

Propuesta de mejora para la elaboración de conos enrollados en la línea de producción VTRO
de la empresa Soluciones Omega S.A.

Johan Andrey Herreño Duarte

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Modalidad: práctica empresarial

Director

Omar Andrés Benavides Prada

Prof. Escuela de Ingeniería Química

Tutor

Johana Marcela Penagos

Ingeniera de alimentos

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mi familia por sus buenos deseos durante la carrera.

A mis padres Aracely y Carlos por su amor y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida,

Estando siempre cuando más los necesitaba.

A mis mejores amigos de la vida por su constante apoyo, especialmente a Sebastián,

Valentina y Juan por

Todas experiencias vividas y su constante ayuda durante la carrera.

A Steven, mi sobrino por estar presente siempre que la necesitaba y por sus

Enseñanzas.

A mis compañeros y amigos de carrera por contribuir en mi formación y en los momentos

Vividos durante esta etapa.

Johan Andrey Herreño Duarte

Agradecimientos

Primeramente, agradecerle a Dios por darme la oportunidad de estudiar, la sabiduría y la salud para culminar este proceso de manera satisfactoria.

A mis padres, hermanos y pareja, por ser mi apoyo incondicional y mi fuente de motivación para superarme cada día.

A la Universidad Industrial de Santander, por abrirme sus puertas y brindarme todo su conocimiento.

A mi director de proyecto, Omar Benavides por su acompañamiento y guía durante este proceso.

A la empresa Soluciones Omega, por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto en sus instalaciones y aportar a mi crecimiento profesional.

A los ingenieros, coordinadores y personas de planta de Soluciones Omega, quienes me brindaron su apoyo en cada actividad con la mejor disposición y servicio.

Tabla de contenido

Introducción	12
1. Objetivos	13
1.1. Objetivo general	13
1.2. Objetivos específicos	13
2. Marco conceptual.....	14
2.1. Instrumentos de medición y monitoreo.....	14
2.2. Reología de masas en productos de galletería	15
2.3. Calidad e inocuidad en la producción de alimentos.....	16
2.4. Componentes y procesos específicos en la elaboración de conos enrollados	18
3. Metodología	20
3.1. Primera etapa: diagnóstico del estado actual del proceso de elaboración de conos enrollados de las líneas V-TRO.	21
3.2. Segunda etapa: diseño de experimentos para determinar los valores adecuados e las variables críticas en el punto más desafiante del proceso de elaboración de conos enrollados.....	21
3.3. Tercera etapa: análisis de resultados del impacto de las mejoras implementadas	23
4. Resultados	24
4.1. Primera etapa	24
4.1.1. Descripción de las etapas de la elaboración de conos enrollados	24
4.1.2. Identificación de Variables y Parámetros del Proceso	29

4.1.3. Recolección de indicadores actuales de productividad y rendimiento del proceso	31
4.2. Segunda etapa	33
4.2.1. Definición de criterios de evaluación	33
4.2.2. Matriz de priorización de puntos críticos	35
4.2.3. Selección del punto crítico más desafiante	35
4.2.4. Variables críticas identificadas	36
4.2.5. Análisis fisicoquímicos y organolépticos del producto final	38
4.2.6. Análisis reológico de la mezcla para conos enrollados	39
4.2.7. Diseño experimental en la elaboración de conos enrollados	42
4.2.8. Rangos adecuados de las variables críticas en la etapa de mezclado	43
4.2.8.1. <i>Variables controladas</i>	43
4.2.8.2. <i>Variables no controladas</i>	44
4.3. Tercera etapa	45
4.3.1. Alternativa implementada	45
4.3.2. Comparación de los indicadores claves	46
4.3.3. Resultados de laboratorio	48
5. Conclusiones	50
6. Recomendaciones	51
Referencias	52

Lista de tablas

Tabla 1. Descripción de las variables críticas del proceso de elaboración de conos enrollados	30
Tabla 2. Información sobre los indicadores de productividad	32
Tabla 3. Información sobre los indicadores de rendimiento	33
Tabla 4. Matriz de priorización	35
Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas	38
Tabla 6. Datos de tiempos de flujo	40
Tabla 7. Datos de las variables del experimento	42
Tabla 8. Comparación de los indicadores productividad	46
Tabla 9. Comparación de los indicadores rendimiento	47
Tabla 10. Resultados de laboratorio	49

Lista de figuras

Figura 1. Metodología en la elaboración de conos enrollados.....	20
Figura 2. Elaboración de premezcla de elaboración de conos enrollados.....	24
Figura 3. Elaboración de mezcla para la elaboración de conos enrollados.....	26
Figura 4. Modelo ley de potencia.....	41

Lista de Apéndices

Apéndices A. índice de productividad.....	56
Apéndice B. índice de rendimiento.	59
Apéndice C. código del modelo de la ley de potencia.	63

Resumen

Título: Propuesta de mejora para la elaboración de conos enrollados en la línea de producción vtro de la empresa Soluciones Omega S.A.*

Autor: Johan Andrey Herreño Duarte**

Palabras clave: Conos enrollados, control de calidad, eficiencia operativa, ingeniería química, diseño experimental, reología, viscosidad.

Descripción: Este proyecto se centra en mejorar el proceso de elaboración de conos enrollados en la línea de producción VTRO de Soluciones Omega S.A., con el objetivo de Mejorar tanto la calidad del producto como la eficiencia operativa. Inicialmente, se identificaron problemas críticos, como una alta tasa de defectos (13 % de desperdicio del producto final) y variaciones significativas en parámetros clave del proceso. Tras un diagnóstico que abarcó desde la recepción de materias primas hasta la distribución del producto final, se determinó que la etapa de mezclado era el punto más crítico.

Mediante un diseño experimental de 20 ensayos, se establecieron rangos aceptables para variables clave, como el tiempo de mezclado (9-10 minutos), la viscosidad aparente (1300-1400 $Pa \cdot s$) y el tiempo de flujo (95-100 segundos). Además, se definieron condiciones ideales para la temperatura de la mezcla (25-28 °C) y el ambiente (temperatura de 22-25 °C, humedad relativa de 50-60 %). La calibración de un sistema de control automático del tiempo de mezclado con un PLC y un modelo de ley de potencia para el control de la viscosidad, junto con la instalación de instrumentos de medición, resultó en un aumento del 22 % en la tasa de producción, una reducción del 4 % en la tasa de defectos y una mejora del 8 % en la Eficiencia Global del Equipo (OEE). Adicionalmente, se logró una disminución del 9 % en el consumo energético y del 27 % en el tiempo de parada.

Este proyecto demuestra cómo la ingeniería química aplicada y el control preciso de variables críticas pueden mejorar significativamente la calidad y la eficiencia en la producción de alimentos procesados, estableciendo las bases para futuras innovaciones en la elaboración de conos enrollados.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Pr. Omar Benavides. Tutor Johana Penagos.

Abstract

Title: Improvement proposal for the manufacture of rolled cones in the VTRO machine of the company Soluciones Omega S.A.*

Author: Johan Andrey Herreño Duarte**

Key Words: Rolled cones, quality control, operative efficiency, experimental design, rheology, viscosity.

Description: this project focuses on the improvement of the manufacturing process of rolled cones in the production line VTRO of the company Soluciones Omega S.A., the goal is to improve the quality of the final product and the operative efficiency. Initially, critical issues were identified, a high wastage rate (13% of the final product) and significant variations in the key parameters of the process. After a diagnosis which encompasses from the raw materials until the final product distribution, it was determined that the mixed stage was the most critical point.

Through an experimental design of 20 essays, optimal ranges were established to the key variables, as the mixing process (9 – 10 minutes), the apparent viscosity (1300 – 1400 $Pa \cdot s$) and the flow time (95 – 100 seconds). Besides, ideal conditions were defined for the mix temperature (25-28 C) and the environment temperature (22 – 25 C, relative humidity of 50 – 60 %). The calibration of an automatic mixing time control system with a PLC and a power law model for viscosity control, with the installation of measuring instruments, resulted in a 22 % increase in production rate, a 4 % reduction in defect rate and a 8 % improvement in the overall equipment efficiency. Additionally, a 9 % decrease in energetic consumption and a 27 % in downtime were achieved.

This project demonstrates how chemical engineering applied and precise control of critical variables can significantly improve quality and efficiency in the production of processed food, laying the groundwork for future innovations in the elaboration of rolled cones.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Pr. Omar Benavides. Tutor Johana Penagos.

Descripción de la empresa

Soluciones Omega S.A., establecida en 2004 y ubicada en el Parque Industrial San Jorge en Mosquera, Cundinamarca, ha consolidado su reputación como un pilar de confianza en la industria de procesamiento y maquila en Colombia. Con un equipo de 700 colaboradores comprometidos, la empresa se distingue por ejecutar cada proyecto con responsabilidad y eficiencia, lo que le ha permitido expandir y diversificar sus operaciones en dos líneas de negocio principales.

La primera línea de negocio se especializa en servicios de alistamiento y empaque para las industrias alimenticia, cosmética y farmacéutica, cuenta con clientes como Alpina, Ramo y PepsiCo, en diferentes ciudades del país, entre otras, destacándose por su precisión y fiabilidad en la gestión de productos sensibles y de alta demanda. La segunda línea se enfoca en la producción de galletas para la industria de helados, operando bajo la marca Barquillos Gustto, la cual ha dejado una huella significativa en el mercado. Desde 2008, Meals de Colombia se ha confiado en el suministro diferentes tipos de galletas, como copita Miel, copita Gustto, copita Kid, galleta plana, tulipas y enrollados para la elaboración de productos icónicos como el helado Bocatto y las copitas del chococono, garantizando la calidad y consistencia que los consumidores esperan.

La planta de producción de galletas está equipada con cuatro líneas (VTRO, JUPITER, MTA-I y MTA-II), diseñadas para adaptarse a diferentes formulaciones y productos finales. Estas líneas operan bajo estrictos estándares internacionales de calidad e inocuidad alimentaria, certificadas bajo ISO 9001, ISO 14001 y FSSC 22000, lo que asegura la producción de productos seguros y de alta calidad.

Introducción

En la industria alimentaria actual, el mejoramiento de procesos es esencial para mantener la competitividad y cumplir con las crecientes demandas de calidad. Soluciones Omega S.A., una empresa líder en la fabricación de galletas para la industria de helados, enfrenta desafíos significativos en su línea de producción VTRO de conos enrollados en la planta de Mosquera, Cundinamarca. Este proceso, que abarca desde la recepción de materias primas hasta la distribución del producto final, presenta inconsistencias que impactan la calidad del producto y la eficiencia operativa. La línea de producción enfrenta una alta tasa de defectos, con un 14 % de desperdicio del producto final, y se ve limitada por la falta de equipos esenciales como viscosímetros, termohigrómetros y pirómetros. Además, las variaciones en parámetros críticos como la viscosidad, textura y resistencia, están deteriorando el rendimiento general. Estos factores no solo aumentan los costos operativos, sino que también amenazan la satisfacción del cliente y debilitan la posición competitiva de la empresa en el mercado.

Frente a este panorama, es decisivo mejorar el proceso de elaboración de conos enrollados en la línea VTRO para reducir costos, aumentar la productividad y garantizar una mayor consistencia en la calidad del producto final. Además, el mejoramiento del proceso podría contribuir en un menor consumo de energía y recursos, alineándose con las preocupaciones actuales en la industria alimentaria.

En este contexto, surge la siguiente pregunta: ¿cómo se puede mejorar el proceso de elaboración de conos enrollados en la línea VTRO de la planta de Soluciones Omega Mosquera, mejorando una de las variables críticas en las etapas de mezclado, transporte, enrollado y horneado, para aumentar la calidad del producto y la eficiencia operativa?

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Proponer una mejora en el proceso de elaboración de conos enrollados de la línea VTRO de la planta de Soluciones Omega ubicada en Mosquera, Cundinamarca.

1.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado actual del proceso de la elaboración de conos enrollados en la línea VTRO.
- Determinar los valores adecuados de las variables críticas en el punto más desafiante del proceso mediante diseño de experimentos y validación en diferentes lotes.
- Analizar el impacto de las mejoras implementadas mediante indicadores clave.

