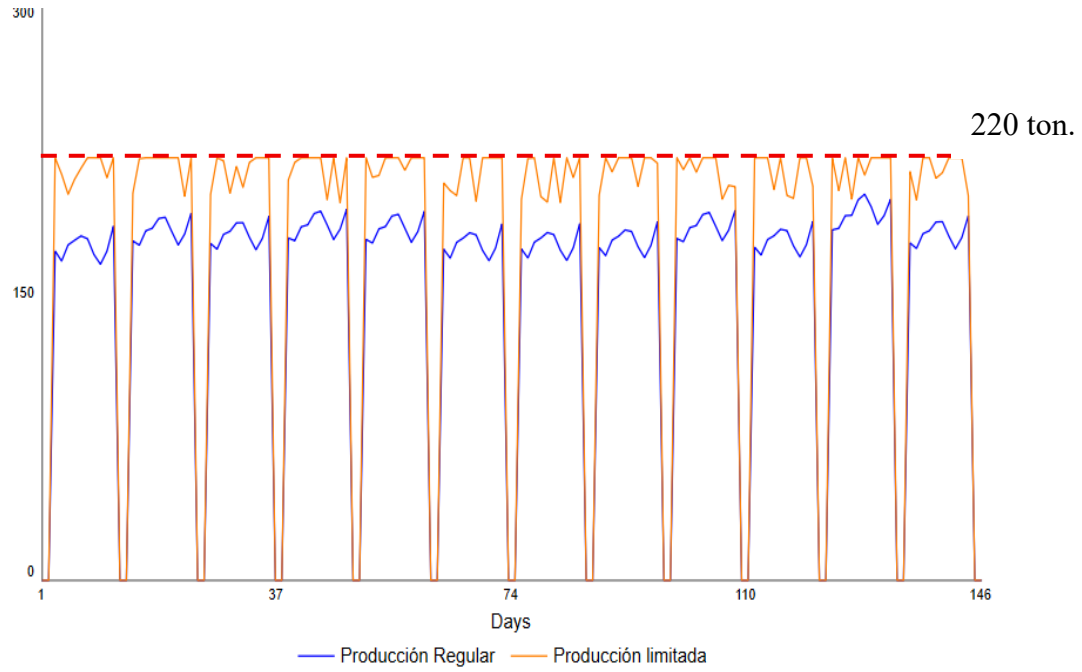
Este comportamiento demuestra que el modelo está correctamente calibrado y refleja las restricciones físicas del sistema real. La producción de vinaza AD, está determinada por una ecuación (Ec.3.10) que incorpora múltiples variables auxiliares para predecir la producción del producto final. Entre estas variables, el consumo de vinaza actúa como variable critica, ya que su valor afecta la producción del producto final. Asimismo, el modelo demuestra su robustez al garantizar que no se genera producción si la variable ***Entrada_vinaza_m3*** (Figura 3.23) no tiene algún valor, independientemente de los resultados de la ecuación, esto refuerza la consistencia y confiabilidad del modelo.



Gráfica 0.2 Prueba de valores extremos inferiores (autoría propia)

El análisis de la capacidad máxima de producción de la vinaza AD se muestra en la Gráfica 4.3, donde se evalúa el comportamiento del sistema al incrementar el consumo diario de vinaza de 1000 a 1300 toneladas. La gráfica muestra dos escenarios: la operación regular, representada por la línea azul, mientras que la línea naranja muestra cómo la producción alcanza el límite máximo permitido sin exceder las restricciones operativas (el limite de producción está representado por la línea punteada roja con un máximo de 220 toneladas).

Este comportamiento demuestra que el modelo esta correctamente calibrado y respeta las limitaciones físicas del sistema real, es decir las capacidades de los equipos de evaporación. A pesar del aumento en la entrada de materia prima, el modelo mantiene la producción dentro de los límites establecidos, evitando sobrestimaciones y garantizando resultados precisos. Además, la comparación entre los dos escenarios corrobora lo robusto del modelo, ya que responde correctamente ante situaciones extremas respetando las restricciones críticas.



Gráfica 0.3 Prueba de valores extremos superior (autoría propia)

4.3 Prueba de validación estadístico

Con la finalidad de validar el desempeño del modelo de simulación y su capacidad para replicar el comportamiento del sistema real en la producción de vinaza AD, se realizó un análisis estadístico utilizando una prueba no paramétrica. Esta elección se fundamentó, ya

que los datos reales no se ajustan a ningún tipo de distribución conocida, lo cual fue corroborado mediante la prueba de bondad de ajuste (Figuras 4.3 y 4.4), donde los valores de ***p*** obtenidos para ambas muestras fueron menores a 0.05. Por lo cual, se seleccionó la prueba de la mediana de Mood, que permite comparar el comportamiento central de ambas muestras sin requerir supuestos de normalidad, proporcionando una alternativa robusta y confiable.

Distribución	AD	P
Normal	2.816	<0.005
Transformación Box-Cox	0.755	0.047
Lognormal	8.680	<0.005
Lognormal de 3 parámetros	2.823	*
Exponencial	17.695	<0.003
Exponencial de 2 parámetros	17.282	<0.010
Weibull	2.905	<0.010

Figura 0.3 Prueba de bondad para datos de producción reales

Distribución	AD	P
Normal	10.005	<0.005
Transformación Box-Cox	1.661	<0.005
Lognormal	13.242	<0.005
Lognormal de 3 parámetros	10.000	*
Exponencial	24.251	<0.003
Exponencial de 2 parámetros	20.213	<0.010
Weibull	7.348	<0.010

Figura 0.4 Prueba de bondad para datos de producción simulados

El planteami*ento* de la prueba es la siguiente:

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencia significativa entre la mediana de los datos reales y la mediana de los datos simulados; $(\eta_1 - \eta_2 = 0)$ *(Ec. 0.1)*

Hipótesis nula (H_1): Existes una diferencia significativa entre la mediana de los datos reales y la mediana de los datos simulados; $(\eta_1 - \eta_2 \neq 0)$ *(Ec. 0.2)*

La Figura 4.5, muestra los resultados obtenidos de la prueba de Mood, donde se obtuvo un valor de p=0.869, lo que indica que no hay evidencia estadística suficiente para rechazar la

hipótesis nula (H_0), por lo tanto, no existe diferencia significativa entre las medianas de ambas muestras. Además, se tiene un intervalo de confianza del 95% para la diferencia entre las medianas, que va de -8.903 a 8.576, incluyendo el valor de cero, respaldando la equivalencia estadística entre ambas muestras. Este análisis corrobora que las diferencias observadas son atribuibles a fluctuaciones aleatorias, validando la confiabilidad del modelo como herramienta predictiva para la producción de vinaza AD.

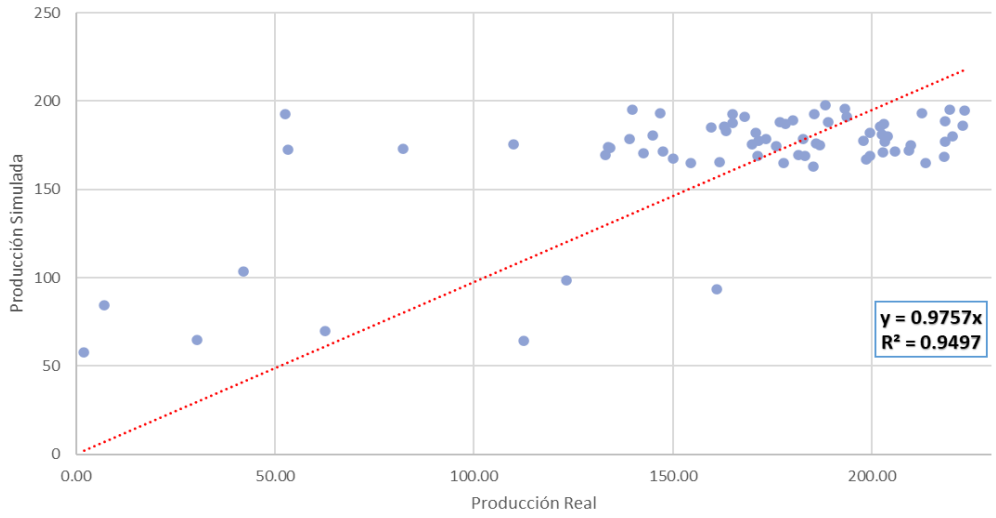
Prueba

Hipótesis nula H_0: Las medianas de población son todas iguales
Hipótesis alterna H_1: Las medianas de población no son todas iguales

GL	Chi-cuadrada	Valor p
1	0.03	0.869

Figura 0.5 Prueba no paramétrica de Mood para la producción de vinaza AD

Asimismo, en la Grafica 4.4 se analizó la relación entre la producción real y producción simulada mediante una gráfica de dispersión, en el cual se obtuvo un R^2 de 0.9497, indicando una correlación muy alta entra ambas variables, lo que respalda la capacidad del modelo para replicar el comportamiento del sistema real.



Gráfica 0.4 Gráfica de dispersión de producción AD

4.4 Resultados

En esta sección se presenta un análisis de los resultados obtenidos a partir del modelo de simulación desarrollado para evaluar la eficiencia del proceso de evaporación de vinaza. Con la finalidad de identificar y cuantificar el impacto de las variables críticas sobre el desempeño del sistema, proporcionando información clave para optimizar la toma de decisiones operativas y mejorar la gestión de recursos.

El modelo de simulación permite analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas, evaluando variables clave; como la presión de vacío, la temperatura, y el consumo de vinaza. Estas variables no tan solo reflejan el rendimiento del sistema de evaporación, sino también aportan visión conjunta de los factores que influyen directamente en la eficiencia de producción.

Dentro del análisis realizado, se busca identificar patrones, correlaciones y áreas de oportunidad para la mejora continua del proceso productivo. Los resultados presentados incluyen tanto el comportamiento general del modelo base, que representa las condiciones operativas actuales, como los escenarios adicionales evaluados en el modelo anexo. Dichos escenarios complementan el análisis, ya que exploran condiciones específicas y extremos operativos, permitiendo una comprensión más profunda del sistema.

