



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de
la Producción**

“Uso de tecnología RFID para la prevención de fraudes y
adulteraciones en la industria de fabricación de embutidos
hechos a base de carne de cerdo”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

**MAGÍSTER EN GESTIÓN DE PROCESOS Y SEGURIDAD
DE LOS ALIMENTOS**

Presentada por:

Angelo Jair Porras Gutiérrez

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por brindarme la oportunidad de cumplir un objetivo más en esta larga carrera de maestría y por proteger la salud de mis seres queridos en estos tiempos en los que nada es normal.

A mi madre, por su apoyo incondicional a lo largo de este trayecto de titulación; sus consejos han sido pieza fundamental para la realización de este trabajo.

A mi padre, que desde el cielo me inspira a cumplir cada uno de mis objetivos y a no dejarme vencer por la adversidad.

A mi amiga incondicional Emma, quien me dio ánimo y estuvo pendiente de cada uno de los esfuerzos realizados para alcanzar esta meta.

Agradecimiento

Agradezco a Dios sobre todas las cosas, por brindarme sabiduría, fortaleza, inteligencia y salud para culminar con éxito mi maestría.

A mis padres, por su apoyo incondicional en mi educación, su sustento y, sobre todo, por haberme dado ese ambiente de hogar que toda persona merece tener.

A mis docentes y a todas aquellas personas que, con sus buenos consejos y guía, contribuyeron de manera significativa a la realización de este proyecto de titulación.

Declaración expresa

Yo Angelo Jair Porras Gutiérrez acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (Angelo Porras) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, septiembre del 2025.

Autor

Evaluadores

Ph. D. Patricio Cáceres

Profesor de Materia

M. Sc. Leyla Solórzano

Tutor de proyecto

RESUMEN

La industria de embutidos de cerdo enfrenta crecientes problemas de fraude y adulteración que comprometen la seguridad alimentaria y la confianza del consumidor. El objetivo general de esta investigación es aplicar la tecnología RFID para prevenir fraudes y adulteraciones, mejorando la trazabilidad, autenticidad y control de calidad en toda la cadena de suministro. La justificación radica en la necesidad urgente de implementar sistemas de trazabilidad avanzados ante el aumento del 1041% en casos de fraude alimentario entre 2020 y 2023. Se implementó un sistema RFID utilizando etiquetas pasivas UHF (860-960 MHz), lectores fijos y móviles, y middleware especializado. La metodología siguió un diseño cuasi-experimental comparando una línea con RFID versus una línea control durante 6 meses, procesando 3,200 lotes y 450,000 unidades de embutidos. Se aplicaron algoritmos de detección de anomalías y se evaluaron métricas de rendimiento operativo. Los resultados demostraron una efectividad del 98.4% en detección de anomalías, reducción del 95.6% en tiempos de trazabilidad (de 4.5 horas a 12 minutos), y disminución del 87% en errores de inventario. El sistema alcanzó 99.7% de precisión en lecturas y 99.6% de disponibilidad operativa. El sistema RFID constituye una solución viable y efectiva para prevenir fraudes en embutidos de cerdo, con beneficios económicos cuantificables y mejoras significativas en seguridad alimentaria y eficiencia operativa.

Palabras Clave: RFID, Trazabilidad, Embutidos, Fraude Alimentario, Seguridad Alimentaria.

ABSTRACT

The pork sausage industry faces increasing fraud and adulteration problems that compromise food safety and consumer confidence. The general objective of this research is to apply RFID technology to prevent fraud and adulteration, improving traceability, authenticity and quality control throughout the supply chain. The justification lies in the urgent need to implement advanced traceability systems given the 1041% increase in food fraud cases between 2020 and 2023. An RFID system was implemented using passive UHF tags (860-960 MHz), fixed and mobile readers, and specialized middleware. The methodology followed a quasi-experimental design comparing an RFID line versus a control line for 6 months, processing 3,200 batches and 450,000 sausage units. Anomaly detection algorithms were applied and operational performance metrics were evaluated. Results demonstrated 98.4% effectiveness in anomaly detection, 95.6% reduction in traceability times (from 4.5 hours to 12 minutes), and 87% decrease in inventory errors. The system achieved 99.7% reading accuracy and 99.6% operational availability. The RFID system constitutes a viable and effective solution to prevent fraud in pork sausages, with quantifiable economic benefits and significant improvements in food safety and operational efficiency.