2. Marco conceptual

2.1. Instrumentos de medición y monitoreo

- ✓ **Termohigrómetro:** instrumento que mide, simultáneamente, temperatura y humedad relativa. Utiliza sensores capacitivos o resistivos para la humedad y termistores o termopares para la temperatura. En la producción de conos, es crucial para monitorear las condiciones ambientales en áreas de almacenamiento y procesamiento, ya que la humedad afecta la calidad de ingredientes higroscópicos como la harina y el azúcar.[17]
- ✓ **Pirómetro:** dispositivo de medición de temperatura sin contacto que utiliza la radiación infrarroja emitida por los objetos. En la producción de conos es esencial para medir la temperatura superficial de los productos durante el horneado y mezclado, sin interferir con el proceso. [18]
- ✓ **Termobalanza:** combina una balanza de precisión con un horno para medir cambios de masa en función de la temperatura o el tiempo, que sirve para determinar el contenido de humedad y analizar la estabilidad térmica de ingredientes y productos finales. Utiliza el principio de termogravimetría. [19]
- ✓ **Cronómetro:** instrumento de medición temporal de alta precisión. En la producción de conos, es fundamental para controlar tiempos críticos en procesos como mezclado, horneado y enfriamiento. La precisión es decisiva para la consistencia del producto. Precisión típica: ± 0.01 segundos.
- ✓ **PLC (Controlador Lógico Programable):** sistema de control digital basado en microprocesadores que utiliza memoria programable para almacenar instrucciones y ejecutar funciones específicas. En la producción de conos, el PLC es esencial para la

automatización y control preciso de variables de proceso como temperatura, velocidad de mezclado y tiempos de horneado. [20]

2.2. Reología de masas en productos de galletería

- ✓ **Comportamiento no Newtoniano:** las masas para conos enrollados presentan propiedades de flujo que varían con la fuerza aplicada, característica típica de los fluidos no newtonianos. Específicamente pseudoplástico. Esta propiedad beneficia la producción de conos al facilitar el vertido y esparcimiento de la masa, mejorar su adaptación a los moldes durante el prensado, y contribuir a una textura final uniforme y crujiente tras el horneado [21].
- ✓ **Viscoelasticidad:** la masa de galletería, incluidas las de conos enrollados, muestran propiedades viscoelásticas. Esto implica que la masa tiene tanto características de un sólido elástico como de un líquido viscoso. La viscoelasticidad afecta la manipulación de la masa, su extensibilidad durante el formado y las características texturales del producto final [21].
- ✓ **Copa Zahn (N.4):** es un instrumento ampliamente utilizado en la industria alimentaria para medir la viscosidad de fluidos. Este dispositivo cumple con las normas ASTM D4212 y ASTM D1084, que establecen métodos estándar para la medición de viscosidad mediante viscosímetros de flujo por gravedad (ASTM International, 2021). En el contexto de la producción de conos enrollados, la copa Zahn proporciona una medida rápida y práctica de la viscosidad de la masa, permitiendo un control en tiempo real del proceso. Sin embargo, es importante notar que su aplicación a masas de galletería puede presentar limitaciones debido a la naturaleza compleja de estos sistemas.[9]

- ✓ **Ley de potencia:** el comportamiento reológico de las masas para conos enrollados se caracteriza por ser no newtoniano. Este comportamiento se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = k * \gamma^n \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde, η es la viscosidad aparente, k es el índice de consistencia, γ es la tasa de cizallamiento, y n es el índice de flujo. Este modelo es particularmente útil para describir el comportamiento de flujo de masas de galletería, ya que representa la relación entre la disminución de la viscosidad y el aumento de la tasa de cizallamiento (Reiner, M. y Bingham, E. 2021).

A diferencia de modelos más complejos como Herschel-Bulkley o Casson, que requieren parámetros adicionales, la ley de potencia ofrece un equilibrio entre precisión y simplicidad computacional, fundamental para el control en tiempo real del proceso (Manley, 2011). Este modelo supera al de Bingham, inadecuado para masas sin umbral de fluencia significativo, y a los de Cross o Carreau, que, aunque más precisos, complican la implementación práctica. (Baudoin et al. 2017) validaron su eficacia en masas de galletas bajo diversas condiciones de procesamiento, corroborando su idoneidad para la producción de conos enrollados, donde la consistencia de la masa es crítica para la calidad del producto final.

2.3. Calidad e inocuidad en la producción de alimentos

La producción de conos enrollados está regida por estándares de calidad e inocuidad, principalmente la Norma Técnica Colombiana NTC 1241 y la Resolución 4506/13. Estas normativas establecen parámetros críticos que influyen directamente en las operaciones unitarias del proceso productivo.

- ✓ **La NTC 1241:** especifica parámetros fisicoquímicos clave como humedad ($\leq 5\%$ p/p), pH (6.0 - 7.5), y contenido de proteína ($\geq 8\%$ p/p en base seca). Estos parámetros son esenciales en el control de procesos como horneado, enfriamiento y dosificación de ingredientes, afectando directamente la estabilidad microbiológica y las propiedades organolépticas del producto final. [15]
- ✓ **la Resolución 4506/13:** establece criterios microbiológicos estrictos, incluyendo límites para el recuento de mohos y levaduras (< 100 UFC/g), coliformes totales (< 10 UFC/g), y la ausencia de salmonella en 25 g de producto. El cumplimiento de estos estándares requiere la implementación de sistemas de control estadístico de procesos (SPC) en puntos críticos como el mezclado, horneado y enfriamiento. La aplicación de principios de transferencia de calor y masa es fundamental, especialmente en el proceso de horneado, donde se debe asegurar la eliminación de patógenos, manteniendo, simultáneamente, la humedad dentro de los límites especificados. Un aspecto crítico en la producción de conos es el control de la actividad de agua (a_w), una medida adimensional que representa la cantidad de agua disponible para reacciones químicas y crecimiento microbiano. La a_w debe mantenerse por debajo de 0.6 para prevenir el crecimiento microbiano, ya que este valor indica que la presión de vapor de agua en el producto es el 60 % de la del agua pura a la misma temperatura. Este nivel de control se logra mediante un equilibrio preciso entre la formulación del producto y los parámetros del proceso de secado post-horneado. [14]
- ✓ **Sistema HACCP (Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control):** es esencial en este contexto, identificando puntos críticos como el control de temperatura en el horneado (típicamente 160-180 °C), el monitoreo de humedad en el producto final, y el control de contaminación cruzada en las etapas de enrollado y empaque.

- ✓ **Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y Procedimientos Operativos Estandarizados de Saneamiento (POES):** estos son fundamentales para mantener un ambiente de producción higiénico y prevenir la contaminación del producto. Además, el aseguramiento de la calidad implica el uso de técnicas analíticas avanzadas como cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC) para el análisis de aditivos y contaminantes, y espectrofotometría para el control de color y uniformidad del producto.[16]

2.4. Componentes y procesos específicos en la elaboración de conos enrollados

- ✓ **Ingredientes higroscópicos:** son aquellos componentes de la mezcla que tienen la capacidad de absorber humedad del ambiente. En la elaboración de conos enrollados, ingredientes como la harina y el azúcar son particularmente higroscópicos. Esta propiedad es fundamental en el control de la humedad de la masa y afecta directamente la reología de la mezcla y la calidad del producto final [22].
- ✓ **Galleta partida:** se refiere a los productos que no cumplen con los estándares de calidad debido a defectos en su integridad estructural o cocción inadecuada. Desde una perspectiva de ingeniería de procesos, la cuantificación y análisis de la galleta partida es un indicador clave de la eficiencia del proceso y la calidad del producto [5].
- ✓ **Gluten:** es una proteína compleja presente en la harina de trigo, compuesta principalmente por gliadina y glutenina. Su capacidad para formar redes viscoelásticas influye significativamente en la estructura y textura de los conos, ya que proporciona elasticidad y retención de gas en la masa. La manipulación controlada del desarrollo del gluten durante el mezclado es esencial para lograr las propiedades reológicas deseadas en la masa, como la elasticidad y extensibilidad adecuadas para la formación de conos [2].

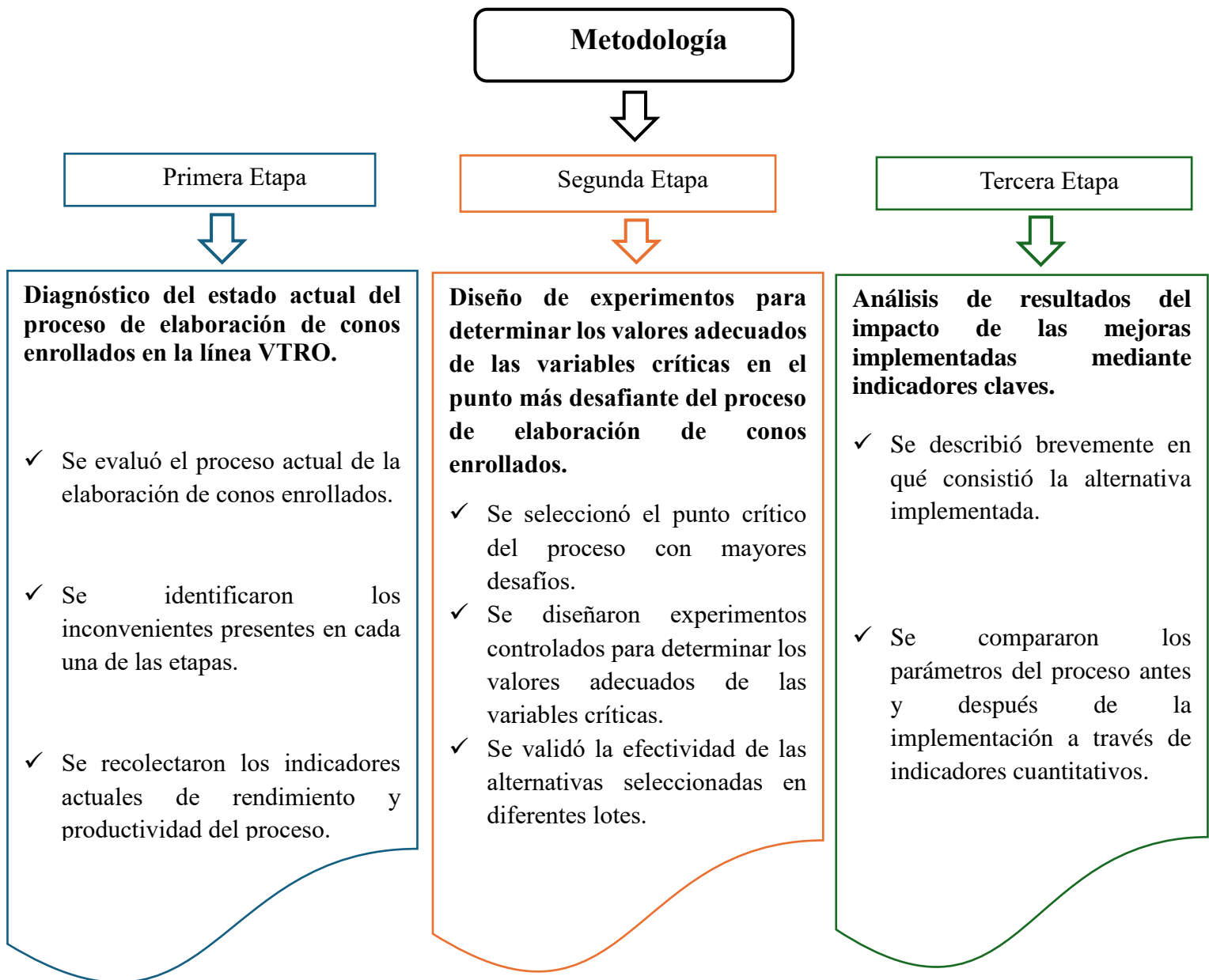
- ✓ **Oleo componentes:** son aceites de origen vegetal utilizados en la formulación de la mezcla. Estos componentes juegan un papel esencial en la textura y las propiedades organolépticas del cono. La selección y dosificación precisa de estos ingredientes impactan directamente en la calidad del producto final y en su vida útil [5].
- ✓ **Rechazo de mezcla:** se refiere a la mezcla que ha iniciado un proceso fermentativo no deseado, siendo inadecuada para la producción. El control de este fenómeno requiere el monitoreo y manejo de las reacciones microbiológicas y bioquímicas en la masa. La reducción del rechazo de mezcla ayuda a aprovechar mejor las materias primas y a incrementar la producción del proceso [5].
- ✓ **El sistema FEFO (*First Expired, First Out*):** es una estrategia de manejo de inventario en la industria alimentaria que prioriza la venta de productos más cercanos a su fecha de caducidad, lo cual requiere un registro preciso de fechas, generalmente mediante sistemas computarizados. Este enfoque no solo reduce el desperdicio de alimentos y mejora la inversión en productos, sino que también facilita el cumplimiento de estándares de calidad y seguridad como ISO 22000 y FSMA. Como resultado, el FEFO puede mejorar la eficiencia operativa de la empresa y aumentar la confianza del consumidor en la frescura y seguridad de los alimentos adquiridos [26].