Adicionalmente, para garantizar que los resultados sean representativos, se determinó el número optimo de corridas necesarias para cada simulación, considerando las distribuciones de probabilidad presentes en los parámetros del modelo. Esto garantiza que los valores promedio obtenidos sean confiables y estadísticamente significativos. El cálculo se realizó utilizando la siguiente ecuación (Ramos, 2016):

$$n*(\beta) = \min\{i \geq n: T_(i-1,1-\alpha/2)\sqrt{(s\^2/i \leq \beta)}\} \quad \textit{(Ec. 0.3)}$$

En la ecuación Ec. 4.3, ***n*** representa el número optimo de corridas como una función del erro absoluto (***β***). Por lo que, al promediar los valores obtenidos de las corridas optimas, se espera con un $(1-\alpha) * 100\%$ de confianza que el valor medio tenga un error absoluto no mayor a ***β.*** Cabe mencionar que, el valor de ***β*** es definido por los directivos de la empresa en función del tipo de variable a analizar.

4.4.1 Modelo base

El modelo base representa las condiciones operativas actuales del sistema de evaporación de vinaza, considerando las variables críticas que afectan al proceso. Dichas variables son; temperatura, presión de vacío, pH, solidos totales, densidad, grados brix y cantidad de vinaza (materia prima). Es importe mencionar que, los datos históricos presentaban alta variabilidad y no seguían alguna distribución, se optó por modelar las variables mediante simulaciones basadas en ecuaciones de regresión ajustadas (Ec 3.10). Esto permitió replicar de manera eficiente y precisa las fluctuaciones de los ciclos de producción.

Para verificar la validez de los datos simulados, se realizaron pruebas de hipótesis no paramétricas (Man-Whitney), las cuales demostraron que no existía diferencias estadísticas significativas entre los datos simulados y los reales. Los resultados de estas pruebas, presentados en el Capítulo 3, respaldan la confiabilidad del modelo para representar con precisión las condiciones reales del proceso.

En el modelo de simulación desarrollado para la evaporación de vinaza, se plantea una operación unitaria coordinada entre la planta de producción alcohol, que actúa como proveedora de materia prima y la planta de evaporación, encargada de producir vinaza AD (alta densidad). La coordinación de ambas plantas es fundamental para asegurar el suministro constante de vinaza. Para iniciar un ciclo de producción, es necesario contar con al menos 50 toneladas de vinaza, además, se debe considerar una pérdida del 5% en la materia prima por la evaporación de la vinaza.

El ciclo operativo de la planta consiste en 10 días de producción continua, seguidos de 2 días de mantenimiento. Durante los días de operación, la producción de vinaza AD es influenciada por tres variables principales: la presión de vacío, la temperatura y el consumo de vinaza.

Estas variables han sido identificadas como los principales indicadores de rendimiento del sistema, ya que cualquier variación en sus valores puede afectar la eficiencia del proceso.

Si bien otros parámetros también influyen en el desempeño del sistema, como el pH, los grados brix iniciales, la densidad, y los sólidos totales, su manipulación en la operación es más compleja, ya que depende de las características de la materia prima y no pueden ajustarse fácilmente en tiempo real. En contraste, la temperatura y el consumo de materia prima pueden regularse durante el proceso productivo, permitiendo un control más eficiente sobre la presión de vacío y su impacto en la eficiencia del sistema. Por esta razón, la temperatura, la presión de vacío y el consumo de vinaza se consideran las variables principales para evaluar el comportamiento del proceso y su optimización.

Para corroborar el impacto que tiene las variables críticas en la producción de vinaza AD, se realizó un análisis de regresión con un intervalo de confianza del 95% (Figura 4.6). Los resultados muestran que el consumo de vinaza presenta la mayor relación con producción ($r=0.997$). Por otra parte|, la temperatura y la presión de vacío muestran una relación significativa con valores de correlación $r=0.943$ y $r=0.921$ respectivamente. Estos resultados indican que, si bien el consumo de vinaza es el principal determinante de producción, las condiciones operativas afectan significativamente la estabilidad y el rendimiento del proceso.

Es importante destacar que estas variables no solo afectan la producción individualmente, sino que también interactúan entre sí. En el caso, de la temperatura y la presión de vacío están directamente relacionadas ($r=0.920$), lo que implica que un incremento en la temperatura conlleva un aumento en la presión de vacío y viceversa. Sin embargo, este comportamiento no implica una mejora en la eficiencia del sistema, sino todo lo contrario. Por lo cual, es importante mantener un equilibrio en estos parámetros operativos, asegurando que las condiciones del sistema sean óptimas para maximizar la producción sin comprometer la estabilidad del proceso.

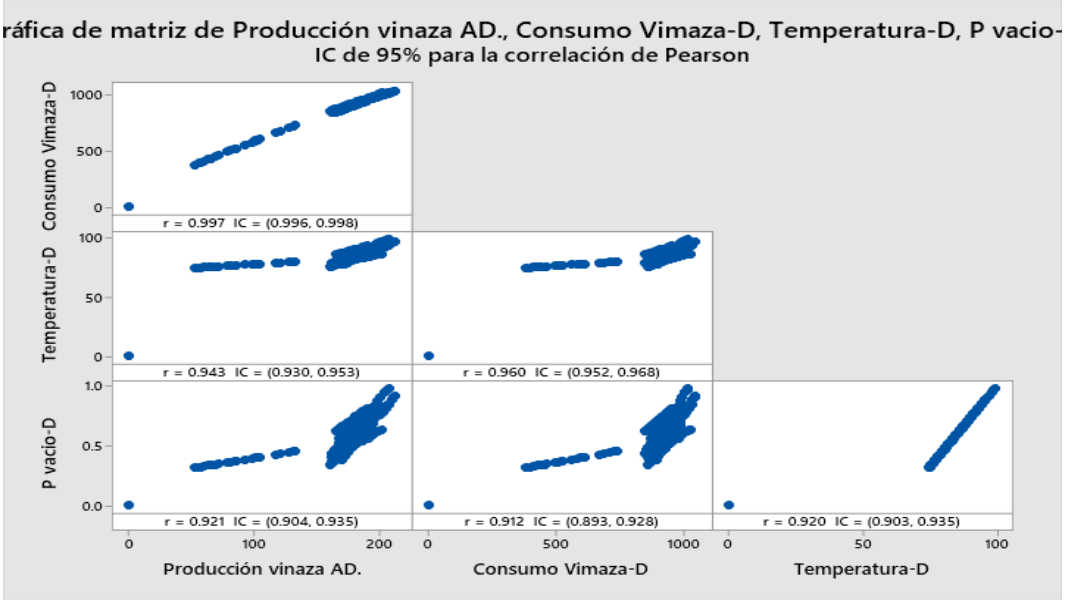
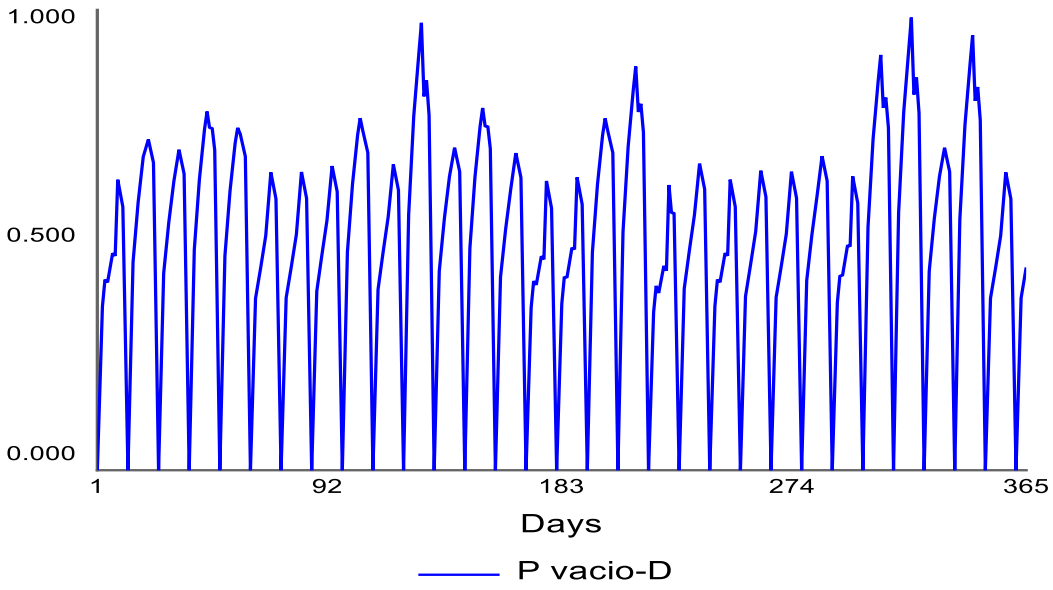


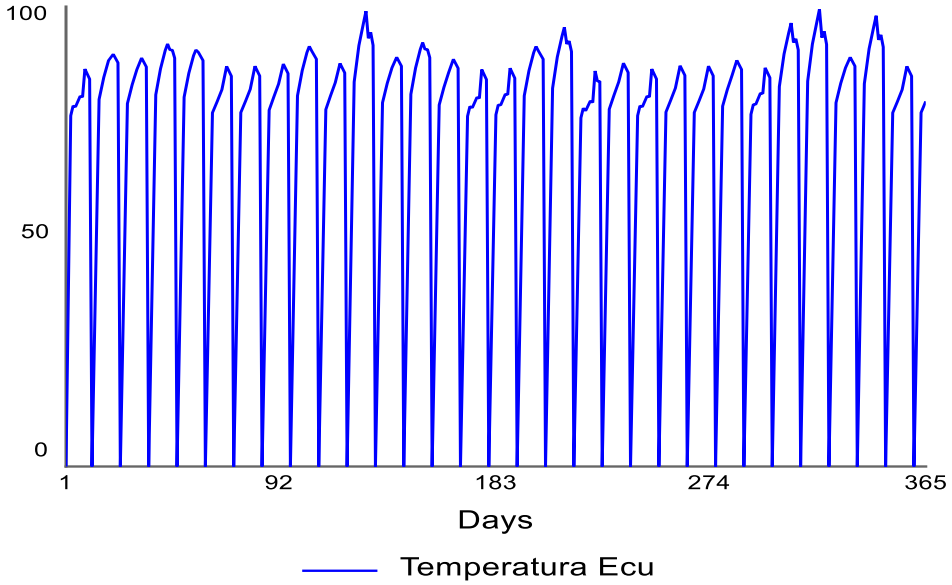
Figura 0.6 Correlación variables críticas y producción.