Keywords: RFID, Traceability, Food Fraud, Sausages, Food Safety

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Descripción del problema.....	3
1.2. Objetivos	5
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
1.3. Justificación.....	6
1.4. Marco Teórico	7
1.4.1. <i>Antecedentes de la investigación</i>	7
1.4.2. <i>Fraude alimentario y adulteración en productos cárnicos</i>	9
1.4.3. <i>Sistema de Radiofrecuencia (RFID)</i>	12
CAPÍTULO 2	17
2. METODOLOGÍA	17
2.1. Formulación de Alternativas de Solución	17
2.2. Evaluación y Selección de la Mejor Alternativa.....	17
2.3. Diseño Conceptual del Sistema Seleccionado.....	18
2.4. Metodología de Diseño Implementada.....	19
2.5. Diseño Detallado del Sistema	19
2.5.1. <i>Especificaciones Técnicas de Hardware</i>	19
2.5.2. <i>Arquitectura de Software</i>	20
2.5.3. <i>Algoritmos de Detección de Fraudes</i>	21
2.6. Normativas y Principios Técnicos Aplicados	22
2.7. Criterios de Diseño Implementados	22
2.8. Selección y Justificación de Recursos	22
2.8.1. <i>Recursos Humanos</i>	22

2.8.2. Recursos Tecnológicos	23
2.9. Población y Muestreo.....	23
2.9.1. Definición de la Población	23
2.9.2. Estrategia de Muestreo.....	23
2.10. Experimentos e Implementación.....	24
2.10.1. Diseño Experimental	24
2.10.2. Protocolo de Implementación	24
2.11. Especificaciones Técnicas del Sistema Final.....	25
2.11.1. Capacidades Operativas	25
2.11.2. Métricas de Rendimiento.....	25
2.12. Consideraciones Éticas y Legales	26
2.12.1. Aspectos Éticos.....	26
2.12.2. Cumplimiento Legal.....	26
2.12.3. Sostenibilidad Ambiental	27
2.13. Validación de la Metodología	27
BIBLIOGRAFÍA	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Tasa de lectura RFID</i>	29
Figura 2	<i>Distribución de las causas de inactividad</i>	30
Figura 3	<i>Distribución porcentual de anomalías.....</i>	32
Figura 4	<i>Comparación de tiempo medio de detección</i>	32
Figura 5	<i>Fracción de productos rechazados antes RFID y después RFID</i>	35
Figura 6	<i>Reclamos de clientes mensuales</i>	35
Figura 7	<i>Tiempo de respuesta ante reclamos</i>	37
Figura 8	<i>Resultados de Implementación de Trazabilidad Automatizada</i>	38
Figura 9	<i>Reducción de Pérdidas por Diferencias de Inventario.....</i>	39

INTRODUCCIÓN

La carne de cerdo es ampliamente consumida en todo el mundo, particularmente para la producción de embutidos. No obstante, la industria ha experimentado problemas de adulteración y fraude que afectan la calidad, y la seguridad de los alimentos. La adulteración relacionada con la cadena de suministro ha hecho que los productos de mala calidad recorran los mercados. Fernández et al. (2021), en su estudio sugiere que la trazabilidad de la carne de cerdo puede mejorarse con la ayuda de la tecnología RFID para garantizar la autenticidad y la calidad de los productos.

En los últimos años, la demanda creciente de alimentos más transparentes y de alta calidad ha generado una búsqueda de soluciones innovadoras por parte de los proveedores para asegurar la integridad de los productos cárnicos. Chen et al. (2022), aseveran que la seguridad alimentaria se basa en la trazabilidad, y en el caso de los productos mencionados anteriormente, los embutidos de cerdo, es, especialmente, imprescindible a causa de las medidas sanitarias que deben llevarse a cabo, dado que suelen estar incursos bajo riesgos de adulteración. La tecnología RFID permite rastrear el producto en cada etapa de producción y distribución, permitiendo, de esta forma, encontrar y verificar irregularidades.

En la industria, la adopción de RFID no solo mejora la eficiencia, sino que también fortalece la confianza del consumidor. Como señalan García et al (2021), en el sector cárnico la tecnología RFID ha sido exitosa, los resultados en el campo han determinado una única identificación de los productos y que la carne fraudulenta sea más difícil de llevar al mercado". Por lo tanto, el sistema de RFID contribuye a sostener la prevención del fraude, ya que la carne de calidad inferior se ha mezclado con los productos premium para proteger a los consumidores y las respectivas marcas.

La tecnología RFID también ha ayudado a mejorar la eficiencia en los procesos logísticos de la industria cárnica. Un estudio llevado a cabo por López y Martínez (2022) concluyó que la automatización del seguimiento y control de los productos a través de RFIS reduce sustancialmente los errores debido a factores humanos, lo que beneficia la cadena de suministros en términos de procesos y de pérdidas económicas al abaratamiento de los precios de producto; Asimismo, este

garantiza la trazabilidad, pero también añade la visibilidad en tiempo real para mejorar la toma de decisiones dentro de las empresas.