3. Metodología

La metodología se estructuró en tres etapas principales, cada una diseñada para abordar uno de los objetivos específicos. La Figura 1 presenta un resumen visual de estas fases metodológicas.

Figura 1.

Metodología en la elaboración de conos enrollados



3.1. Primera etapa: diagnóstico del estado actual del proceso de elaboración de conos enrollados de las líneas V-TRO.

Se realizó una evaluación completa que cubrió todas las etapas, desde la recepción de las materias primas hasta el empaque del producto terminado. Se examinaron en detalle los parámetros operativos, tiempos de proceso, flujos de materiales y variables críticas de calidad. Así mismo, se revisaron los procedimientos operativos estandarizados (POE), los manuales de proceso y registros. Para identificar los inconvenientes que se presentaban en cada una de las etapas, se realizaron entrevistas estructuradas con los operarios y supervisores, quienes proporcionaron información sobre las dificultades más recurrentes y los cuellos de botella del proceso. Adicionalmente, se analizaron los datos históricos de producción, calidad y mantenimiento, utilizando Excel para identificar patrones, tendencias y oportunidades de mejora. Con el propósito de medir el impacto de las mejoras a implementar, se recopilaron los valores actuales de los indicadores clave de desempeño, tales como la eficiencia global del equipo (OEE), la tasa de producción, el porcentaje de defectos y el rendimiento de las materias primas. La información se obtuvo de los sistemas de registro y mediciones directas durante un periodo de 3 meses.

3.2. Segunda etapa: diseño de experimentos para determinar los valores adecuados e las variables críticas en el punto más desafiante del proceso de elaboración de conos enrollados.

Se llevó a cabo un análisis comparativo de los puntos críticos identificados en la primera etapa, evaluando su impacto en la calidad del producto. Para ello, se tuvieron en cuenta diversos factores, tales como la frecuencia de aparición de defectos, la variabilidad de los parámetros de proceso y la complejidad para controlar cada punto crítico. Utilizando una matriz de priorización, se ponderaron estos criterios para seleccionar el punto crítico más desafiante. Una vez identificado

este punto crítico, se realizaron pruebas en diferentes lotes de producción aplicando las condiciones actuales del proceso de las diferentes variables necesarias, como temperatura, tiempos, viscosidad y humedad relativa. Estas variables se seleccionaron por su impacto en la calidad de los conos, según reportes en la literatura [3, 7] y la experiencia previa en la empresa.

Se determinaron los valores adecuados de las variables críticas en la producción de conos enrollados mediante un diseño experimental factorial 5^2 , El plan inicial contemplaba 25 ensayos; sin embargo, se realizaron 20 experimentos debido a limitaciones el tiempo y circunstancias imprevistas. Un proceso de auditoría en curso en la empresa requirió la atención de personal clave, incluyendo a la ingeniera responsable de supervisar los experimentos. El procedimiento para cada experimento se estructuró de la siguiente manera: inicialmente, se preparó la mezcla base según la formulación estándar establecida; posteriormente, se procedió a ajustar el tiempo de mezclado según los niveles predefinidos (8, 9, 10, 11 y 12 minutos), obteniendo datos de tiempo de flujo con la copa Zahn N.4. Estos datos se utilizaron para calcular la viscosidad aparente mediante el modelamiento de ley de potencia previamente calibrado.

A partir de los datos de viscosidad establecidos, se determinó el tiempo de mezclado requerido para alcanzar los puntos adecuados de viscosidad (rangos de 1250-1300, 1300-1350, 1350-1400, 1400-1450, y 1450-1550 $Pa \cdot s$) conforme a la matriz experimental predefinida. Al finalizar cada ensayo, se midieron y registraron parámetros críticos como la temperatura de la mezcla (T), la humedad relativa del ambiente (Hr) y la temperatura ambiente (Ta), utilizando termómetros infrarrojos e higrómetros calibrados.

Finalmente, se procedió con las etapas de horneado y enrollado bajo condiciones estandarizadas, con la temperatura del horno fijada en 200 °C y la velocidad de la banda

transportadora en 47 Pl/min. Se recolectaron datos de forma sistemática, permitiendo evaluar el impacto de las modificaciones propuestas en las variables críticas identificadas.

3.3. Tercera etapa: análisis de resultados del impacto de las mejoras implementadas

Se describió brevemente la alternativa implementada para mejorar el desempeño del punto crítico del proceso de elaboración de conos enrollados. Luego, se compararon los indicadores clave antes y después, como tasa de defectos, humedad, resistencia, rendimiento, desperdicio y tiempos de ciclo. Estos indicadores cuantitativos permitieron evaluar el impacto positivo de las mejoras aplicadas en términos de eficiencia, calidad y productividad del proceso.

4. Resultados

4.1. Primera etapa

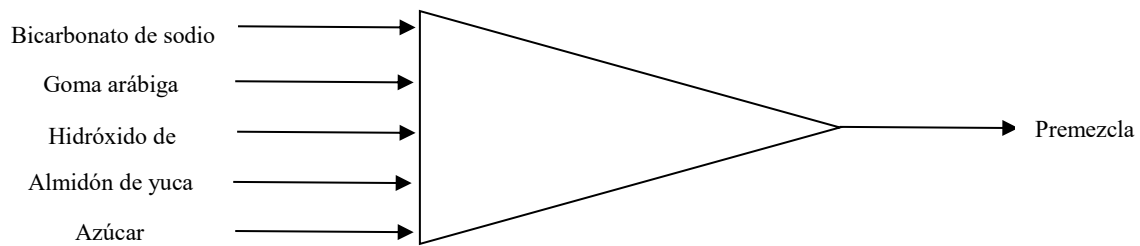
4.1.1. Descripción de las etapas de la elaboración de conos enrollados

Recepción y almacenamiento de la materia prima: se evaluó la etapa de recepción y almacenamiento de materias primas para identificar posibles áreas de mejora en cuanto al control de calidad. Se observó que el proceso actual se basa principalmente en los certificados de calidad provistos por los proveedores, complementados con análisis organolépticos básicos (color, olor, sabor y textura). Las materias primas se almacenan en racks por períodos variables, potencialmente expuestas a fluctuaciones de humedad relativa y temperatura ambiente. Es importante considerar que ingredientes higroscópicos como la harina y el azúcar son susceptibles a la absorción de humedad durante el transporte y almacenamiento. La ausencia de un monitoreo continuo de las condiciones de almacenamiento y evaluaciones frecuentes de las propiedades de las materias primas durante su estancia en planta podría presentar riesgos para el control del proceso. Esta situación puede comprometer la trazabilidad del producto, dificultando la identificación del origen de posibles problemas de calidad y la implementación de acciones correctivas efectivas.

Premezcla: La producción de conos enrollados es un proceso que requiere precisión. Como se muestra en la Figura 2, esta fase inicial implica la preparación de mezclas de ingredientes sólidos en menor cuantía. La exactitud en esta etapa es relevante porque componentes como el bicarbonato de sodio y el hidróxido de magnesio afectan directamente propiedades clave del producto final, como la textura, el volumen, el pH, y la estabilidad de la masa. Estos factores determinan características esenciales como la textura crocante, el sabor y la vida útil del cono enrollado.

Figura 2.

Elaboración de premezcla de elaboración de conos enrollados.



La etapa actual de premezcla presenta varios desafíos técnicos significativos. En primer lugar, la medición manual de ingredientes, realizada por un operario utilizando una balanza y una pala de acero inoxidable, introduce variabilidad en la composición de las premezclas debido a la imprecisión inherente del método. Esta variabilidad puede afectar la consistencia del producto final. Además, el uso de bidones de polietileno para almacenar materias primas y la reutilización de utensilios sin una limpieza adecuada entre mediciones, aumenta el riesgo de contaminación cruzada, comprometiendo la integridad microbiológica de las premezclas.

Por otro lado, la preparación anticipada de premezclas para 24 horas de producción, combinada con un control ambiental inadecuado, presenta problemas adicionales. El almacenamiento prolongado en condiciones no controladas es especialmente problemático para ingredientes higroscópicos como la harina de trigo, el hidróxido de sodio y el bicarbonato de sodio. Estos materiales son susceptibles a cambios en su contenido de humedad, lo que puede alterar sus propiedades fisicoquímicas y funcionales. Como resultado, la calidad y consistencia del producto final pueden verse comprometidas, ya que las características de los ingredientes al momento de su uso pueden diferir considerablemente de sus condiciones iniciales.

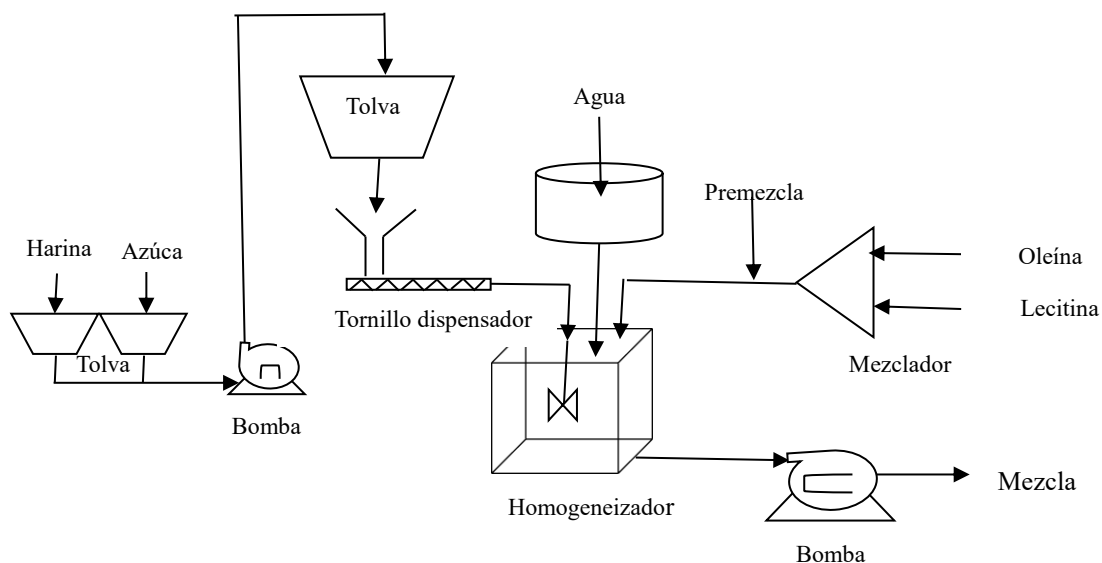
Mezcla: la etapa de mezclado es significativa en la elaboración de conos enrollados, involucrando una secuencia precisa de adición de ingredientes y operaciones unitarias, como se ilustra en la Figura 3. Inicialmente, se dosifica el agua con un margen de error mínimo, seguido por la incorporación de componentes líquidos minoritarios como esencia de vainilla y colorante caramelo

(C-11), junto con la premezcla previamente preparada. La adición de harina se realiza de manera simultánea con la activación del homogeneizador, utilizando un sistema de tornillo sin fin que permite un control del flujo másico. Esta sincronización ayuda prevenir la formación de aglomerados y asegurar una dispersión homogénea de los sólidos en la fase líquida.

La homogeneización se realiza en dos fases de 6 min cada una, interrumpidas por la adición manual de una mezcla de oleína y lecitina. Esta intervención manual introduce variabilidad en el proceso y representa un punto crítico de control, ya que puede afectar la consistencia y propiedades reológicas finales de la mezcla. El ciclo total de 12 minutos será vital para alcanzar la viscosidad y consistencias óptimas, factores determinantes para el éxito del enrollado posterior y la calidad textural del producto final.

Figura 3.

Elaboración de mezcla para la elaboración de conos enrollados.



El área de mezclas presenta deficiencias críticas en sus procesos de limpieza y desinfección. La falta de un cronograma definido para la limpieza del homogeneizador y la ausencia de conexión al sistema CIP obligan a realizar limpiezas manuales ineficientes y poco confiables. Este proceso

manual es particularmente problemático para las tuberías y bombas debido a su complejidad geométrica y difícil acceso. La situación se agrava por la falta de supervisión adecuada, evidenciada por el mal estado de los implementos de limpieza. Estas faltas no solo comprometen la eficiencia operativa al requerir interrupciones frecuentes de producción, pues además ponen en riesgo la calidad e inocuidad del producto final.