Dado lo anterior, se inicia observando el comportamiento de la presión de vacío. En la Gráfica 4.5, se observa un patrón oscilante a lo largo de los ciclos de producción, donde, inicia en niveles bajos de 0.39 bares en promedio y aumenta progresivamente alcanzado hasta los 0.98 bares, esto ocurre debido a la perdida gradual de vacío en los equipos, lo que afecta la capacidad productiva.



Gráfica 0.5 Indicador de presión vacío (autoría propia)

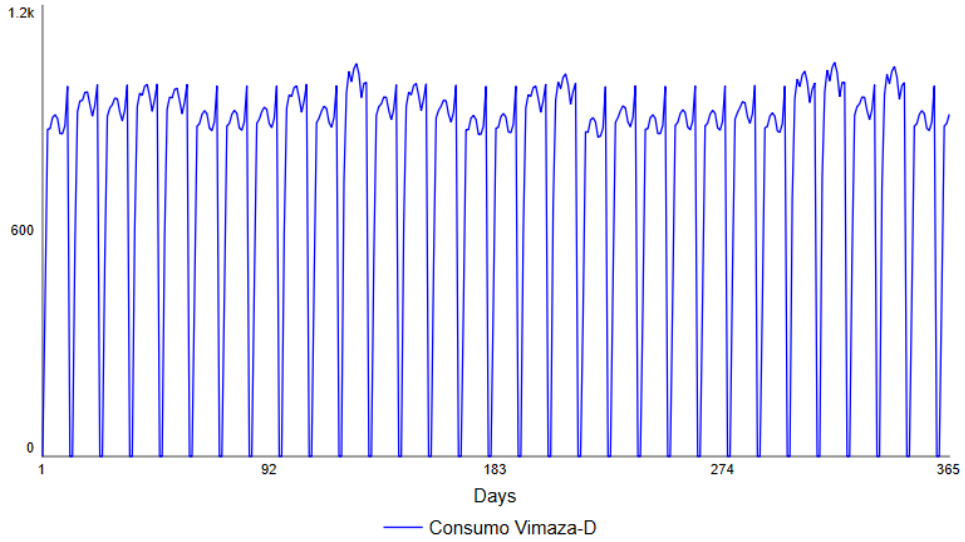
La temperatura, por su parte, también muestra un comportamiento oscilante a lo largo del ciclo de producción con un promedio de 76°C y un máximo de 99°C. Este patrón refleja la influencia de la presión de vacío, cuya variabilidad impacta la estabilidad térmica del sistema. La Gráfica 4.6 muestra esta dinámica, evidenciando como los cambios de la temperatura están presentes en todos los ciclos simulados.



Gráfica 0.6 Indicador de temperatura (autoría propia)

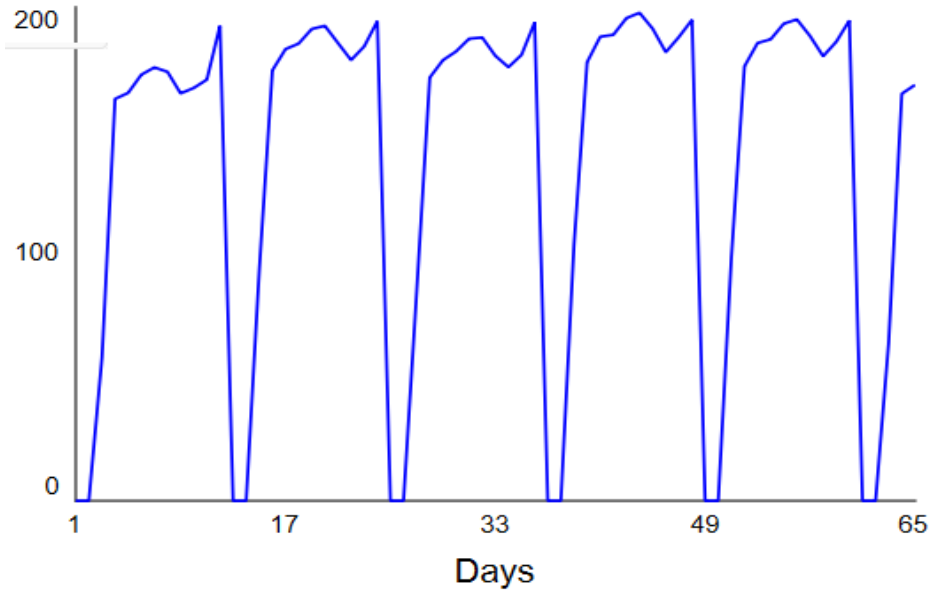
El consumo de vinaza presenta un comportamiento predecible a lo largo del ciclo de producción (Gráfica 4.7). Inicialmente, el consumo es bajo y aumenta gradualmente a medida que avanzan los días, estabilizándose hasta el día 6. A partir de este punto, se identifica una disminución significativa en la producción, debido a que los parámetros de la temperatura y la presión descienden afectando la eficiencia del sistema.

Además, la gráfica muestra un incremento en la producción en los dos últimos días. Sin embargo, este aumento no es por un control eficiente en los parámetros operativos, sino a una estrategia correctiva para compensar perdidas en la producción y alcanzar objetivos establecidos.



Gráfica 0.8 Indicador de consumo de vinaza

Por último, la Gráfica 4.8 muestra la evaluación del comportamiento en la producción de vinaza AD a lo largo de los cinco ciclos, comprobando que existen variaciones significativas. Se observa un patrón oscilante con incrementos y caídas abruptas, lo que refleja un control operativo limitado sobre la estabilidad del proceso. Asimismo, al final de cada periodo, la producción presenta un aumento. Sin embargo, este incremento no se debe a un control eficiente de los parámetros operativos, sino a un esfuerzo por alcanzar las metas de producción establecidas.



Gráfica 0.7 Comportamiento de la producción de vinaza AD

Para complementar el análisis gráfico anterior, la Tabla 4.2 presenta una visión detallada de los principales parámetros operativos del sistema a lo largo de cinco ciclos de producción. A través de estos datos es posible identificar patrones de comportamiento en la temperatura, la presión de vacío y el consumo de vinaza, los cuales impactan directamente la producción de vinaza AD. Se observa que, conforme avanzan los días dentro de cada ciclo los valores tienden a estabilizarse antes de experimentar un crecimiento gradual, lo que afecta la eficiencia del proceso de evaporación. Asimismo, el análisis de esta información permite correlacionar la variabilidad de los parámetros con la eficiencia del sistema, facilitando la identificación de tendencias y la posible implementación de estrategias de control para optimizar el rendimiento del proceso.

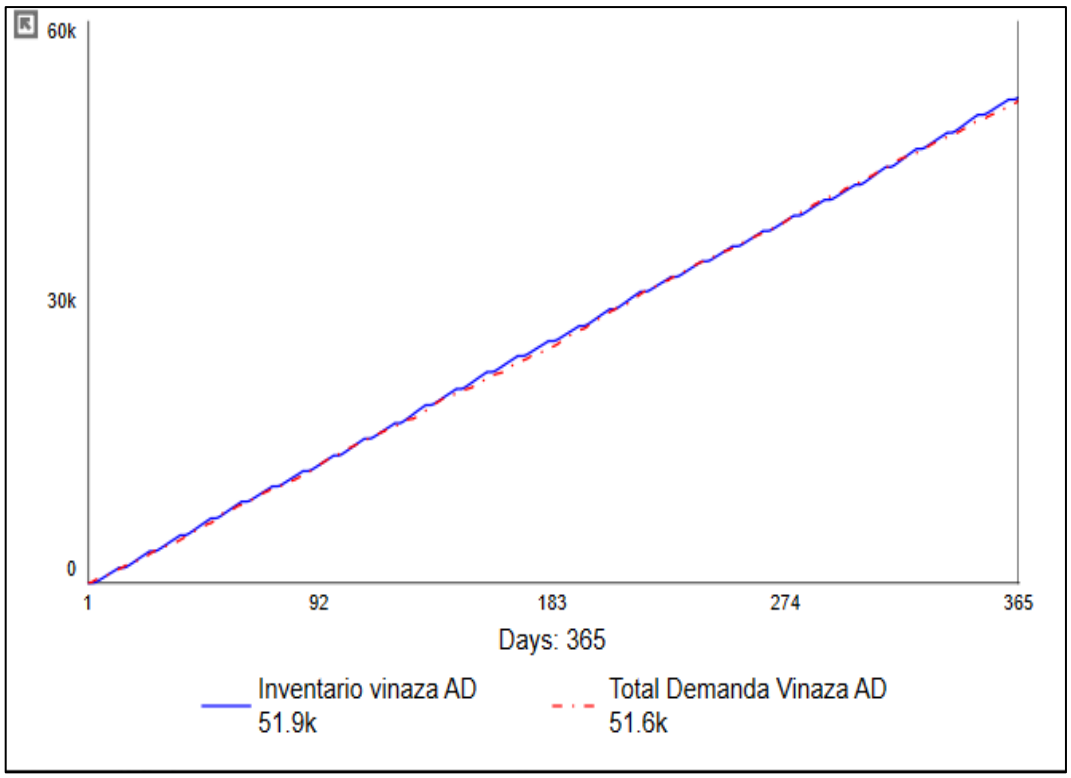
Tabla 0.2 Parámetros principales del modelo

Ciclo	Día	Temperatura (°C)	Presión de vacío (bar)	Consumo Vinaza (ton)	Producción vinaza AD (ton)
1	1	75.06	0.32	402.50	57.80
	2	76.28	0.36	870.56	162.93
	3	78.43	0.41	872.31	165.37
	4	78.19	0.41	901.92	172.73
	5	79.89	0.45	909.36	175.70
	6	80.54	0.47	899.57	173.91
	7	80.32	0.47	859.48	165.16
	8	86.43	0.63	859.03	167.36
	9	84.38	0.58	880.90	170.74
	10	84.25	0.57	985.30	192.51
2	1	77.32	0.38	561.95	93.62
	2	79.82	0.45	917.24	174.52
	3	82.30	0.52	946.03	183.11
	4	84.63	0.58	947.94	185.35
	5	86.66	0.64	968.61	191.27
	6	88.28	0.68	970.09	192.56
	7	89.34	0.71	936.25	185.59
	8	89.66	0.72	905.47	178.67
	9	89.22	0.71	934.82	184.20
	10	87.80	0.67	990.13	194.44
3	1	76.75	0.37	521.55	84.55
	2	78.92	0.43	905.42	171.59
	3	81.32	0.49	927.35	178.62
	4	83.00	0.54	936.28	182.15

	5	84.95	0.59	953.60	187.33
	6	86.32	0.63	952.22	187.83
	7	87.05	0.65	916.80	180.42
	8	88.84	0.70	893.71	175.80
	9	87.99	0.67	921.16	180.79
	10	86.90	0.64	988.91	193.95
4	1	77.96	0.40	607.13	103.78
	2	80.83	0.48	930.47	177.81
	3	83.39	0.55	966.92	188.14
	4	86.46	0.63	960.99	188.92
	5	88.58	0.69	985.40	195.69
	6	90.47	0.74	990.07	197.85
	7	91.90	0.78	958.00	191.38
	8	90.57	0.74	918.63	181.87
	9	90.59	0.74	950.10	188.02
	10	88.80	0.70	991.50	194.98
5	1	77.63	0.39	584.13	98.61
	2	80.32	0.47	923.74	176.14
	3	82.83	0.53	956.29	185.58
	4	85.53	0.61	954.35	187.10
	5	87.60	0.66	976.85	193.44
	6	89.35	0.71	979.90	195.16
	7	90.60	0.74	946.93	188.44
	8	90.10	0.73	911.93	180.24
	9	89.89	0.72	942.32	186.08
	10	88.29	0.68	990.80	194.71

Por último, la Gráfica 4.9 presenta la relación entre el inventario acumulado de vinaza AD (línea azul) y la demanda total acumulada (línea roja) a lo largo de un año. Ambas líneas indican un comportamiento paralelo, lo que refleja que la producción se ajusta a la demanda actual.

El análisis muestra que la eficiencia promedio del sistema es del 100.6%, lo que significa que, en condiciones normales, la planta logra satisfacer la demanda sin generar excedentes significativos. Sin embargo, esta condición también implica que la producción opera al límite de su capacidad, dejando poco margen operativo ante variaciones en la demanda o posibles interrupciones en el proceso.



Gráfica 0.9 Inventario de producto final y demanda del producto (autoría propia)

4.4.2 Indicadores de desempeño

Para evaluar la eficiencia del sistema de producción de vinaza AD, se analizaron indicadores clave bajo diferentes condiciones operativas. En específico, se han identificado tres escenarios que permiten comprender el impacto de la estabilidad en la capacidad de producción y eficiencia del sistema, los cuales son: condiciones normales, estables y deficientes. Los parámetros seleccionados para el análisis son: consumo de vinaza, temperatura y presión de vacío. Estos fueron elegidos, ya que pueden ser controlados mediante la regulación de los equipos o modificando condiciones operativas en tiempo real durante el proceso de evaporación. En la Tabla 4.3, se detallan las condiciones evaluadas en cada escenario.

Tabla 0.3 Escenarios para evaluación de indicadores

Escenario	Consumo de vinaza (ton)	Temperatura (°C)	Presión de vacío (bares)	Días de mantenimiento
Prod. normal	400 - 1100	74 - 99	0.31 - 0.99	1,2 y 3
Prod. estable	800 - 900	75 - 83	0.40 – 0.50	1,2 y 3
Prod. deficiente	500 - 600	97 - 99	0.90 – 1.00	1,2 y 3

Es importante señalar que no se ha considerado un escenario con valores por encima de los límites permitidos por la maquinaria. Por lo que, a menos que se realice modificaciones en la infraestructura para aumentar la capacidad productiva, no es posible incrementar la producción más allá de los parámetros evaluados en este estudio.

Cada escenario refleja una configuración operativa especifica que permite evaluar cómo la variabilidad de los parámetros influye en la producción de la vinaza AD. Este análisis busca cuantificar el impacto de operar en condiciones óptimas en comparación con escenarios donde los parámetros son inestables o están fuera de los rangos recomendados.

4.4.2.1 Análisis de sensibilidad en función a diferentes parámetros de producción.

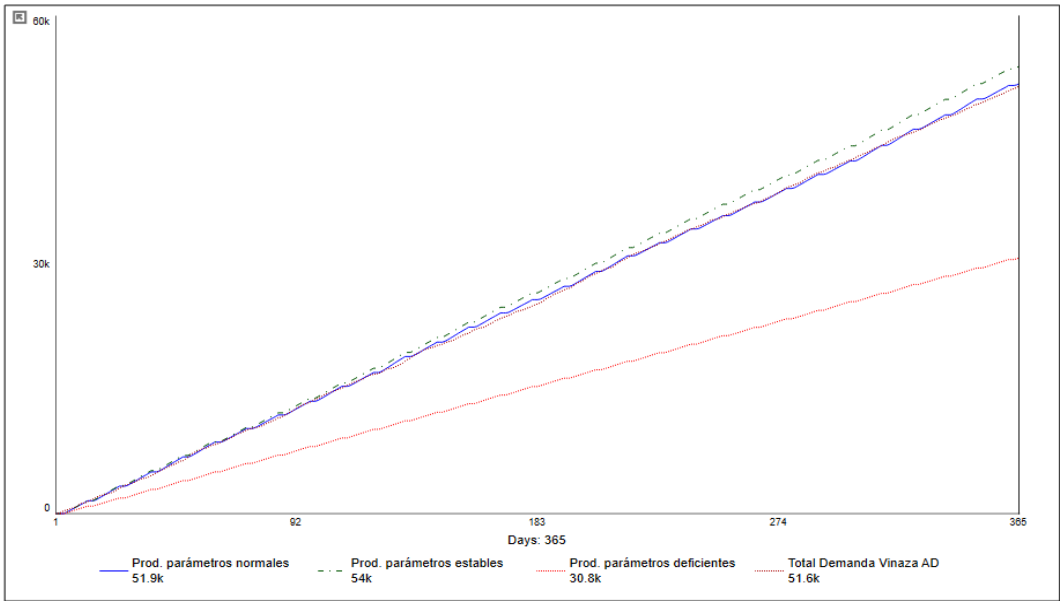
Con el objetivo evaluar el rendimiento del sistema de evaporación de vinaza AD bajo diferentes condiciones operativas, se desarrolló un análisis de escenarios que combinan variaciones en los parámetros críticos del proceso y en la frecuencia de los días de mantenimiento programado. Este análisis permitirá identificar que configuraciones pueden cumplir con la demanda anual de producción, estimada en 51.6 mil toneladas, así como identificar las limitaciones actuales del sistema cuando se opera bajo condiciones inestables.

En la Tabla 4.3, se establecieron los tres escenarios principales según el comportamiento de los parámetros clave: consumo de vinaza, temperatura y presión de vacío. Dichos escenarios se definieron como: producción normal, producción estable y producción deficiente. En cada uno de estos casos, se mantuvo una frecuencia de 2 días de mantenimiento por cada 10 días de operación, para evaluar el efecto directo de la estabilidad de los parámetros de la producción acumulada anual.

La Gráfica 4.10 presenta una comparación inicial entre los tres escenarios bajo condiciones constantes de mantenimiento. Lo resultados muestran lo siguiente:

- Producción normal: La producción acumulada de 51.9 mil toneladas, lo cual representa el 100.6% de la demanda. Si bien se alcanza la meta anual, se observa que el margen de producción es extremadamente reducido (alrededor de 300 kilogramos por encima del objetivo). Esto significa que cualquier variación en los parámetros o interrupción no prevista pueden comprender el cumplimiento de la demanda, además de que también existe sedimento cuando se almacena el producto terminado.
- Producción estable: Este escenario representa condiciones ideales, donde los parámetros se mantiene dentro de sus rangos óptimos. La producción asciende a 54 mil toneladas, lo que representa el 104.7 % de la demanda. Este resultado demuestra una mejora en la eficiencia operativa generando un margen adicional de 2.4 mil toneladas. Sin embargo, este escenario tiene limitaciones estructurales y de capacidad de producción, lo que implica que cualquier variación en la demanda continuaría representando un reto significativo, ya que la planta no puede exceder las capacidades máximas permitidas por su maquinaria.
- Producción deficiente: Al tener parámetros fuera de los rangos recomendados, la producción se reduce drásticamente a 30.8 mil toneladas, lo que equivale al 59.7% de la demanda. Este resultado evidencia que el sistema pierde más de 40% de su capacidad cuando opera bajo condiciones inestables, generando un riesgo significativo tanto para la producción como para el cumplimiento de pedidos.

Los resultados de los tres escenarios analizados muestran que la planta puede tener dificultades para mantener un desempeño eficiente aun cuando los parámetros están controlados. Esta falta de control compromete directamente a la estabilidad del sistema, ya que cada día en condiciones inestables impacta negativamente la productividad y limita la capacidad de la planta para satisfacer la demanda esperada.