Almacenamiento mezcla: la mezcla presenta riesgos críticos para la calidad del producto. El uso de tanques intermedios, aunque eficiente operativamente, introduce variabilidad en el tiempo de retención, exponiendo la mezcla a condiciones que favorecen reacciones indeseadas y crecimiento microbiano. La ausencia de agitación adecuada permite la estratificación y cambios reológicos localizados. Las fluctuaciones ambientales no controladas y la formación de costras en los tanques aumentan dichos inconvenientes. Se evidencia una falta de monitoreo en tiempo real de parámetros críticos como viscosidad, pH y carga microbiana.

Transporte de la mezcla: la mezcla hasta el pulmón del horno presenta riesgos para la calidad del producto. Los tiempos de retención variables y el diseño inadecuado de las tuberías favorecen cambios en pH, viscosidad y promueven procesos fermentativos indeseados. La alta temperatura ambiente (37 – 42 °C) y la falta de monitoreo continuo intensifican estos problemas.

Horneado: se transforma la mezcla líquida en una oblea delgada y crujiente mediante procesos de transferencia de calor y masa. En esta etapa ocurre la evaporación controlada del agua y la gelatinización de los almidones, definiendo las propiedades organolépticas y estructurales del producto final. Los parámetros críticos son la temperatura y el tiempo de cocción, que requieren un monitoreo y control precisos para evitar defectos como obleas quemadas y quebradizas por exceso de cocción, o blandas y húmedas por cocción insuficiente.

La dosificación de la mezcla mediante la flauta dispensadora requiere un control preciso del flujo volumétrico para garantizar una distribución uniforme y reproducible. Este control es esencial para mantener la consistencia en el espesor y peso de las obleas. La viscosidad de la mezcla, aunque no es controlada directamente por el dispensador, debe ser monitoreada y ajustada previamente en el proceso de mezcla para asegurar una dosificación adecuada. Una dosificación inadecuada puede resultar en variaciones como piezas de peso irregular, espesor no uniforme o defectos estructurales, afectando la calidad y la eficiencia del proceso. El monitoreo continuo de parámetros como el flujo volumétrico, el peso de las obleas recién formadas, el color, la textura y el contenido de humedad de las obleas recién horneadas proporciona información valiosa. Esta información permite realizar ajustes en tiempo real, como modificaciones en la velocidad de dosificación, cambios en la temperatura de horneado o ajustes en el tiempo de cocción. Estos ajustes, basados en datos cuantitativos y análisis estadístico, permiten mantener las especificaciones del producto dentro de los rangos establecidos, mejorando así la calidad del producto y aumentando la eficiencia del proceso.

Etapa de enrollado: esta parte del proceso se realiza después del horneado, mientras la oblea aún está caliente y maleable, lo que exige una sincronización precisa entre ambos procesos. La temperatura de la oblea en este momento es un factor determinante que influye en la calidad del cono formado. Una temperatura inadecuada puede ocasionar diversos problemas: si es baja, la oblea puede quebrarse o no adherirse correctamente, resultando en conos defectuosos; si es alta, puede provocar que el cono se deforme o se adhiera al molde de enrollado. Este delicado balance térmico requiere un control preciso y una monitorización constante para asegurar la formación correcta y consistente de los conos, manteniendo las propiedades deseadas de textura y estructura.

El diseño y la precisión del mecanismo de enrollado son esenciales para lograr una forma uniforme y una textura adecuada del cono. Factores como la velocidad de enrollado, la presión aplicada y el tiempo de enfriamiento posterior deben controlarse. Un control de calidad minucioso en esta etapa es decisivo, evaluando parámetros como las dimensiones del cono, su resistencia mecánica y la uniformidad del enrollado.

El almacenamiento y distribución: los conos enrollados completan el proceso de producción. Después del enfriamiento post-horneado, los conos se empaquetan cuidadosamente, incluyendo un rotulado con información nutricional y de trazabilidad. El almacenamiento se realiza en áreas designadas, implementando un sistema FEFO (*First Expired, First Out*) para la gestión de inventario. Este sistema, prioriza la salida de productos basándose en su fecha de caducidad más cercana, asegurando la frescura y minimizando el desperdicio. La distribución se planifica siguiendo este principio FEFO, priorizando los lotes más antiguos dentro del margen de frescura, y utilizando vehículos adecuados para mantener la calidad durante el transporte.

4.1.2. Identificación de Variables y Parámetros del Proceso

Se identificaron cinco variables claves, las cuales se describen en la Tabla 1. El análisis de las variables críticas en la producción de conos enrollados revela desafíos que afectan la estabilidad y calidad del proceso. Un problema fundamental es la inconsistencia en la dosificación de ingredientes, especialmente en componentes añadidos manualmente como la mezcla de oleína y lecitina, la premezcla y los saborizantes. Esta variabilidad en la composición afecta directamente las propiedades reológicas de la masa.

Por otra parte, el control inadecuado de la humedad ambiental, que frecuentemente excede el rango viable, impacta la higroscopicidad de los ingredientes y, consecuentemente, la viscosidad de la mezcla. Este factor, junto con las fluctuaciones en la temperatura de mezclado, altera las

cinéticas de reacción y las interacciones moleculares en la masa. Específicamente, una humedad elevada puede causar una hidratación de los ingredientes secos, mientras que las variaciones de temperatura afectan la solubilidad de los azúcares y la gelatinización del almidón. Estos cambios modifican la estructura y consistencia de la masa, lo que se refleja en variaciones en la textura y cocción del cono durante el horneado.

Otro factor clave es la alineación inconsistente del eje enrollador y el mantenimiento preventivo insuficiente, pues introducen variabilidad mecánica en el proceso, lo que se traduce en defectos de forma y textura en el producto final. Además, la falta de análisis fisicoquímicos exhaustivos en ciertas materias primas compromete la trazabilidad y la consistencia del cono enrollado. Esta limitación en el control de las propiedades de los insumos dificulta la estandarización del proceso y la predicción de las características del producto final.

Tabla 1.

Descripción de las variables críticas del proceso de elaboración de conos enrollados.

Variables Críticas	Descripción	Valor	Impacto	Factores que afectan
Viscosidad de la Mezcla	Es una propiedad reológica en la mezcla de la producción de conos enrollados, mide la resistencia al flujo de la masa pseudoplástica utilizada. Actualmente, se emplea un método de medición mediante una copa de viscosidad, expresando tiempos de flujos en unidades de tiempo en lugar de unidades de viscosidad apropiadas.	120 s	Una viscosidad fuera del rango óptimo puede causar problemas de adhesión y formación de los conos, resultando en defectos de forma y textura.	Temperatura de la mezcla, proporción de ingredientes, tiempo de mezclado, presencia de aditivos, tiempo de cocción.
Temperatura de Mezclado	La temperatura de la mezcla en la preparación de conos enrollados que actualmente no se está controlando en el proceso. Esta variable afecta significativamente la reactividad de los ingredientes y la viscosidad de la masa.	25 °C	Temperaturas fuera del rango viables pueden afectar la consistencia de la masa y la calidad del producto final.	Viscosidad de la mezcla, tiempo de Cocción, velocidad de enrollado, temperatura del horno

Velocidad del Enrollador	Tasa a la que el mecanismo enrollador forma los conos a partir de las obleas planas. En la empresa, se presentan problemas de agarre y atascamiento.	48 Pl/min	Una velocidad inadecuada puede resultar en conos mal formados, atascamientos o falta de agarre de la oblea.	Temperatura de la oblea recién horneada, Composición y grosor de la oblea, Diseño y material del molde del enrollador
Temperatura del Horno	Temperatura a la que se hornean los conos. En la empresa, se observan fluctuaciones que afectan la consistencia del producto.	198 °C	Temperaturas fuera del rango óptimo resultan en sobre cocción o falta de cocción, afectando la textura, color y resistencia de los conos.	Calibración del equipo, variaciones en el suministro de gas, distribución desigual del calor en el horno.
Tiempo de Horneado	Tiempo que los conos permanecen en el horno durante el proceso de cocción. Actualmente, las inconsistencias en este tiempo afectan negativamente la calidad del producto final.	28 s	Un tiempo de horneado inadecuado puede resultar en conos crudos o sobrecozidos.	Temperatura del horno, consistencia de la masa, variaciones en el grosor de la oblea, calibración del temporizador.

4.1.3. Recolección de indicadores actuales de productividad y rendimiento del proceso

La recolección y análisis de indicadores clave de productividad y rendimiento (KPIs) es fundamental para comprender la eficiencia operativa y la productividad del proceso. Estos indicadores proporcionan una visión clara de su estado actual, permitiendo identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas para mejorar la producción.

Indicadores de productividad

Estos suministran una evaluación cuantitativa del desempeño operativo. La tasa de utilización del equipo refleja la eficiencia en el uso de los activos productivos; el costo por unidad establece un parámetro para la eficiencia económica del proceso; el tiempo de parada sugiere oportunidades de mejora en la gestión del mantenimiento; y el consumo energético indica la intensidad energética del proceso, crucial para la mejora de costos operativos y sostenibilidad. La Tabla 2 presenta de manera detallada estos indicadores de productividad, ofreciendo una visión completa de la situación actual. El análisis de estos indicadores revela potenciales ineficiencias en la utilización

de recursos, posibles sobrecostos de producción, interrupciones no planificadas en la línea de producción y un consumo energético que podría mejorar.

Tabla 2

Información sobre los indicadores de productividad

Indicadores de productividad			
Indicador	Descripción	Valor Actual	Importancia
Tasa de Utilización del Equipo	Porcentaje del tiempo que el equipo de producción está en uso.	92 %	Evalúa la capacidad de producción y la eficiencia operativa en el uso de los equipos disponibles.
Costo por Unidad Producida	Costo total para producir una unidad de cono.	132,67 \$	Mide la eficiencia económica del proceso de producción y su impacto en la rentabilidad.
Tiempo de Parada	Tiempo total que el equipo está inactivo debido a mantenimiento, fallos o ajustes.	11 h/semana	Refleja la eficiencia operativa y la necesidad de mejorar la gestión del mantenimiento.
Consumo de Energía	Cantidad de energía utilizada por hora de producción.	28,248 kw/h	Mide la eficiencia energética del proceso de producción y su impacto en los costos operativos y sostenibilidad.

Autor Fuente propia (los cálculos de los valores se encuentran en el Anexo A)

Indicadores de Rendimiento

La tasa y el tiempo de producción por lote indican la capacidad productiva actual, mientras que el porcentaje de defectos señala problemas sustanciales en el control de calidad, impactando negativamente en la eficiencia global y elevando los costos de producción. La eficiencia global del equipo (OEE) refleja una subutilización de los activos productivos, sugiriendo pérdidas considerables en disponibilidad, rendimiento y calidad, a la vez que el costo unitario elevado indica ineficiencias en la utilización de recursos y posibles sobrecostos operativos. La Tabla 2 presenta, de manera detallada, estos indicadores de rendimiento, proporcionando una visión completa de la situación actual de la producción.

Tabla 3

Información sobre los indicadores de rendimiento.

Indicadores de rendimiento			
Indicador	Descripción	Valor Actual	Importancia
Tasa de Producción	Número de conos producidos por hora.	2004 conos/hora	Mide la eficiencia general del proceso de producción.
Tasa de Defectos	Porcentaje de conos que no cumplen con los estándares de calidad.	13 %	Mide la calidad del producto final y la eficiencia del proceso de producción.
Tiempo de producción	Tiempo total para completar un Bach de producción de un lote de conos.	40 minutos/Bach	Indica la rapidez del proceso y su impacto en la productividad.
Eficiencia Global del Equipo (OEE)	Medida de la eficiencia del equipo considerando disponibilidad, rendimiento y calidad.	73 %	Refleja la utilización efectiva de los equipos y la eficiencia operativa en general.
Tasa de retrabajo	Porcentaje de conos que requieren retrabajo para cumplir con los estándares.	5%	Evalúa la necesidad de trabajos adicionales y costos asociados con la corrección de defectos.

Autor Fuente propia (los cálculos de los valores se encuentran en el Anexo B)

4.2. Segunda etapa

4.2.1. Definición de criterios de evaluación

Se ha desarrollado un sistema de evaluación basado en cinco criterios clave, cada uno con una ponderación específica:

- **Impacto en la calidad del producto final (I.C):** este criterio evalúa cómo cada etapa del proceso influye en las características organolépticas y estructurales del cono. Es el factor más importante, ya que determina directamente la satisfacción del cliente y el éxito comercial del producto.