Gráfica 0.10 Escenarios de producción de vinaza AD

4.4.2.2 Análisis de la producción en función de diferentes escenarios y días de mantenimiento

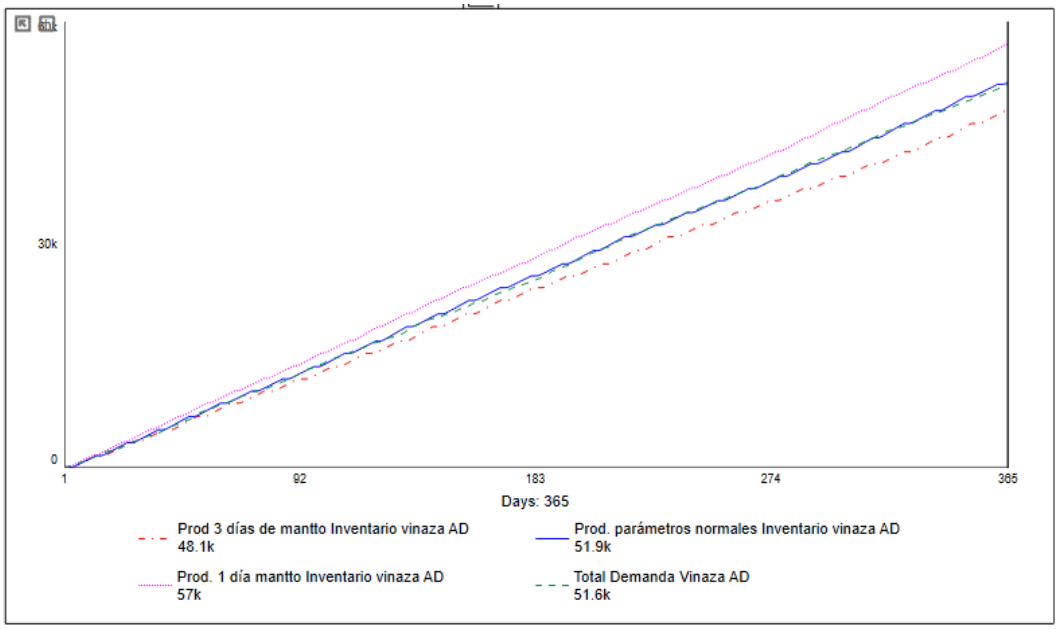
Esta sección tiene como objetivo evaluar cómo influyen los diferentes escenarios operativos en la capacidad del sistema para cumplir con la demanda anual de vinaza AD, considerando diferentes días de mantenimiento programados. Para ello, se analizaron combinaciones de escenarios (producción normal, estable y deficiente) con distintas configuraciones de mantenimiento (1, 2 y 3 días de por cada 10 días de operación), simulando el comportamiento del sistema a lo largo de un año.

Este análisis resulta fundamental para entender la sensibilidad del sistema ante variaciones en los parámetros críticos operativos, y cómo estas impactan en la eficiencia general del proceso. A través de este enfoque se busca determinar bajo qué condiciones es posibles cumplir con la demanda (51.6 mil toneladas al año) sin comprometer la estabilidad ni operar al límite de la capacidad.

En la Gráfica 4.11, se muestran los resultados de la producción anual acumulada bajo condiciones normales para cada configuración de mantenimiento:

- Con 3 días de mantenimiento, la producción acumulada es de 48.1 mil toneladas, alcanzando el 93.2 % de la demanda, con un déficit de 3.5 mil toneladas respecto a los requerimientos establecidos.
- Con 2 días de mantenimiento, se alcanza una producción de 51.9 toneladas con una eficiencia del 100.6%, permitiendo cumplir con la demanda anual, aunque con un margen mínimo de 0.3 toneladas.
- En el caso de 1 día de mantenimiento, la producción asciende a 57 mil toneladas, superando la demanda en 5.4 toneladas, con una eficiencia del 110.5%.

Los tres escenarios permiten cumplir con la demanda, pero operar con uno o dos días de mantenimiento ofrece márgenes más seguros. Sin embargo, reducir el mantenimiento al mínimo podría aumentar el riesgo de fallas si no se acompaña de una estrategia de supervisión y mantenimiento adecuado

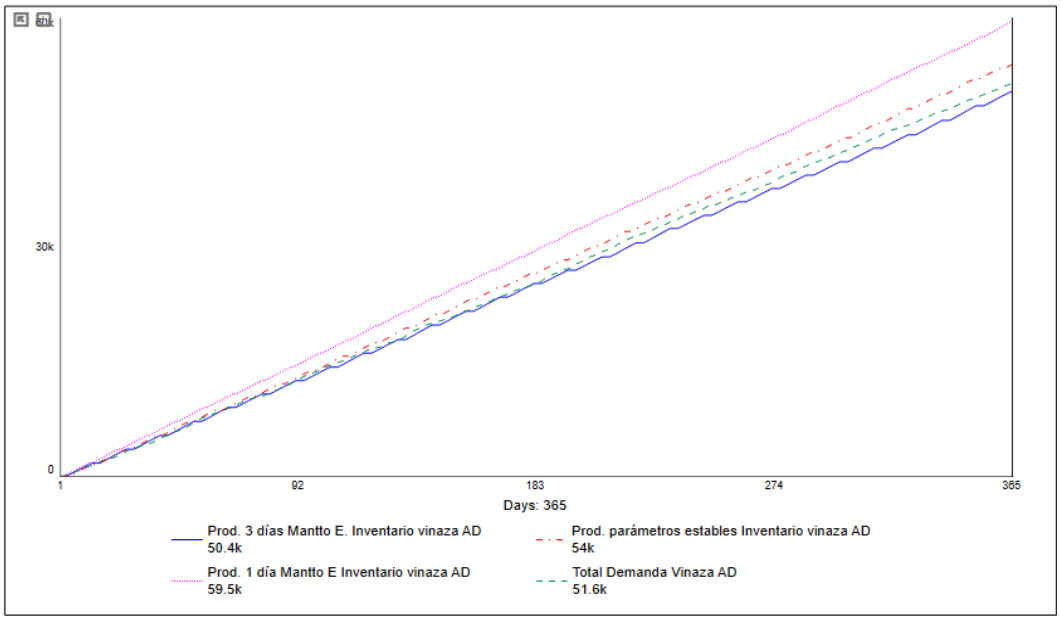


Gráfica 0.11 Producción normal con diferentes días de mantto.

La Grafica 4.12, se muestran los resultados de la producción bajo parámetros estables, los datos para cada escenario son los siguientes:

- El escenario con 3 días de mantenimiento, la producción acumulada es de 50.4 mil toneladas, equivalentes al 97.7% de la demanda anual, esto refleja un déficit de 1.2 mil toneladas con respecto al objetivo.
- Con 2 días de mantenimiento, la producción alcanza las 54 mil toneladas, logrando una eficiencia del 104.7%. con un excedente de 2.4 mil toneladas por encima de la demanda.
- Con 1 día de mantenimiento, la producción acumulada es de 59.5 mil toneladas, con una eficiencia del 115%, superando la demanda en 7.9 mil toneladas.

Bajo condiciones estables, el sistema presenta su mejor desempeño. Incluso con tres días de mantenimiento, se mantiene cerca de cubrir la demanda. Al reducir los días de mantenimiento, se incrementa notablemente la eficiencia, demostrando la solidez del proceso cuando trabajo dentro de los rangos óptimos.

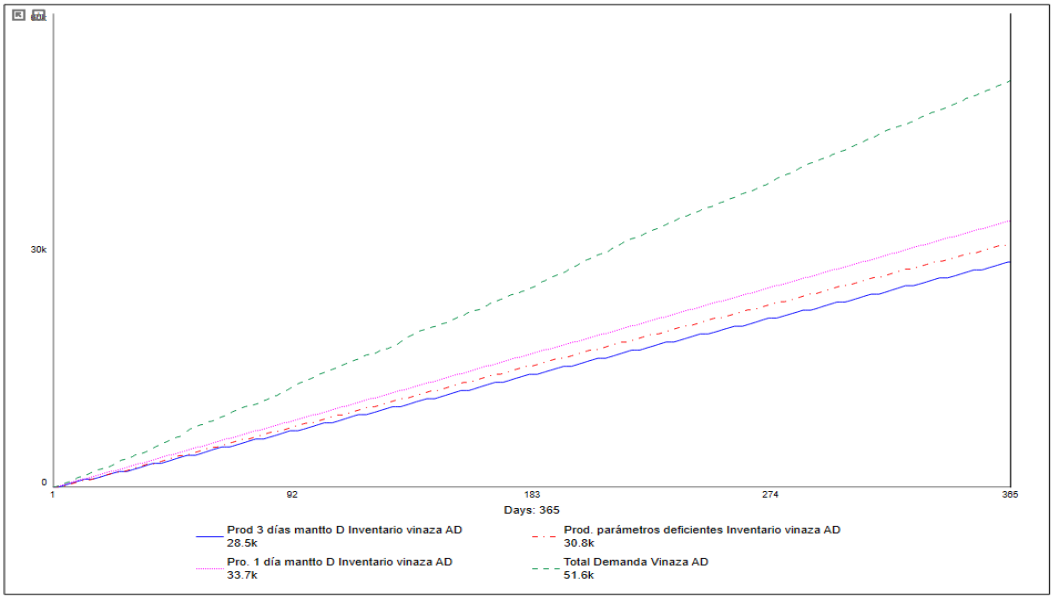


Gráfica 0.12 Producción estable con diferentes días de mantto

Los resultados de la producción con condiciones deficientes se muestran en la Gráfica 4.13, con los siguientes datos:

- Con 3 días de mantenimiento, la producción acumulada es de 28.5 mil toneladas, lo que representa el 55.2% de la demanda anual, dejando un déficit de 23.1 mil toneladas.
- Con 2 días de mantenimiento, la producción alcanza 30.8 mil toneladas, representando el 59.7% de la demanda, con un faltante de 20.8 mil toneladas.
- En el caso de 1 día de mantenimiento, la producción acumulada alcanza 33.7 mil toneladas, lo que equivale al 65.3% de la demanda anual, dejando un déficit de 17.9 mil toneladas.

Incluso con una reducción drástica de los días de mantenimiento el sistema no logra acercarse al cumplimiento de la demanda bajo condiciones deficientes. Esto evidencia que el mantenimiento no compensa los efectos de trabajar fuera de los rangos recomendados.



Gráfica 0.13 Producción deficiente con diferentes días de mantto.

4.4.2.3 Análisis de distribución de producción diaria

Después de analizar los resultados de la producción, es importante comparar el rendimiento de cada escenario con respecto al mejor desempeño evaluado. Para ello, se utiliza una medida de eficiencia relativa, la cual permite identificar que tan cerca se encuentra cada combinación del máximo nivel productivo alcanzado en la simulación. Esta comparación facilita entender cuales escenarios aprovechan mejor la capacidad del sistema.

La eficiencia relativa (ER) se calculó con la siguiente formula:

$$Eficiencia\ relativa\ (\%) = \left(\frac{producción\ del\ escenario}{produccion\ máxima\ observada}\right) * 100 \qquad (Ec.\ 0.4)$$

La Tabla 4.4 resume los resultados obtenidos, permitiendo visualizar la brecha de eficiencia entre los distintos escenarios operativos. El caso escenario Estable – 1 día de mantto., alcanza el valor más alto de eficiencia relativa (100%). A partir de esto, es posible notar cómo disminuye la eficiencia al modificar las condiciones operativas.

Tabla 0.4 Eficiencia relativa de la producción

Escenario (Parámetros – días mantto.)	Producción (toneladas)	Cumplimiento (%)	Eficiencia relativa (%)
Estable – 1 día de mantto.	59.5	115	100
Normal – 1 día de mantto.	57	110.5	95.8
Estable – 2 días	54	104.7	90.8
Normal – 2 días	51.9	100.6	87.2
Estable – 3 días	50.4	97.7	84.7
Normal – 3 días	48.1	93.2	80.8
Deficiente – 1 día	33.7	65.3	56.6
Deficiente – 2 días	30.8	59.7	51.8
Deficiente – 3 días	28.5	55.2	47.9

Como se observa, cuando se compararan escenarios con 1 día de mantenimiento, pero con condiciones operativas diferentes, la eficiencia relativa se reduce al 95.8% (escenario

normal). Esta diferencia indica una perdida en el rendimiento, aun cuando se cumple con la demanda anual.

Asimismo, los escenarios con dos días de mantenimiento (estable y normal) muestran una eficiencia relativa de 90.8% y 87.2%, respectivamente. Estos escenarios permiten cumplir con la demanda actual, sin embargo, la eficiencia operativa se reduce entre un 9% y 13%, lo que podría llevar a mayores costos operativos o menor aprovechamiento de los recursos disponibles.

Por otro lado, los escenarios con tres días de mantenimiento presentan la eficiencia más baja y ninguna cumple con la demanda. En el caso del escenario con parámetros estables y 3 días de mantenimiento solo alcanza un 84.7% de eficiencia relativa, por lo tanto, el rendimiento se reduce un 15.3%, incluso cuando se opera con parámetros óptimos.

Con base a los resultados obtenidos, se confirma que reducir los días de mantenimiento incrementa la productividad. Sin embargo, esto también eleva el riesgo de fallas críticas, ya que el mantenimiento es esencial para garantizar la eficiencia del proceso. Por lo tanto, aunque se logre una mayor producción, puede comprometerse la calidad del producto y el deterioro de los equipos.

4.4.2.4 Análisis de incremento del consumo de vinaza con parámetros estables.

Se evaluó un escenario que introduce un incremento de 60 toneladas en el consumo de vinaza durante los días 4 al 8 de cada ciclo, periodo en donde hay mayor control en los parámetros del proceso. El objetivo es aprovechar los días más estables para aumentar el consumo de vinaza y compensar los déficits observados en días críticos.

El valor del incremento se definió a partir de la diferencia entre la producción promedio en los días 4 a 8 (196.22 ton por día) y la meta operativa de 180 ton al día, dando un resultado de 16.22 tolendas por día. Según Osorio y López (2015), En un modelo de regresion el coefieinte indica cuanto cambia la varible dependiente por cada unidad de cambio, por lo que para seleccionar un incremento adecuado se utilizara el coficiente obtenido previamente

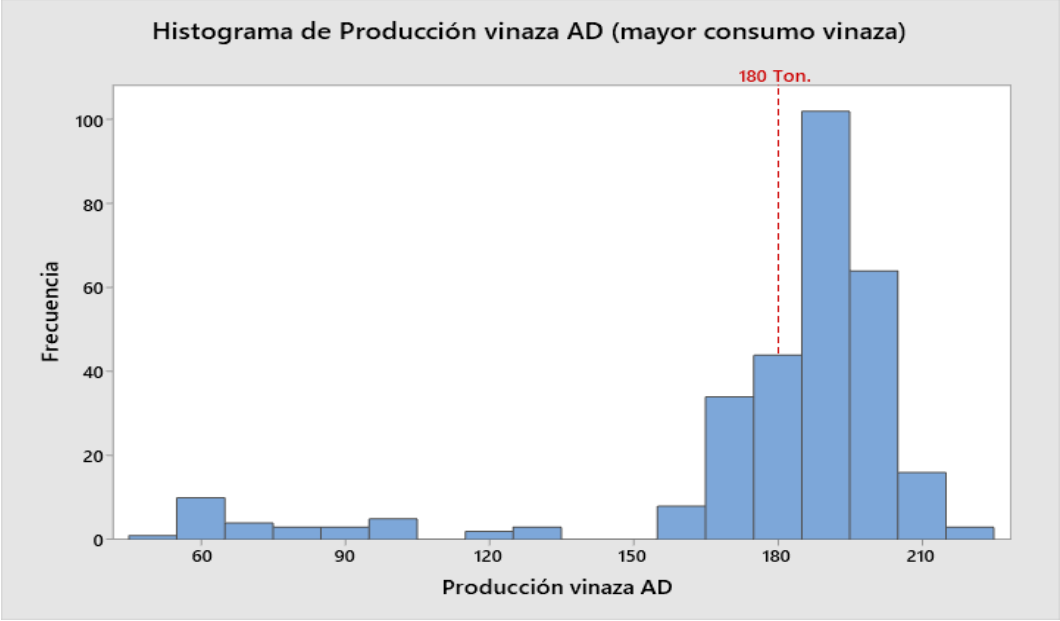
(Ecuación 4.5), el consumo adicional que genera dicho excedente puede estimare mdante la expresion:

$$Consumo\ adicional = \frac{16.22}{0.21975} = 73.81\ toneladas\ de\ vinaza \qquad Ec.\ 0.5$$

Dado que el valor calculado representa un incremento elevado, se optó por sustituirlo por 60 toneladas, una cantidad más congruente y físicamente viable dentro de las capacidades operativas del sistema.

La Gráfica 4.15, muestra los datos con el escenario implementado, señalando con una línea roja las 180 toneladas por día. Los resultados muestran una mejora significativa en la distribución del rendimiento diario:

- 201 días con producción igual o superior a 180 toneladas, o que representa el 66.6% del total anual.
- 101 días con producción inferior a 180 toneladas, equivalentes al 33.4% de total

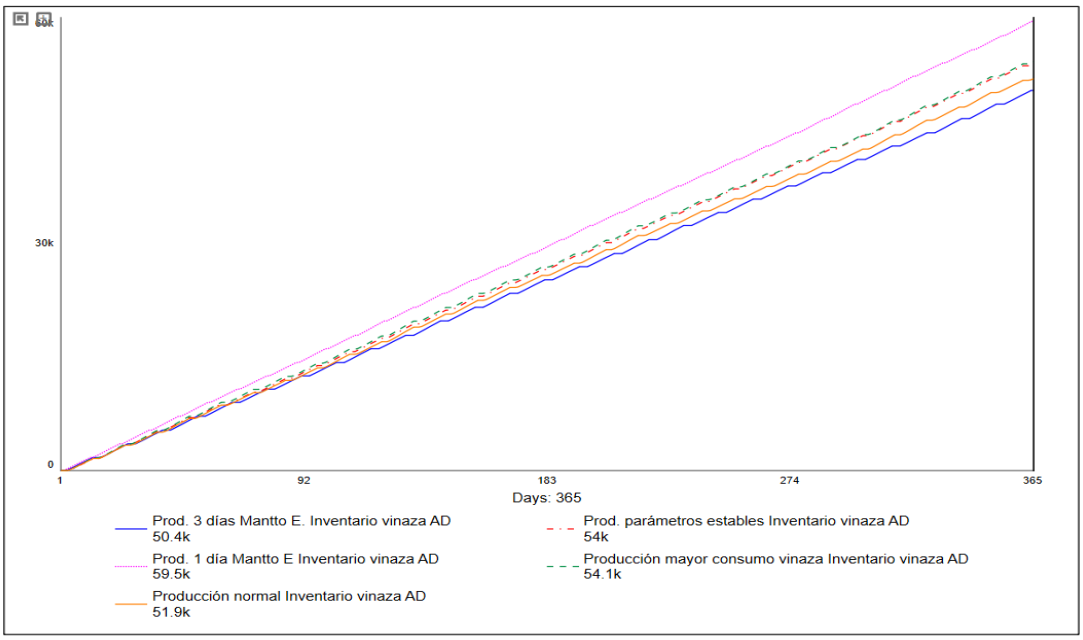


Gráfica 0.14 Frecuencia de producción con mayor consumo de vinaza

Para complementar el análisis anterior, la Gráfica 4.16 permite comparar el comportamiento del escenario con incremento de consumo de vinaza (línea verdad punteada) respecto a los demás casos evaluados. Este escenario es el tercer resultado más favorable, únicamente por

debajo de aquellos con parámetros estables y menor frecuencia de mantenimiento: el escenario normal con 2 día de mantenimiento (línea naranja) y el escenario estable con 1 día de mantenimiento (línea rosa), que presentan eficiencias del 110.5 y 115% respectivamente. El escenario de incremento de consumo alcanza un cumplimiento del 104.9% con una producción anual de 54.1 mil toneladas.

Aunque su eficiencia relativa es del 90.9%, esta alternativa destaca por su facilidad de implementación operativa, ya que no requiere modificaciones en la infraestructura ni ajustes en la programación del mantenimiento.



Gráfica 0.15 Producción con diferentes escenarios.

Conclusiones

Cuando una empresa se enfrenta al desafío de analizar procesos operativos complejos, como el sistema de evaporación de vinaza, resulta indispensable contar con herramientas que permitan comprender la interacción entre las diferentes variables del sistema en condiciones reales. En este proyecto, se utilizó la metodología de dinámica de sistemas junto con técnicas estadísticas, como el análisis de regresión y evaluación de distribuciones, lo cual permitió representar correctamente el comportamiento del sistema, identificar con mayor claridad las variables que afectan su eficiencia y analizar el desempeño del proceso bajo diferentes condiciones simuladas. A partir de estos análisis, fue posible identificar las variables más significativas que influyen el proceso y reconocer patrones operativos consistentes relevantes que pueden ser aprovechados para incrementar el rendimiento del sistema sin la necesidad de realizar modificaciones estructurales

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que:

- La integración de múltiples variables en el modelo de regresión permitió estimar con mayor precisión el comportamiento de la producción, incluso cuando ninguna de ellas presentó un ajuste de distribución estadística. Esta condición mostró que el sistema opera en un entorno con variables fuera de control. No obstante, al identificar variables con alta correlación con respecto a la producción, fue posible construir un modelo funcional para simular escenario y reforzar la toma de decisiones.
- La presión de vacío y la temperatura del proceso son variables clave en la eficiencia térmica del sistema. El análisis demostró que, conforme avanzan los días operativos, estas variables tienen un incremento progresivo pasando de 0.40 a 1.0 bar y de 70°C y 75°C en un periodo de 10 días, lo que reduce la transferencia de calor y afecta la productividad. Actualmente, la planta opera durante un mayor número de días en condiciones deficientes, lo que puede representar pérdidas de hasta 20 toneladas diarias.
- El consumo de vinaza presentó la correlación más alta con la producción (r=0.998), evidenciado su impacto directo en el rendimiento del sistema. Esto confirma que

controlar esta variable es fundamental para mejorar la productividad, especialmente en condiciones operativas estables.