- Frecuencia de aparición de defectos (**F.D**): mide la recurrencia de problemas en el proceso. Permite identificar áreas que requieren atención inmediata para mejorar la calidad y eficiencia general.
- Costos asociados (**C.A**): cuantifica el impacto financiero de cada punto crítico, considerando gastos directos e indirectos, como desperdicios, reprocesos y paradas no programadas. Asegura que las mejoras propuestas sean económicamente viables.
- Variabilidad de los parámetros del proceso (**V.P**): evalúa la consistencia de las variables críticas del proceso. Ayuda a identificar inestabilidades que pueden comprometer la uniformidad y calidad del producto final.
- Complejidad para controlar el punto crítico (**C.C**): analiza la viabilidad técnica y operativa de implementar soluciones efectivas. Considera factores como la tecnología requerida, la necesidad de personal especializado y la frecuencia de monitoreo.

Este sistema de evaluación proporciona un enfoque equilibrado que considera aspectos de calidad, consistencia, economía y viabilidad técnica. La selección de estos cinco criterios responde directamente a las necesidades específicas del proceso de producción de conos enrollados y las demandas de la industria alimentaria. El impacto en la calidad del producto final es crucial dado que las características organolépticas y estructurales del cono son determinantes para la aceptación del consumidor. La frecuencia de aparición de defectos y la variabilidad de los parámetros del proceso son esenciales para mantener la consistencia en la producción a gran escala de alimentos. Los costos asociados reflejan la realidad económica de la producción industrial de alimentos, donde la eficiencia y la reducción de desperdicios son prioritarias. La complejidad para controlar el punto crítico aborda los desafíos prácticos de implementar mejoras en un entorno de producción alimentaria altamente regulado.

4.2.2. Matriz de priorización de puntos críticos

La matriz de priorización empleada para identificar el punto crítico desafiante en el proceso de producción de conos enrollados se diseñó específicamente para nuestro contexto productivo (ver Tabla 4). La selección de los factores clave surgió de un análisis de la línea de producción y de entrevistas con operarios y supervisores. La ponderación de estos criterios, en una escala de 1 a 5, donde 1 representa menor criticidad y 5 mayor criticidad, se estableció mediante un proceso colaborativo que involucró al equipo de calidad y a los responsables de producción. Este grupo evaluó la importancia relativa de cada factor basándose en datos históricos de producción y en su experiencia acumulada en la fabricación de conos.

Tabla 4.

Matriz de priorización

Punto Crítico	I.C (30%)	F.D (20%)	C.A (20%)	V.P (15%)	C.C (15%)	Puntuación Total
Recepción y Almacenamiento materia prima	3	2	3	2	2	2.50
Premezcla	4	3	3	3	3	3.30
Mezcla	5	5	4	5	4	4.65
Transporte de la Mezcla	4	2	2	3	3	2.90
Horneado	5	4	5	5	5	4.80
Enrollado	5	4	4	4	5	4.45
El almacenamiento y distribución de producto final	3	2	3	2	2	2.50

4.2.3. Selección del punto crítico más desafiante

Se ha determinado que la etapa de mezcla es la más estratégica para enfocar los esfuerzos de mejora. Esta decisión se basa en la matriz de priorización. Aunque la etapa de horneado obtuvo una puntuación ligeramente superior (4.8 vs. 4.65 para la etapa de mezcla), se ha optado por priorizar la etapa de mezcla por dos razones: primero, esta etapa influye directamente en la variación de las variables críticas del proceso y actualmente carece de un sistema de

automatización para la dosificación de oleína y lecitina; y segundo, la etapa de mezcla es fundamental para la dosificación y distribución homogénea de los ingredientes, la formación de redes de gluten y la incorporación de aire, factores que influyen directamente en la textura, estabilidad y características organolépticas del producto final. Ajustar parámetros como el tiempo de mezclado, tiempo de flujo y viscosidad es fundamental para los procesos de formación y horneado subsiguientes. Además, es importante señalar que las variables críticas de la etapa de horneado son manejadas por el equipo de mantenimiento. Aunque se tiene acceso a la información, la manipulación directa de estas variables está restringida por protocolos de seguridad y especializaciones técnicas, lo cual limita nuestra capacidad de intervención y mejoramiento inmediato en esa fase del proceso.

Desde una perspectiva de control de procesos, la etapa de mezcla ofrece una accesibilidad superior para ajustar variables críticas como viscosidad, temperatura, humedad relativa y dosificación de ingredientes. Además, la realización de diseños experimentales es más viable en esta fase que en las posteriores, permitiendo una caracterización de la influencia de cada variable sobre las propiedades finales.

4.2.4. Variables críticas identificadas

- ✓ La temperatura de la mezcla (T) : es una variable crítica en la elaboración de conos enrollados que actualmente no se controla en la empresa. Esta falta de control puede afectar directamente la solubilidad de los ingredientes, especialmente del azúcar, así como la hidratación de la harina y la viscosidad general de la mezcla. Una temperatura adecuada facilita la absorción de agua por las proteínas y almidones, factor esencial para el desarrollo de la red de gluten, y afecta las propiedades de flujo durante el proceso de horneado. Para mejorar este proceso,

se propone implementar el uso de termómetros infrarrojos, permitiendo un monitoreo preciso y no invasivo de la temperatura de la mezcla.

- ✓ La viscosidad del mezclado (ν) : influye en el bombeo de la masa al pulmón, su distribución en los moldes y la retención adecuada de burbujas de aire, afectando la textura final del cono. Actualmente, la empresa usa una copa Zahn N.4 para medir el tiempo de flujo en segundos, práctica común en la industria. Para mejorar la precisión sin cambiar el método debido a restricciones presupuestarias, se propone desarrollar una curva usando las constantes de la Copa Zahn para calcular la viscosidad y ajustarla a la ley de potencia. Esto correlacionará los tiempos de flujo con la viscosidad real en unidades pascales por segundos ($Pa * s$), mejorando la comprensión del comportamiento reológico de la mezcla. Esta mejor comprensión permitirá ajustar con mayor precisión parámetros como el tiempo de mezclado, lo que contribuirá a mejorar la calidad y consistencia del producto final sin alterar la operación diaria ni incurrir en gastos significativos de equipamiento.
- ✓ El tiempo de mezclado (t_m) : es crucial para lograr las propiedades deseadas de la masa, afectando el desarrollo de la red de gluten, la hidratación completa de los ingredientes y la incorporación de aire. Actualmente, se utiliza un tiempo aproximado de 12 min, con ajustes basados en observación visual. Para mejorar este proceso, se recomienda establecer un tiempo estandarizado basado en pruebas controladas, considerando la adición manual de ingredientes. Esto permitirá una mayor consistencia en la calidad del producto final.
- ✓ La humedad relativa (H_r) y la temperatura ambiente (T_a): en el área de mezclado son factores que actualmente no se controlan a pesar de tener impacto en el proceso. Las variaciones en H_r afectan la absorción o pérdida de agua en la mezcla, alterando su composición y la hidratación de componentes higroscópicos como harina y azúcar, lo cual influye en la


formación de la red de gluten y la viscosidad de la masa, aspectos determinantes en las propiedades reológicas del producto [8]. La temperatura ambiente influye en la temperatura final de la mezcla y la actividad microbiana. Para abordar estos factores, se propone implementar un sistema de monitoreo continuo utilizando termohigrómetros.

4.2.5. Análisis fisicoquímicos y organolépticos del producto final

Para determinar el rango de las variables a controlar se requiere un enfoque multidimensional que integra aspectos regulatorios, especificaciones del cliente y características sensoriales del producto. La Tabla 5 presentada sintetiza los criterios críticos establecidos por la norma técnica colombiana NTC 1241 y las exigencias específicas del mercado, abarcando tanto propiedades organolépticas como fisicoquímicas.

Tabla 5.

Propiedades fisicoquímicas.

Foto	Propiedades	Especificación	Valor
	Organoléptico	Color	Dorado uniforme a marrón claro depende de la referencia
		Sabor	Ligeramente dulce con notas sutiles de vainilla, chocolate
		olor	Aroma suave a galleta horneada
		Textura	Crujiente
	Fisicoquímicas	Humedad relativa (%)	2,3 - 5,5
		Peso (g)	17,8 -19,2
		Longitud (mm)	146 -150
	Diámetro (mm)	49-50	

Autor Fuente propia (con datos de ficha tecnica de la empresa de Soluciones Omega S.A)

4.2.6. Análisis reológico de la mezcla para conos enrollados

La copa Zahn N.4, empleada para medir la viscosidad en la empresa mediante la Ec. 2, es un instrumento diseñado principalmente para fluidos de baja densidad como aceites. Su aplicación en mezclas altamente viscosas de harina y agua presenta desafíos debido al comportamiento pseudoplástico de estas, donde la viscosidad disminuye al aumentar el esfuerzo aplicado. Para superar estas limitaciones, se ha adaptado la metodología fundamentándose en principios de reología y mecánica de fluidos no newtonianos. Esta adaptación se basa en modelos matemáticos que incorporan factores de corrección para fluidos pseudoplásticos, permitiendo una caracterización precisa de la mezcla en condiciones de reposo y flujo [6].

$$\nu = k * (t - c) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde, ν es la viscosidad dinámica [$\text{Pa} * \text{s}$]; k (14.8 Pa) y c (5 s) son constantes de la copa Zahn; y t (s) el tiempo de flujo medido. Las constantes utilizadas en la ecuación de viscosidad, aunque []no ideales para la mezcla de conos enrollados, están certificadas mediante fluidos de viscosidades conocidas y cumplen con las normas establecidas por ASTM D4212. Ante la ausencia de reómetros, se implementó un método alternativo utilizando la copa Zahn N.4, empleando el tiempo de flujo como parámetro de control en la producción de conos. Para una caracterización reológica más completa, se determinaron la tasa de cizallamiento ($\dot{\gamma}$) como el inverso de los tiempos de flujo medidos. Este análisis ayuda a cuantificar el comportamiento pseudoplástico de la mezcla, lo que permite establecer correlaciones entre la viscosidad aparente y la tasa de cizallamiento. Los datos obtenidos, presentados en la Tabla 6, son útiles para mejorar las

condiciones del proceso y lograr una mayor consistencia en las propiedades viscoelásticas del producto final.

Tabla 6.

Datos de viscosidad dinámica vs tasa de cizallamiento.

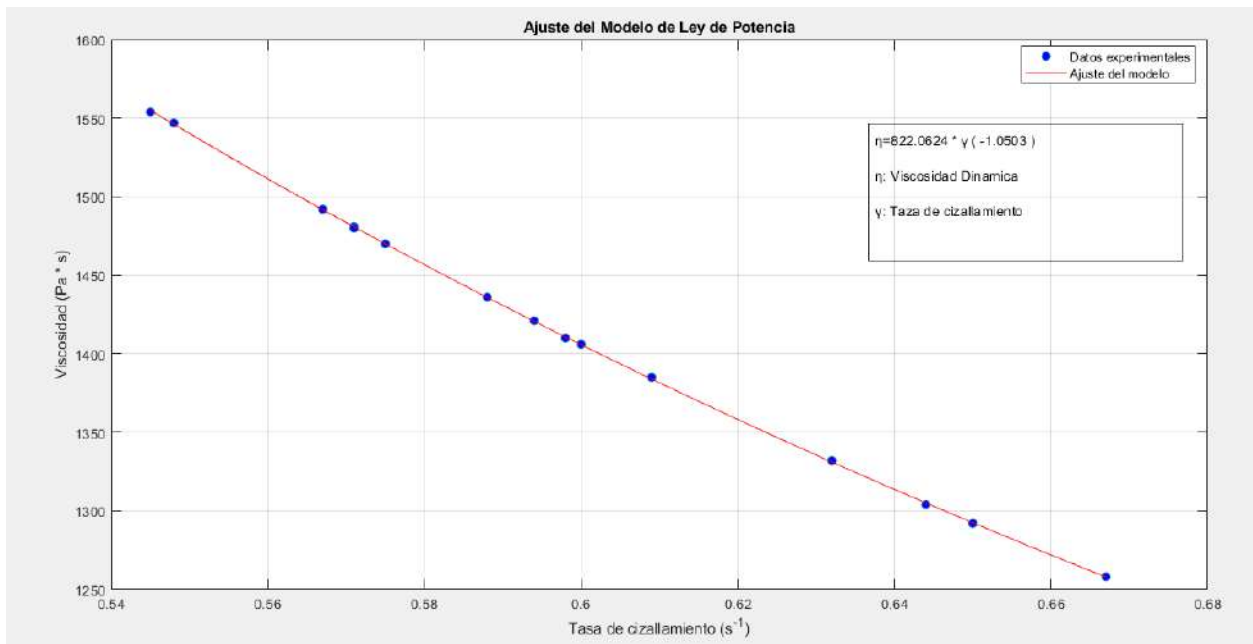
Tiempo de flujo (min)	Taza de cizallamiento (min⁻¹)	Viscosidad Dinámica (Pa * s)
1.54	0.65	1292
1.55	0.644	1304
1.54	0.65	1292
1.64	0.609	1385
1.67	0.598	1410
1.7	0.588	1436
1.68	0.594	1421
1.83	0.548	1547
1.74	0.575	1470
1.75	0.571	1481
1.5	0.667	1258
1.5	0.65	1292
1.58	0.632	1332
1.58	0.609	1385
1.67	0.6	1406
1.67	0.567	1492
1.75	0.571	1480
1.75	0.6	1406
1.83	0.571	1480
1.83	0.545	1554

Los datos de viscosidad obtenidos mediante las correlaciones de la copa Zahn N.4 se sometieron a un análisis reológico para caracterizar el comportamiento del fluido en cuestión. Específicamente, se procedió a ajustar estos datos al modelo reológico de ley de potencia, utilizando MATLAB para realizar un ajuste no lineal. Este proceso generó una ecuación característica (Ec.3) y permitió visualizar la tendencia de los datos, como se ilustra en Figura 4.

$$\eta = 822.0624 * \gamma^{-1.0503} \quad (\text{Ec. 3})$$

Figura 4

Modelo ley de potencia.