- Bajo condiciones normales de operación, la producción fue de 48.1 mil toneladas con 3 días de mantenimiento, 51.9 mil toneladas con 2 días y 57 mil toneladas con 1 día. En comparación con la demanda estimada de 51.6 mil toneladas, la configuración actual no cumple con el objetivo, alcanzando únicamente un 93.2% de cumplimiento. Aunque reducir los días de mantenimiento permite alcanzar o incluso superar la meta anual, hacerlo sin garantizar condiciones adecuadas de mantenimiento representa un riesgo operativo y puede comprometer la estabilidad del sistema.
- El escenario con parámetros estables, la producción fue de 50.4, 54.0 y 59.5 mil toneladas, con 3, 2 y 1 día de mantenimiento respectivamente. Solo la configuración con 3 días no alcanzó la producción requerida con un cumplimiento de 97.7%. Esto sugiere que, aun bajo condiciones ideales, el número de días de mantenimiento debe revisarse cuidadosamente, ya que esto puede afectar al cumplimiento anual. Además, mantener condiciones estables de forma continua representa un desafío, ya que requiere tanto de infraestructura adecuada como de la capacidad técnica del personal para operar dentro de los rangos óptimos.
- El escenario con parámetros deficientes, la producción anual fue de 28.5, 30.8 y 33.7 mil toneladas correspondientes a 3, 2 y 1 día de mantenimiento respectivamente. En la condición actual, con 3 días de mantenimiento se alcanza solo el 55.2% de la demandad. Este análisis es relevante al considerar que gran parte del año la planta opera bajo estas condiciones, produciendo entre 140 y 160 toneladas diarias, muy por debajo de la meta de 180 toneladas al día establecida por la empresa
- Dado el bajo rendimiento observado en condiciones deficientes, se analizó la frecuencia de producción diaria. Se identifico que el 54.3% de los días simulados (164 de 302) no alcanzaron la meta de 180 toneladas diarias. Esto confirma que el sistema opera frecuentemente en condiciones fuera de control, lo que afecta el cumplimiento anual y resalta la importancia de estabilizar los parámetros desde el arranque del ciclo.
- Como estrategia alternativa ante los escenarios deficientes, se evaluó un incremento de consumo de vinaza durante los días 4 al 8 del ciclo, donde el sistema permite un

mejor control. Esta estrategia permitió alcanzar una producción de 54.1 mil toneladas, superando la meta anual de 51.6 mil toneladas y logrando que el 66.6% de los días operativos alcanzaran las 180 tonelada. Este escenario se posiciono como el tercero con mejor desempeño y representa una alternativa viable sin necesidad de modificar la infraestructura ni la programación del mantenimiento.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que, pese a la complejidad operativa del sistema de evaporación de vinaza y la alta variabilidad de sus parámetros de investigación, fue posible representar su comportamiento mediante modelos basados en datos reales. La integración de herramientas estadísticas y de simulación dinámica permitieron no solo predecir el rendimiento del sistema bajo diversos escenarios, sino también identificar estrategias operativas viables que mejoran la eficiencia sin necesidad de modificaciones estructurales. Este enfoque representa una base sólida para la toma de decisiones operativas sustentadas en evidencia cuantitativa y orientadas a mejorar el control del proceso.

Trabajos futuros

Como trabajo futuro de esta investigación, se identificaron las siguientes áreas de oportunidad.

- Validación del modelo en condiciones reales, a través de pruebas piloto que permitan comprobar la efectividad de los escenarios simulados, en especial aquellos con incrementos de consumo de vinaza durante días estables del ciclo operativo.
- Análisis de calidad de la materia prima, integrando indicadores como concentración de sólidos y presencia de sedimentos, ya que se observó que lotes con mayores impurezas incrementan el tiempo de evaporación y afecta la eficiencia térmica.
- Implementación de control estadístico de procesos sobre variables criticas mediante graficas de control, que permitan detectar desviaciones significativas en tiempo real. Esta técnica, aun sin un sistema completamente estandarizado, facilita el monitoreo continuo y la corrección temprana de variaciones operativas.
- Diseño de un sistema de mantenimiento predictivo, basado en el monitoreo continuo de la presión de vacío y la temperatura, que permita realizar intervenciones preventivas al detectar desviaciones críticas, evitando así la caída de la eficiencia térmica y perdidas en la producción.

Referencias bibliográficas

Corréa, C., Hengler, V., Gonzalez , R., & Pagán, M. (2018). Operational Research Historical Perspectives. *Scielo*, 355-366.

Agudelo, D., & López, Y. (2018). Dynamics of systems in the management of inventories. *USBmed*, 75-85.

Antún, J. (2002). Supply chain administration. *VirtualPro*, 8-12.

Barrios , J., Baeza, R., & Bianchetti, M. (2022). Design and Development of a Mathematical Model for an Industrial Process, in a System Dynamics Environment. *Applied Sciences*, 985. doi:https://doi.org/10.3390/app12199855

Begoña, V. (2013). *Modelos y mètodos de simulación estocástica. aplicación en la valoración de opciones.* Madrid: Universidad Complutense Madrid.

Benton, W. C. (2021). *upply Chain Focused Manufacturing Planning and Control.* New York: McGraw-Hill Education.

Bilash, K., Mohamed, F., & Mohd, K. (2017). *System Dynamics: Modelling and Simulation.*

Chamorro, E. (2019). *Diseño y evaluación de estrategias de distribución de nuevos productos desarrollados a partir del uso de vinazas de destilerías de alcohol.* Orizaba: Instituto Tecnológico de Orizaba.

Chase, R., & Jacobs, F. (2018). *Administración de operaciones, producción y cadena de suministros.* Ciudad de México: McGraw-Hill.

Chen, Y. L. (2019). Supply Chain Coordination: A Multi-Stage Approach. *Operations Management*, 45-57.

Christopher, M. (2016). *Logística y gestión de la cadena de suministro.* Harlow: Pearson Education.

CONADESUCA. (2017). Melazas de caña de azúcar y su uso en la fabricación de dietas para ganado. *SAGARPA*, 3-9.

Development, International Institute for Sustainable. (2016). Sustainable Commodities Markets. *Global market*, 45-67. doi:https://www.iisd.org/system/files/publications/ssi-global-market-report-sugar.pdf

Díaz, C., & Mahdi, S. (2023). Multiple-Effect Evaporators in the Food Industry: Fundamentals, Design, Simulation, Control, and Applications. *Food Eng Rev*, 691–717.

Díaz, Z. (2023). Discrete event simulation from the industrial engineering. *UAEH*, 110-114.

Dmitry, I., & Alexandre, D. (2020). Digital Supply Chain Management and Technology to Enhance Resilience and Efficiency: A Review and Research Agenda. *International Journal of Production Research*, 330-334.

Forrester, J. (1992). System Dynamics and Learner-Centered-Learning in Kindergarten through 12th Grade Education. *Massachusetts Institute of Technology*, 3-11. Obtenido de http://static.clexchange.org/ftp/documents/whyk12sd/Y_1993-01SD&LearnerCentered.pdf

Frost, J. (2021). *Regression Analysis: An Intuitive Guide for Using and Interpreting Linear Models.* Toronto: Statistics.

Fullana, C., & Urquía, E. (2009). Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinar de investigación. *Dialnet*, 37-48.

Gallego , S., García, M., Gajo, J., & Reschke, J. (2022). Development of a System Dynamics Simulation for Assessing Manufacturing Systems Based on the Digital Twin Concept. *Applied Sciences*, 2095-2099. doi:https://doi.org/10.3390/app12042095

García, J., & Valdecasas, I. (2011). La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales. *Science*, 91-110.

Geankoplis, C. (2003). *Transport Processes and Unit Operations (4th ed.* Minnesota: Prentice Hall.

González, H., & Escobar, C. A. (2021). Aplicación de la herramienta SIPOC a la cadena de suministro interna de una empresa distribuidora de medicamentos. *Lumen Gentium*, 120-126.

Grzelak, M., Borucka, A., & Guzanek, P. (2019). Application of Linear Regression for Evaluation of Production Processes Effectiveness. *Applied sciences*, 150-160. doi:https://doi.org/10.3390/app9224770

Guachamin, M. (2023). *Evaluación del proceso de evaporación de película ascendente sobre el contenido de vitamina c y la capacidad antioxidante de la mandarina.* Ibarra: Universidad Tecnica del Norte.

Huan, S., Sheoran, S., & Wang, G. (2012). A review and analysis of supply chain operations reference (SCOR) model. *Supply Chain Management: An International Journal*, 23-29. doi:https://doi.org/10.1108/13598540410517557

Hugos, M. (2018). *Essentials of Supply Chain Management.* New York: Wiley.

Ibarra Camacho, R., León Duharte, L., & Osoria Leyva, A. (2018). Physicochemical characterization of distillery vinasse. *Scielo*, 10-35.

INEGI. (2020). *Producción de bioetanol y alcohol en México.* Ciudad de Mexico: INEGI.

Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Planificación y control de la producción*, 775-788. doi:https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450

Izquierdo, L., Galán, J., Santos, J., & Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *EMPIRIA*, 86-105.

Jahangirian, M., Eldab, T., Naseer, A., & Young, T. (2010). Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational*, 1-13.

Jaramillo, O. (2007). *Intercambiadores de calor.* CIudad de México: Centro de investigación de energía.

Johnson, M., & Stevens, G. (2016). Integrating the Supply Chain. *Emerald Insight*, 102-131.

Jonsson,, P., & Mattsson, S. (2016). *Logística y gestión de la cadena de suministro: perspectivas e innovaciones modernas.* New York: Palgrave M.