El análisis revela un comportamiento pseudoplástico (shear-thinning) pronunciado, caracterizado por una disminución significativa de la viscosidad dinámica con el aumento de la tasa de cizallamiento. Este comportamiento se cuantificó mediante el ajuste al modelo de Ley de Potencia Figura 4. El análisis estadístico de los datos reológicos muestra un rango de viscosidad dinámica de 1258 a 1554 $Pa \cdot s$, con una media de 1405 $Pa \cdot s$ y una desviación estándar de 88.45 $Pa \cdot s$. El coeficiente de variación (C_v) resultante de 5.98 %, aunque cercano, no supera el umbral del 6 % recomendado por la norma ISO 22716:2007 para procesos bien controlados en la industria alimentaria. Esta variabilidad, relativamente pequeña, podría tener implicaciones significativas en la consistencia del producto final y la eficiencia del proceso de producción. Dada la importancia del comportamiento reológico en la calidad del producto y la eficiencia del proceso, el

mejoramiento de la producción de conos enrollados debe enfocarse en mantener la viscosidad dentro del rango identificado. Tabilo-Munizaga y Barbosa-Cánovas (2005) enfatizan que el control preciso de la reología en mezclas de alimentos complejos es crucial para la calidad del producto final y la eficiencia del proceso.

4.2.7. Diseño experimental en la elaboración de conos enrollados

Como resultado del diseño experimental implementado, se recopilaron datos para cada ensayo realizado. La Tabla 7 presenta un resumen de estos resultados, incluyendo las variables de la mezcla y los parámetros de calidad del producto final. Estos datos fueron decisivos para identificar los rangos viables de operación y establecer relaciones entre las variables del proceso y las características de los conos enrollados:

Tabla 7.

Datos de las variables del experimento.

Lote	Variable de la mezcla						Calidad Del Producto Final				
	t_m (min)	t_f (min)	η (Pa * s)	T_a (°C)	H_r (%)	T_m (°C)	R (g)	H (%)	P (g)	L (mm)	D (mm)
1	8	1.54	1292	30.6	52	30.6	240	2.4	16.5	168	49.5
2	8	1.55	1304	33.2	48	32.4	220	2.2	17.2	157	49.3
3	9	1.54	1292	32.7	49	29.2	300	3.0	18	149	49.7
4	9	1.64	1385	34.3	42	30.8	370	3.7	18,6	150	49.9
5	10	1.67	1410	27	45	25.2	440	4.4	18.7	149	49.6
6	10	1.70	1435	27.3	52	25.5	230	2.3	18.3	148	49.4
7	11	1.68	1421	26.3	55	24.6	550	5.5	18.1	151	50.1
8	11	1.83	1546	24.1	53	22.9	580	5.8	19.2	152	50.2

9	12	1.74	1469	22.9	55	21.9	590	5.9	19,9	150	49.8
10	12	1.75	1481	22.9	86	22.1	630	6.3	20,5	153	50.3
11	9.33	1.50	1259	26.2	48	27.4	230	2.3	18.4	148	49.5
12	8.75	1.50	1259	25.6	52	29.6	200	2.0	17.8	146	49
13	9.75	1.58	1332	32.6	42	29.3	280	2.8	18.6	149	49.7
14	9.67	1.58	1332	32.7	49	29.2	470	4.7	18.9	150	49.9
15	10.37	1.67	1406	25.9	54	24.4	430	4.3	18.8	149	49.8
16	10.25	1.67	1406	25.4	52	23.9	280	2.8	18.5	148	9.6
17	10.50	1.75	1480	22.2	52	21.4	280	2.8	18.4	148	49.5
18	10.92	1.75	1480	23.7	58	22.5	600	6.0	19.2	142	50.2
19	10.70	1.83	1554	22.9	86	22.1	540	5.4	19.1	131	50.1
20	11.17	1.83	1554	25.2	68	23.7	620	6.2	19.3	133	50.3

4.2.8. Rangos adecuados de las variables críticas en la etapa de mezclado

4.2.8.1. Variables controladas

El análisis experimental se centró en mejorar dos variables críticas que poden ser manipuladas directamente: el tiempo de mezclado y la viscosidad aparente de la mezcla, las cuales demostraron tener un impacto significativo en las características del producto final requeridas por el cliente y las normas técnicas.

- ✓ **Tiempo de mezclado (t_m):** se estableció un rango favorable entre 9 y 10 minutos. Este intervalo permite un desarrollo adecuado de la red de gluten sin llegar al sobre-mezclado, crucial para la textura y estructura final del cono. Los conos producidos dentro de este rango mostraron consistentemente la resistencia (R) requerida (300-1000 g). Este hallazgo se alinea con los estudios de Pareyt et al. (2009), quienes reportaron tiempos de mezclado similares para el mejoramiento del desarrollo de gluten en productos horneados similares.

- ✓ **Tiempo de flujo (t_f):** se estableció un rango entre 95 y 100 segundos, directamente relacionado con la viscosidad aparente (η), la cual se calculó mediante modelo de ley de potencia. Este parámetro es fundamental para el control del proceso en planta, dado el uso de la copa Zahn N.4 para las mediciones de viscosidad.
- ✓ **Viscosidad aparente (η):** el rango se determinó entre 1300 y 1400 Pa * s. Esta viscosidad demostró ser crítica para lograr las dimensiones especificadas del cono (longitud entre 146 y 150 mm y diámetro entre 49 y 50 mm) y facilitar un moldeo uniforme. Este rango es consistente con los hallazgos de Skarra et al. (2014) para masas de obleas, y asegura una distribución adecuada de la mezcla durante el proceso de horneado y enrollado.

4.2.8.2. *Variables no controladas*

Aunque no fueron manipulados directamente en los experimentos debido a limitaciones de instrumentación y presupuesto, estos elementos fueron monitoreados cuidadosamente a lo largo del estudio, y sus intervalos se establecieron en función de los valores propuestos por los factores que sí pudieron ser manipulados activamente. A continuación, se observaron rangos viables para las siguientes variables:

- ✓ **Temperatura de la mezcla (T_m):** se determinó que de 25 a 28 °C facilita la solubilidad adecuada de los ingredientes, especialmente del azúcar, y promueve una hidratación óptima de la harina, factores cruciales para el desarrollo de la red de gluten y las propiedades de flujo durante el horneado. Concuerda con las recomendaciones de Cauvain y Young (2009) para productos horneados delgados.
- ✓ **Condiciones ambientales:** el rango de la temperatura ambiente (T_a) es de 22 a 25 °C y humedad relativa (H_r) de 50 a 60 %. Estas condiciones, más estrictas que las generalmente recomendados por Manley (2011) para panaderías, reflejan la sensibilidad particular de la

producción de conos a las variaciones ambientales, considerándose estos factores relevantes para la consistencia en las propiedades de la mezcla y la calidad del producto final.

El análisis de los parámetros de calidad del producto final reveló una estrecha interrelación entre las variables del proceso y las características del cono, alineándose con los hallazgos de Hadnadev et al. (2013) sobre la interdependencia de las propiedades físicas en productos horneados delgados. La resistencia, el peso, la longitud y el diámetro de los conos demostraron ser altamente sensibles a las variaciones en las condiciones de proceso.

4.3. Tercera etapa

4.3.1. Alternativa implementada

En primer lugar, se revisó la calibración del sistema de control automático del tiempo de mezclado, un PLC conectado a un temporizador digital de alta precisión. Este sistema permite mantener el tiempo de mezclado dentro del rango viable identificado de 9 a 10 minutos, concluyente para el desarrollo adecuado de la red de gluten sin llegar al sobre mezclado.

Para abordar la variable crítica de viscosidad, se implementó un modelo de ley de potencia, utilizando datos obtenidos de un protocolo estandarizado de medición del tiempo de flujo con la copa Zahn N.4. Este modelamiento permite correlacionar el tiempo de flujo con la viscosidad aparente, manteniendo el rango entre 1300 y 1400 $Pa \cdot s$. Se incorporó un sistema de retroalimentación que ajusta el tiempo de mezclado basado en estas mediciones, asegurando la consistencia del producto final.

La temperatura de la mezcla se monitorea mediante un pirómetro, lo cual ayuda a revisar el comportamiento de la viscosidad en relación con la temperatura de mezclado. Se estableció que el rango de la temperatura de la mezcla es de 25-28 °C, facilitando la solubilidad adecuada de los

ingredientes y mejorando la absorción de agua por parte de la harina. Este control de temperatura sienta las bases para futuras mejoras del proceso.

Reconociendo la importancia de las condiciones ambientales, se implementó un sistema de monitoreo mediante un Termohigrómetro en el área de mezclado. Este instrumento permite realizar un seguimiento continuo de la temperatura ambiente y la humedad relativa.

4.3.2. Comparación de los indicadores claves

Indicadores de productividad

El análisis de los indicadores de productividad revela mejoras sustanciales en el proceso de elaboración de conos enrollados, como se muestra en la Tabla 8. Los cálculos para obtener cada uno de estos índices se encuentran explicados en el Anexo A. El incremento del 4 % en la tasa de utilización del equipo, junto con una reducción del 27 % en el tiempo de parada, indica un mejoramiento en la continuidad operativa. Esto sugiere un control más efectivo de variables críticas como la viscosidad, lo cual es fundamental para la calidad del producto final.

Tabla 8

Comparación de los indicadores productividad.

Indicadores de productividad			
Indicador	Antes	Después	Mejora
Tasa de Utilización del Equipo	92 %	96 %	4 %
Costo por Unidad Producida	132,67 \$	111,84 \$	19 %
Tiempo de Parada (h / semana)	11	8	27 %
Consumo de Energía (kw/ h)	28.248	25.62	9 %

La reducción del 9 % en el consumo energético, junto con el aumento del 4 % en la utilización del equipo, demuestra un mejoramiento del proceso de mezclado. La aplicación del modelamiento de ley de potencia para el control de la viscosidad y el uso de un PLC para regular el tiempo de

mezclado han sido factores clave en esta mejora. Estas técnicas han permitido un control más preciso de las variables críticas, resultando en una mayor eficiencia energética sin comprometer la calidad del producto final.

Por otra parte, se logró una reducción del 19 % en el costo por unidad producida. Esta disminución significativa, junto con las mejoras en otros indicadores, refleja el impacto positivo de los cambios implementados. La combinación de menor costo unitario, reducción del consumo energético y aumento en la tasa de utilización del equipo demuestra una gestión más efectiva de los recursos.

Indicadores de rendimiento

La implementación del modelo de ley de potencia para el control de viscosidad y el tiempo de mezclado tiene un impacto positivo en los indicadores de rendimiento del proceso de conos enrollados, como se muestra en la Tabla 9. Los cálculos detallados para obtener cada uno de estos índices se encuentran explicados en el Anexo B, proporcionando una base sólida para la evaluación del rendimiento del proceso antes y después de la implementación de las mejoras.

Tabla 9

Comparación de los indicadores rendimiento.

Indicadores de rendimiento			
Indicador	Antes	Después	Mejora
Tasa de Producción (conos/hora)	2004	2574	22 %
Tasa de Defectos (%)	13 %	9 %	4 %
Tiempo de producción	40	38	5 %
Eficiencia Global del Equipo (OEE)	74 %	82 %	8 %
Tasa de Retrabajo	2 %	5 %	3 %

El aumento del 22 % en la tasa de producción refleja una mejora en eficiencia del proceso de formación. Esto puede atribuirse a un mejor control de las propiedades de la reología de la masa, lo que facilita su manipulación y formado. La reducción del 4 % de la tasa de defectos indica un mejor control en la consistencia de la masa y en las propiedades fisicoquímicas del producto final, aspectos críticos en la producción de galletería.

La eficiencia global del equipo (OEE) aumentó del 74 al 82 %. Este dato se calcula típicamente considerando la disponibilidad, el rendimiento y la calidad de los equipos. El incremento indica un uso más efectivo de la maquinaria, especialmente en las etapas de mezclado y formación. Esta mejora sugiere que se ha logrado reducir los tiempos de inactividad, aumentar la velocidad de producción y mantener una mayor consistencia en la calidad del producto durante estas fases críticas del proceso. El tiempo de producción se redujo de 40 a 38 s, representando una mejora del 5 %, lo cual indica que aún existen oportunidades de mejora en otras etapas del proceso, como el horneado o el enfriamiento. Por último, la tasa de retrabajo mostró una variación del 3 %. Este cambio, aunque pequeño, indica un área de oportunidad en el proceso productivo. Es probable que este incremento se deba a la implementación de controles de calidad más estrictos o a la detección más precisa de imperfecciones en el producto final.

4.3.3. Resultados de laboratorio

Los resultados del análisis de laboratorio, presentados en la Tabla 10, evidencian que el producto cumple con los estándares establecidos en la normativa aplicable, incluyendo la NTC 1241 y la resolución 4506/13. En varios aspectos, como el contenido de proteína y los recuentos microbiológicos, los valores obtenidos están en los límites mínimos requeridos. Este cumplimiento refleja no solo la conformidad normativa, sino también la implementación de altos estándares de calidad y seguridad alimentaria en el proceso de producción.

Tabla 10.*Resultados de laboratorio Asbioquim Ltda.*

Informe de resultados				
Muestra		Cono enrollado		
Cantidad		250 g		
Condiciones de la muestra		cumple		
Tomado por		Asbioquim Ltda		
Especificaciones Técnicas				
Características	Descripción	Unidades	Especificación	Limites
Fisicoquímicas	pH (20°C)	Unidades de pH	7	5.6 - 9.5
	Humedad	g/100g	4.3	2.0 - 5.5
	Plomo	mg/kg	ND	Máx. 0.2
	Aflatoxinas	Ppb	ND	Máx. 10
	Proteína en base seca	g/100g	12.14	Min 3
Microbiológicas	Recuento de Mohos	UFC/g o ml	< 100	< 100
	Recuento Escherichia coli	UFC/g o ml	< 10	< 10
	Recuento Staphylococcus Aureus coagulasa positiva	UFC/g o ml	< 100	< 100
	Detención de salmonella	UFC/g o ml	Ausencia	Ausencia
	Detección de Listeria monocytogenes	UFC/g o ml	Ausencia	Ausencia

Autor Fuente propia (con datos de Asbioquim Ltda)

5. Conclusiones

- El diagnóstico del proceso de elaboración de conos enrollados en la línea VTRO de Soluciones Omega S.A. identificó la etapa de mezclado como uno del punto más crítico en la matriz de priorización. Esta etapa se caracteriza por una variabilidad en el tiempo de mezclado y la viscosidad de la mezcla, factores que afectan la calidad del producto final. La falta de un sistema de automatización para la dosificación de oleína y lecitina, sumada a la ausencia de control preciso en variables como la temperatura de mezclado, la temperatura ambiente y la humedad relativa, intensifica esta variabilidad. Este hallazgo es consistente con los estudios de Pareyt et al. (2009), que subrayan la importancia del control del tiempo de mezclado para el desarrollo adecuado de la red de gluten en productos horneados, permitiendo enfocar los esfuerzos de mejora en el área de mayor impacto potencial.
- La implementación de un diseño experimental permitió establecer rangos adecuados para variables críticas, como el tiempo de mezclado (9-10 min) y la viscosidad aparente (1300-1400 $Pa \cdot s$). Estos rangos fueron fundamentales para lograr una reducción del 4 % en la tasa de defectos y un incremento del 22 % en la producción. Los resultados coinciden con estudios previos, como los de Manley (2011), que resaltan la importancia del control preciso de los parámetros operativos en la producción de galletas.
- El análisis de los indicadores de rendimiento y productividad, tras la implementación de las mejoras en la etapa de mezclado, mostró un aumento del 8 % en la eficiencia global del equipo (OEE) y una reducción del 9 % en el consumo energético. Estos resultados, junto con el cumplimiento de los estándares NTC 1241 y la Resolución 4506/13, confirman que el mejor control del proceso mejora tanto la eficiencia operativa como la calidad del producto. Además, la reducción del 19 % en el costo por unidad producida evidencia el impacto positivo de estas mejoras en la calidad y la rentabilidad de la producción de conos enrollados, alineándose con los principios de eficiencia energética y control de calidad.

6. Recomendaciones

1. Instalar un sistema de medición de viscosidad en línea para monitoreo en tiempo real, reemplazando el método actual de la Copa Zahn N.4. Esto permitirá un control más preciso de la viscosidad de la mezcla, mejorando la consistencia del producto final.
2. Implementar un sistema automatizado para controlar la temperatura (22-25 °C) y la humedad relativa (50-60 %), asegurando la estabilidad del proceso y una calidad consistente del producto, especialmente por la sensibilidad de los ingredientes higroscópicos.
3. Implementar un programa de capacitación continua para los operarios, centrado en el manejo del nuevo sistema de control de procesos y la interpretación de los datos reológicos, para asegurar que las mejoras técnicas se traduzcan en prácticas operativas efectivas.
4. Investigar las causas del aumento en la tasa de retrabajo y desarrollar estrategias para reducirla, asegurando una mayor eficiencia en el proceso.
5. Continuar reduciendo el tiempo de producción, ya que aún existen oportunidades para mejorar en esta área.
6. Realizar un análisis costo-beneficio detallado para evaluar el impacto económico de las mejoras implementadas, considerando los ahorros en energía y reducción de desperdicios frente a posibles aumentos en los costos de materias primas o mano de obra.

Referencias

- [1] Gustavo, M. T. W., & Mecatrónica, I. E. (2017). Diseño y construcción de un sistema automático para la cocción de obleas destinadas a la elaboración de conos de helados. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7651>
- [2] coronel Culqui, J. L. (2017). evaluación de las características fisicoquímicas del barquillo tipo oblea enrollada durante su tiempo de vida UT11" [UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA]. <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a1c3e070-b489-4e0d-80ad-f8730cf9f989/content>
- [3] Velásquez, C., & José, H. (2006). Reología de fluidos y su aplicación en el área de los alimentos. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59571>
- [4] Soluciones Omega S.A. (2023, 21 noviembre). INICIO - Soluciones Omega S.A. Soluciones Omega S.A -. <https://solucionesomega.net/>
- [5] Horno Franz Haas MTA para conos y vasos moldeados | Bühler Group. (s. f.). https://www.buhlergroup.com/global/es/products/franz_haas_mta_bakingovenformoldedconesandcups.html
- [6] *¿Cómo usar una copa de viscosidad?* (s/f). Labomat Essor. Recuperado el 22 de septiembre de 2024, de <https://labomat.eu/es/preguntas-mas-frecuentes/594-como-usar-una-copa-de-viscosidad.html>
- [7] Riveiro, L. C. Q. (2009). Reología de productos alimentarios. Univ Santiago de Compostela. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=a6Us33_kYXAC&oi=fnd&pg=PP5&dq=reolog%C3%ADa+en+la+elaboracion+de+conos+enrollados&ots=YxOxrgp3W6&sig=ftY_uqidQC1hKHioYPXSKqSspl8#v=onepage&q&f=false

- [8] Jesús, P. C. G., & Rayda, G. P. L. (2017). Comparación fisicoquímica y reológica de harinas: trigo (*Triticum aestivum*), centeno (*Secale cereale*) y triticale (x *Triticosecale*) en elaboración de pan. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2967>
- [9] ASTM International. (2021). ASTM D4212-21 Standard Test Method for Viscosity by Dip-Type Viscosity Cups. West Conshohocken, PA. https://industrialphysics.com/standards/astm-d4212/?srsltid=AfmBOopkGVLA252kt9pq_ICcb7lz_petQsm_aD_MUxk0ytySMBkyOI3D
- [10] Manley, D. (2011). Manley's technology of biscuits, crackers and cookies. Woodhead publishing. <https://www.elsevier.com/books/manleys-technology-of-biscuits-crackers-and-cookies/manley/978-1-84569-562-2>
- [11] Baudoin, W., Biasutto, S., Stassi, A., & Rubio, M. (2017). Rheological properties of wheat flour dough with different compositions. *Procedia Food Science*, 1, 1497-1504. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211601X11002276>
- [12] Sahin, S., & Sumnu, S. G. (2006). Physical properties of foods. Springer Science & Business Media. <https://link.springer.com/book/10.1007/0-387-30808-3>
- [13] Reiner, M. y Bingham, E. (2021). FUNDAMENTOS DE REOLOGIA. En *Cuaderno FIRP S521C* (págs. 1–40). <https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/07/S521C.pdf>
- [14] Ministerio de Salud y Protección Social. (2013). Resolución 4506 de 2013. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-4506-de-2013.pdf>
- [15] ICONTEC. (2007). NTC 1241 - Productos de molinería. Galletas. <https://tienda.icontec.org/gp-productos-de-molineria-galletas-ntc1241-2007.html>
- [16] Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) | SafetyCulture. (2024, January 15). SafetyCulture. <https://safetyculture.com/es/temas/bpm-buenas-practicas-de-manufactura/>

- [17]Termohigrómetro De Monitoreo. (n.d.). <https://blamis.com.co/higrometro-de-monitoreo?srsltid=AfmBOooWpZl1iRqM5VdpDYZJaGTb6Ax9sWOOUdo5aPNNwLIBTNDRueBr>
- [18](S/f). All-spares.com. Recuperado el 5 de septiembre de 2024, de <https://all-spares.com/es/infrared-thermometer-uni-t-ut301c/>
- [19]Termobalanza | Balanza Analizadora de humedad | OHAUS MB27. (2023, 2 junio). Proconsa México. <https://proconsamexico.com/productos/medidores-de-humedad/balanza-analizadora-de-humedad/termobalanza/>
- [20]Aula. (2023, 15 mayo). Qué es un PLC, para qué sirve y cómo funciona. *aula21 | Formación para la Industria*. <https://www.cursosaula21.com/que-es-un-plc/>
- [21]Flow. (2023, 14 agosto). *¿Qué son los fluidos no newtonianos? Ejemplos en la industria*. <https://autmix.com/blog/fluidos-no-newtonianos-ejemplos>
- [22]Higroscopia, ¿qué es y qué compuestos tienen esta capacidad? (s. f.). https://www.vadequimica.com/blog/2017/01/higroscopia-que-es-y-que-compuestos-tienen-esta-capacidad/?srsltid=AfmBOor18pdv_IyGeOFe9Dbc_wMNYa4_wngU5JyMVPUIaqW8duMpBl
- [23]Skarra, L., Flesher, J., & Baier, S. K. (2014). Rheological characterization and process design for cookie cream manufacture. *Journal of Food Engineering*, 121, 73-82. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877413004640>

- [24]Cauvain, S. P., & Young, L. S. (2009). The ICC handbook of cereals, flour, dough & product testing: Methods and applications. DEStech Publications, Inc. <https://www.destechpub.com/product/icc-handbook-of-cereals-flour-dough-product-testing/>
- [25]Hadnađev, T. R. D., Torbica, A. M., & Hadnađev, M. S. (2013). Influence of buckwheat flour and carboxymethyl cellulose on rheological behaviour and baking performance of gluten-free cookie dough. Food and Bioprocess Technology, 6(7), 1770-1781. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-012-0841-6>
- [26]Interlake Mecalux. (2023). *FEFO: Optimizing inventory management for perishable goods*. Interlake Mecalux. <https://www.interlakemecalux.com>

Apéndices

Apéndice A. Índice de productividad

Los índices de productividad son medidas esenciales para evaluar la eficiencia y efectividad de los procesos de producción. En este anexo, presentamos los cálculos de cuatro indicadores clave que nos permiten entender el desempeño operativo de nuestra línea de producción de conos enrollados.

➤ Tasa de Utilización del Equipo

Para calcular este indicador, nos basamos en la relación entre el tiempo real que nuestra línea estuvo en funcionamiento y el tiempo total planificado para la producción. Obtuvimos estos datos directamente de nuestras órdenes de producción diarias, lo que nos proporciona una visión precisa de cómo estamos aprovechando el tiempo disponible.