Kamran , S., & Hassan, A. (2019). A System Dynamics Modeling Support System Based on Computational Intelligence. *Systems*, 47. doi:https://doi.org/10.3390/systems7040047

Kocijan, J. (2016). Modelling and Control of Dynamic Systems Using Gaussian Process Models. *Advances in Industrial*, 1-26. doi:10.1007/978-3-319-21021-6

KPMG. (17 de 10 de 2023). *Procurement value creation.* Obtenido de https://kpmg.com/kpmg-us/content/dam/kpmg/pdf/2023/procurement-value-creation.pdf

Lee, H., & Whang, S. (2019). The Bullwhip Effect in Supply Chains: A Review of Causes, Measures, and Remedies. *roduction and Operations Management*, 455-467.

Lee, P., & Yang, Y. (2015). . A systematic literature review of the supply chain operations reference (SCOR) model application with special attention to environmental issues. *nternational Journal of Production Economics*, 310–332.

Leo, E., Aranda, D., & Addati, G. (Julio de 2020). *Introducción a la dinámica de sistemas.* Buenos Aires: Universidad Del Cema. Obtenido de https://ucema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/739.pdf

Mangwanda, T., Johnson, J., Mani, J., Jackson, S., & Chandra, S. (2021). Processes, Challenges and Optimisation of Rum Production. *MDPI*, 1-6. doi:https://doi.org/10.3390/fermentation7010021

Martínez, M., Rodríguez, C., Gil, M., & Morris, A. (2013). System dynamics in the simulation of the effect of knowledge management on the supply chain of corn agroindustry. *Scielo*, 81-93.

Montalvo H., T., De La Hoz G., E., & Mendoza M., A. (2019). Los procesos logísticos y la administraciónde la cadena de suministro. *ORCID*, 102-112.

Montgomery, D., Peck, E., & Vining, G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis.* Vancouver: John Wiley & Son.

Montiel, A., Montalvo, N., García, L., Sandoval, C., Bautista, H., & Fernández, G. (2022). Post-Industrial Use of Sugarcane Ethanol Vinasse: A Systematic Review. *MDPI*, 2-10. doi:https://doi.org/10.3390/su141811635

Muvdi, C., Andrey, S., & Cáceres, S. (2021). Evaluación de la concentración de lactosuero ácido clarificado de leche bovina mediante la técnica de evaporación de película descendente al vacío. *Transformación y agroindustria*, 22.

Ondraczek, J., & Komendantova, N. (2015). WACC the dog: The effect of financing costs on the levelized. *Elservier*, 893.

Ortiz, C., Quezada, L., & Oddershede, A. (2024). Industrial Process Management Model to Improve Productivity and Reduce Waste. *Sustainability*, 1606. doi:10.3390/su16041606

Osorio, R., & López, I. (2025 de febrero de 2015). *Análisis de regresión aplicado: teoria y práctica.* Tabasco: 2019. Obtenido de https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis%20de%20Regresion.pdf

Piera, M., Casanovas, J., Guasch, T., & Ramos, J. (2013). *Cómo mejorar la logística de su empresa mediante la simulación.* Madrid: Díaz de Santos.

Ramos, R. (2016). *Modelo de simulación para evaluar el escalamiento industrial de una planta piloto de miel desacarificada en una empresa agroindustrial [Tesis de maestria, Instituto Tecnológico De Orizaba].* Orizaba: Instituto Tecnológico De Orizaba.

Render, B., & Heizer, J. (2014). *Principios de administración de operaciones.* México: Pearson.

Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2014). *The Handbook of Logistics and Distribution Management.* Philadelphi: Kogan Page.

Saini, M., & Kumar, A. (2019). Performance Analysis of Evaporation System in Sugar Industry Using RAMD Analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 9-18. doi:10.1007/s40430-019-1681-3

Smith, H., & Draper, N. (1998). *Applied Regression Analysis.* Toronto: John Wiley & Sons.

Sun, H., & Ni, W. (2012). The impact of upstream supply and downstream demand integration on quality management and quality performance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 872-890.

Universidad Autonoma de Chapingo. (2016). Vinazas: alternativas de uso . *CONADESUCA*, 2-11.

Waters, D. (2003). *Logistics An Introduction to supply chain management.* Nueva YorK: Palgrave Macmillan.

Zhang, D., Yang, Q., & Yuwen, Y. (2024). Progress of Optimization in Manufacturing Industries and Energy System. *Processes*, 953-965. doi:https://doi.org/10.3390/pr12050953

Zhao, L., Huo, B., Sun , L., & Zhao, X. (2017). The impact of supply chain risk on supply chain integration and company performance: A global investigation. *Supply Chain Management: An International Journal*, 277-292.

Lista de figuras

Figura 1.1 Cadena de suministro de la empresa AL 6
Figura 1.2 Cadena de suministro de la empresa 7
Figura 1.3 Melaza 7
Figura 1.4 Ingenios azucareros en México 9
Figura 1.5 Ejemplo del formato de una orden de compra-venta de melaza 12
Figura 1.6 Fosas de melaza 13
Figura 1.7 Esquema del sistema de evaporación (autora propia) 14
Figura 1.8 Tipos de transportes terrestres 15
Figura 2.1 Estructura de una cadena de suministro 19
Figura 2.2 Cadena de suministro de una industria manufacturera. 20
Figura 2.3 Cadena de suministro de una empresa 22
Figura 2.4 Tipos de modelos a estudiar con DS 31
Figura 2.5 Estructura básica de los DC's (autoría propia). 32
Figura 2.6 Ejemplo de diagrama causal y bucles de retroalimentación (autoría propia) 33
Figura 2.7 Representación gráfica de las variables en un diagrama de Forrester (autoría propia) 34
Figura 2.8 Sistema de evaporación de película descendente 38
Figura 2.9 Sistema de evaporación de película ascendente 39
Figura 3.1 Esquema del proceso de evaporación empresa AL 48
Figura 3.2 Diagrama causal del proceso de evaporación de la vinaza (autoría propia) 52
Figura 3.3. Diagrama causal, bucle de retroalimentación negativa B1(autoría propia) 53
Figura 3.4 Diagrama causal, bucle de retroalimentación negativa B2 (autoría propia) 54
Figura 3.5 Diagrama causal, bucle de retroalimentación negativa B3 (autoría propia) 55
Figura 3.6 Diagrama causal, sección de retroalimentación entre variables (autoría propia) 56
Figura 3.7 Identificación de distribución para consumo de vinaza en Minitab 59
Figura 3.8 Prueba de Mann-Whitney, modelo no ajustado consumo de vinaza en Minitab 61
Figura 3.9 Prueba de Mann-Whitney, consumo de vinaza en Minitab 63
Figura 3.10 Prueba de Man-Whitney, presión de vacío en Minitab 64
Figura 3.11 Ajuste del modelo de regresión, temperatura en Minitab 65

Figura 3.12 Prueba de Mann-Whitney, Temperatura del proceso en Minitab 65
Figura 3.13 Prueba Mann-Whitney, densidad en Minitab 66
Figura 3.14 Ajuste modelo de regresión, grados brix en Minitab 67
Figura 3.15 Prueba de Mann-Whitney, grados Brix en Minitab 67
Figura 3.16 Prueba Mann-whitney, pH en Minitab 68
Figura 3.17 Prueba Mann-Whitney, sólidos totales en Minitab 69
Figura 3.18 Ajuste del modelo de regresión, producción vinaza AD en Minitab 69
Figura 3.19 Prueba Man-Whitney, producción de vinaza AD en Minitab 70
Figura 3.20 Identificación de distribución de la demanda en Minitab 70
Figura 3.21 Prueba t dos muestras, demanda en Minitab 71
Figura 3.22 Parámetros del horizonte de simulación 72
Figura 3.23 Modulo de aprovisionamiento de vinaza 72
Figura 3.24 Submódulo del proceso de producción 74
Figura 3.25 Submódulo de producción de vinaza AD 75
Figura 3.27 Submódulo % satisfacción del cliente 76
Figura 3.26 Submódulo cantidad demanda faltante 76
Figura 4.1 Segmento para validación (autoría propia) 79
Figura 4.2. Correlación de variables (Autoría propia) 79
Figura 4.3 Prueba de bondad para datos de producción reales 82
Figura 4.4 Prueba de bondad para datos de producción simulados 82
Figura 4.5 Prueba no paramétrica de Mood para la producción de vinaza AD 83
Figura 4.6 Correlación variables críticas y producción. 87

Lista de tablas

Tabla 1.1 Composición física y química de la vinaza 10
Tabla 2.1 Estado del arte (Autoría propia) 40
Tabla 3.1 Parámetros principales del proceso de evaporación (autoría propia). 57
Tabla 3.2 Datos diarios de consumo de vinaza (autoría propia) 58
Tabla 3.3 Datos agrupados del consumo de vinaza distribuidos por día (autoría propia).... 61
Tabla 3.4 Datos agrupados de la presión de vacío por día (autoría propia). 63
Tabla 4.1 Unidades de medición (Autoría propia) 77
Tabla 4.2 Parámetros principales del modelo..... 90
Tabla 4.3 Escenarios para evaluación de indicadores 93
Tabla 4.4 Eficiencia relativa de la producción 99

Lista de gráficas

Gráfica 4.1 Ciclos de la temperatura 78
Gráfica 4.2 Prueba de valores extremos inferiores (autoría propia)..... 80
Gráfica 4.3 Prueba de valores extremos superior (autoría propia) 81
Gráfica 4.4 Gráfica de dispersión de producción AD 83
Gráfica 4.5 Indicador de presión vacío (autoría propia)..... 87
Gráfica 4.6 Indicador de temperatura (autoría propia) 88
Gráfica 4.7 Comportamiento de la producción de vinaza AD 89
Gráfica 4.8 Indicador de consumo de vinaza 89
Gráfica 4.9 Inventario de producto final y demanda del producto (autoría propia)..... 92
Gráfica 4.10 Escenarios de producción de vinaza AD 95
Gráfica 4.11 Producción normal con diferentes días de mantto. 96
Gráfica 4.12 Producción estable con diferentes días de mantto 97
Gráfica 4.13 Producción deficiente con diferentes días de mantto. 98
Gráfica 4.14 Frecuencia de producción de vinaza..... **¡Error! Marcador no definido.**
Gráfica 4.15 Frecuencia de producción con mayor consumo de vinaza 101
Gráfica 4.16 Producción con diferentes escenarios. 102