Antes

$$Tasa\ de\ utilización\ del\ equipo\ (\%) = \left(\frac{Tiempo\ De\ Operación\ Real}{Tiempo\ Planificado} \right) * 100 \quad Ec. A1$$

$$Tasa\ de\ utilización\ del\ equipo(\%) = \left(\frac{22\ h}{24\ h} \right) * 100$$

$$Tasa\ de\ utilización\ del\ equipo = 92\ \%$$

Después

$$Tasa\ de\ utilización\ del\ equipo(\%) = \left(\frac{Tiempo\ De\ Operación\ Real}{Tiempo\ Planificado} \right) * 100 \quad Ec. A2$$

$$Tasa\ de\ utilización\ del\ equipo(\%) = \left(\frac{23\ h}{24\ h} \right) * 100$$

$$Tasa\ de\ utilización\ del\ equipo = 96\ \%$$

➤ Costo por Unidad Producida

El cálculo del costo por unidad producida implicó un análisis detallado de nuestros costos de producción. Se consideran todos los elementos que intervienen en la elaboración de los conos

enrollados, desde las materias primas hasta el consumo energético de nuestros equipos. Aunque no se puede compartir los números por razones de confidencialidad, este indicador proporciona una visión clara de la eficiencia económica de nuestro proceso. Nos permite identificar áreas donde se puede mejorar, ya sea en el uso de materiales o en el consumo de energía, lo que es fundamental para mantener la competitividad de nuestro producto en el mercado.

Antes

$$\text{Costo por unidad producida} = \left(\frac{\text{costo total batch}}{\text{Tasa de producción}} \right) \text{ Ec. A3}$$

$$\text{Costo por unidad producida} = \left(\frac{177258 \frac{\$}{\text{bach}}}{1336 \frac{\text{und}}{\text{bach}}} \right)$$

$$\text{Costo por unidad producida} = 132,67 \text{ und } \$$$

Después

$$\text{Costo por unidad producida} = \left(\frac{\text{costo total batch}}{\text{Tasa de producción}} \right) \text{ Ec. A4}$$

$$\text{Costo por unidad producida} = \left(\frac{177058 \frac{\$}{\text{bach}}}{1583 \frac{\text{und}}{\text{bach}}} \right)$$

$$\text{Costo por unidad producida} = 111,84 \text{ und } \$$$

➤ Tiempo de Parada

El Tiempo de Parada es un indicador crucial que nuestro equipo de mantenimiento monitorea cuidadosamente. Este registro detallado nos permite cuantificar el tiempo en que la línea de producción no está operativa debido a mantenimientos no planificados o averías inesperadas.

Antes de implementar las mejoras, los datos proporcionados por el equipo de mantenimiento indicaban un promedio de parada de 11 horas por semana. Este tiempo representaba una pérdida significativa en nuestra capacidad productiva; después de aplicar las mejoras en nuestro proceso y

en las prácticas de mantenimiento, se logró reducir el tiempo promedio de parada a 8 horas por semana.

Consumo de Energía

El Consumo de Energía es un parámetro clave en nuestra operación, que monitoreamos de cerca para la línea de producción V-TRO. Este indicador se obtiene directamente de nuestros registros de costos operativos, proporcionando una medida precisa del gasto energético asociado específicamente a esta línea de producción.

Antes de implementar las mejoras, nuestros registros mostraban un consumo energético de 28,248 kW/h para la línea V-TRO. Este valor sirvió como punto de referencia para evaluar la eficiencia energética de nuestro proceso; después de aplicar las mejoras, se observó una reducción significativa en el consumo energético. Los nuevos datos indican un consumo de 25.62 kW/h para la misma línea de producción. Esta disminución refleja las mejoras implementadas en términos de eficiencia energética.

Apéndice B. Índice de rendimiento.

El índice de rendimiento incluye un conjunto de métricas clave que evalúan diversos aspectos del proceso productivo, desde la eficiencia operativa hasta la calidad del producto final. En este anexo se detallan los cálculos siete indicadores fundamentales. Estos indicadores proporcionan una visión integral del impacto de las mejoras implementadas en la línea de producción.

✓ Tasa de Producción

Para calcular este indicador, se utilizaron los datos obtenidos de las órdenes de producción. Para los valores previos a la implementación de las mejoras, se analizaron tres meses de producción. Para los valores posteriores, se tomó como referencia el primer mes tras la implementación de las mejoras, lo que permitió una comparación directa del impacto de los cambios introducidos.

Antes

$$Tasa\ de\ producción = \left(\frac{Número\ Total\ De\ Producción}{Tiempo\ de\ Producción} \right) \text{ Ec. B1}$$

$$Tasa\ de\ producción = \left(\frac{16029\ und}{8\ h} \right)$$

$$Tasa\ de\ producción = 2004 \frac{und}{h}$$

Después

$$Tasa\ de\ producción = \left(\frac{Número\ Total\ De\ Producción}{Tiempo\ de\ Producción} \right) \text{ Ec. B2}$$

$$Tasa\ de\ producción = \left(\frac{20592\ und}{8\ h} \right)$$

$$Tasa\ de\ producción = 2574 \frac{und}{h}$$

✓ Tasa de Defectos

La tasa de defectos se calculó tomando en cuenta el número total de productos defectuosos en relación con el total producido. Estos datos fueron extraídos de las órdenes de producción y de las estadísticas proporcionadas por la ingeniera de producción, lo que

permitió una evaluación precisa del desperdicio antes y después de la implementación de las mejoras.

Antes

$$Tasa\ de\ defectos = \left(\frac{Numero\ total\ de\ desperdicio}{Numero\ Total\ De\ Producción} \right) \text{ Ec. B3}$$

$$Tasa\ de\ defectos = \left(\frac{11662\ kg}{89565\ kg} \right) * 100$$

$$Tasa\ de\ defectos = 13\ \%$$

Después

$$Tasa\ de\ defectos = \left(\frac{Numero\ total\ de\ galleta\ partida}{Numero\ Total\ De\ Producción} \right) \text{ Ec. B4}$$

$$Tasa\ de\ defectos = \left(\frac{3339\ kg}{36493\ kg} \right) * 100$$

$$Tasa\ de\ defectos = 9\ \%$$

✓ **Tiempo de producción**

Antes: Este tiempo se midió utilizando un cronómetro, comenzando desde el inicio del mezclado hasta el empaquetado del producto final. El tiempo promedio registrado fue de aproximadamente 40 minutos por lote (batch).

Después: Tras la implementación de las mejoras, se midió nuevamente el tiempo con un cronómetro, obteniendo un promedio de 38 minutos por lote, lo que refleja una mejora en la eficiencia del proceso.

✓ **Eficiencia Global del Equipo (OEE)**

La OEE se calculó considerando tres factores clave: la tasa de utilización del equipo (disponibilidad), el rendimiento y la calidad. La tasa de utilización del equipo, que mide el tiempo en que el equipo estuvo en funcionamiento respecto al tiempo disponible, se documenta en el **Anexo B Ec. A1**. Los otros dos factores, rendimiento y calidad, se calcularon a partir de los datos

obtenidos de las órdenes de producción, tanto antes como después de la implementación de las mejoras. Estos indicadores proporcionan una visión integral del impacto de las mejoras en la eficiencia operativa de la línea de producción.

Antes

$$OEE = \text{Tasa de utilización del equipo} \times \text{Rendimiento} \times \text{Calidad} \quad \text{Ec. B5}$$

$$OEE = 92 \% \times 90 \% \times 88 \%$$

$$OEE = 73 \%$$

Después

$$OEE = \text{Tasa de utilización del equipo} \times \text{Rendimiento} \times \text{Calidad} \quad \text{Ec. B6}$$

$$OEE = 96 \% \times 94 \% \times 91 \%$$

$$OEE = 82 \%$$

➤ **Calidad**

Antes

$$\text{Calidad (\%)} = \left(\frac{\text{Productos Buenos}}{\text{Total de Productos}} \right) \quad \text{Ec. B7}$$

$$\text{Calidad (\%)} = \left(\frac{93776 \text{ kg}}{82491.12 \text{ kg}} \right)$$

$$\text{Calidad} = 88 \%$$

Después

$$\text{Calidad (\%)} = \left(\frac{\text{Productos Buenos}}{\text{Total de Productos}} \right) \quad \text{Ec. B8}$$

$$\text{Calidad (\%)} = \left(\frac{25722 \text{ kg}}{23339.556 \text{ kg}} \right)$$

$$\text{Calidad} = (91 \%)$$

➤ **Rendimiento**

Antes

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{\text{Velocidad De Producción Real}}{\text{Velocidad De Producción Teórica}} \right) * 100 \quad \text{Ec. B9}$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{45 \frac{\text{Pl}}{\text{min}}}{50 \frac{\text{Pl}}{\text{min}}} \right) * 100$$

$$\text{Rendimiento} = 90 \%$$

Después

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{\text{Velocidad De Producción Real}}{\text{Velocidad De Producción Teórica}} \right) * 100 \quad \text{Ec. B10}$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left(\frac{47 \frac{\text{Pl}}{\text{min}}}{50 \frac{\text{Pl}}{\text{min}}} \right) * 100$$

$$\text{Rendimiento} = 94 \%$$

✓ Tasa de Retrabajo

Este indicador se calculó en función de las unidades retrabajadas en comparación con las metas de producción proyectadas. Se analizaron los datos antes y después de la implementación de las mejoras para evaluar su impacto en la necesidad de retrabajo en la línea de producción.

Antes

$$\text{Tasa de retrabajo} = \left(\frac{\text{Unidades Retrabajadas}}{\text{Total de Unidades Producidas}} \right) \quad \text{Ec. B11}$$

$$\text{Tasa de retrabajo} = \left(\frac{320 \text{ und/turno}}{16029 \text{ und/turno}} \right)$$

$$\text{Tasa de retrabajo} = 2\%$$

Después

$$\text{Tasa de retrabajo} = \left(\frac{\text{Unidades Retrabajadas}}{\text{Total de Unidades Producidas}} \right) \quad \text{Ec. B12}$$

$$\text{Tasa de retrabajo} = \left(\frac{936 \frac{\text{und}}{\text{turno}}}{20595 \frac{\text{und}}{\text{turno}}} \right)$$

$$\text{Tasa de retrabajo} = 5\%$$

Apéndice C. Código del modelo de la ley de potencia.

Este anexo presenta el análisis reológico realizado para caracterizar el comportamiento de la mezcla utilizada en la producción de conos enrollados. Utilizando datos experimentales de tasa de cizallamiento y viscosidad, se aplica el modelo de Ley de Potencia para determinar el índice de comportamiento del fluido (n) y el índice de consistencia (K). Este análisis es fundamental para comprender y mejorar las propiedades de flujo de la mezcla, lo cual impacta directamente en la calidad del producto final y la eficiencia del proceso de producción.

```

% Datos experimentales
gamma = [0.650, 0.644, 0.650, 0.609, 0.598, 0.588, 0.594, 0.548, 0.575, 0.571, ...
         0.667, 0.650, 0.632, 0.609, 0.600, 0.567, 0.571, 0.600, 0.571, 0.545];
% Tasa de cizallamiento
V = [1292, 1304, 1292, 1385, 1410, 1436, 1421, 1547, 1470, 1481, ...
     1258, 1292, 1332, 1385, 1406, 1492, 1480, 1406, 1480, 1554]; % Viscosidad
% Ajuste del modelo de Ley de Potencia
log_gamma = log(gamma); % Logaritmo de la tasa de cizallamiento
log_V = log(V); % Logaritmo de la viscosidad
% Ajuste lineal en espacio log-log
coeffs = polyfit(log_gamma, log_V, 1);
% Parámetros del modelo de Ley de Potencia
n = coeffs(1); % Índice de comportamiento del fluido
K = exp(coeffs(2)); % Índice de consistencia
% Mostrar los resultados
fprintf('El índice de comportamiento n es: %.4f\n', n);
fprintf('El índice de consistencia K es: %.4f\n', K);
% Graficar los resultados
figure;
plot(gamma, V, 'o', 'MarkerFaceColor', 'b'); % Datos originales
hold on;
gamma_fit = linspace(min(gamma), max(gamma), 100);
V_fit = K * gamma_fit.^n;
plot(gamma_fit, V_fit, '-r'); % Ajuste del modelo
xlabel('Tasa de cizallamiento (\gamma)');
ylabel('Viscosidad (V)');
title('Ajuste del Modelo de Ley de Potencia');
legend('Datos experimentales', 'Ajuste del modelo');
grid on;

```