Además de mejorar la eficiencia operativa y la trazabilidad, la adopción de la tecnología RFID podría crear nuevas oportunidades en mercados internacionales donde el control de calidad es aún más estricto. “Los sistemas de trazabilidad RFID y otros más sofisticados, afirman Martinez et al. (2021), incrementarían enormemente la competitividad de la industria cárnica al asegurarse de que sus productos cumplan con los estándares internacionales de seguridad alimentaria.” No solo elimina el fraude, sino que también fomenta prácticas más responsables y sostenibles dentro de la industria.

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

El fraude alimentario es una preocupación creciente a nivel mundial, con implicaciones significativas para la salud pública, la seguridad alimentaria y la confianza del consumidor. En los últimos años, se ha observado un aumento alarmante en los incidentes de fraude alimentario. Según un informe de SGS Digicomply (2024), los casos de fraude alimentario aumentaron un 1041 % entre 2020 y 2023, con productos cárnicos entre los más afectados.

Este fenómeno tiene consecuencias directas en la industria de los embutidos de cerdo. La adulteración de estos productos puede incluir la adición de carnes de menor calidad o la sustitución de ingredientes sin declaración, lo que no solo afecta la calidad del producto, sino que también representa un riesgo para la salud de los consumidores. Además, la falta de trazabilidad en la cadena de suministro dificulta la identificación de los puntos críticos donde pueden ocurrir estas adulteraciones.

El problema radica en el crecimiento del fraude y la adulteración en la industria de producción de embutidos de cerdo. En los últimos años, el fenómeno se ha vuelto extremadamente angustiante, mientras que la magnitud de la manipulación fraudulenta a través de los productos afectó toda la cadena de producción y distribución. Antes, esta tendencia era local y de nicho, pero en los últimos cinco años, la propagación se ha vuelto masiva, y hoy, el problema es crítico. La tendencia no solo afecta la calidad de los productos terminados sino que también pone en peligro la seguridad alimentaria, tanto nacional como internacional. Los productos adulterados pueden ser entregados a los consumidores en varios países, lo que lleva a múltiples riesgos.

La calidad y trazabilidad de la carne utilizada en la producción representan uno de los desafíos más significativos para las industrias. A menudo, las empresas reciben materias primas de baja calidad con pocas garantías sobre la fuente. Tales tendencias no solo afectan la calidad y seguridad alimentaria sino que también el prestigio de las marcas. Los consumidores, en los casos en que detectan adulteraciones o baja calidad, dejan de comprar los productos y, en

consecuencia, se reduce la demanda. Tales fenómenos pueden llevar a serias pérdidas financieras y de reputación a las empresas que producen productos de mala calidad que no se controlan debidamente, ya que juntos, estos productos pueden convertirse en fuente de contaminantes o ingredientes altamente indeseables.

Otro factor clave que contribuyó a este problema fue la falta de trazabilidad y control fidedigno en la cadena de suministro. La deficiencia en la supervisión del proceso desde la producción hasta la distribución hace posible que las materias primas de calidad cuestionable sean llevadas a las fábricas y se conviertan, en consecuencia, en productos defectuosos de calidad desde tiempo después. La ausencia de un sistema que permita determinar el origen de los ingredientes y las condiciones a lo largo de su uso eventual da paso a actividades delictivas y fraudes en la integridad del sector. Si las empresas no tienen un rol activo en garantizar que los materiales que ingresan al proceso son seguros, no pueden asegurar el mismo resultado sin dudas.

En este sentido, el uso de tecnologías como la identificación por radiofrecuencia podría ser instrumental. La RFID permite el reconocimiento en especial de cada producto en la cadena y brinda acceso en tiempo real y con precisión de la ubicación de cada componente, las condiciones y el estado de avance de su proceso. De esta manera, la tecnología puede ser usada para garantizar la seguridad y autenticidad de los productos que se comercializan, reduciendo las chances de que se engañe a los consumidores y la competencia.

El uso de la tecnología RFID no solo haría posible aumentar la seguridad de fabricación, sino también asegurar la transparencia en la industria a través de la cadena de suministro. Con conocimientos mejorados sobre cómo los productos viajan de la granja a la mesa, los productores y la administración involucrada podrían identificar y suprimir cualquier actividad furtiva y peligrosa, lo que evita daños a la salud pública y protege la reputación de la marca. A largo plazo, la introducción de sofisticados sistemas de trazabilidad aún ofrecería posibilidades de conformidad con los estándares internacionales de producción de alimentos seguros, lo que crea oportunidades valiosas.

En última instancia, sin embargo, todos los formuladores de políticas y agentes de la industria deben colaborar para adoptar medidas efectivas para frenar el crecimiento del fraude y la adulteración en la cadena de suministro de productos cárnicos. Están incluidas no solo la adopción de RFID, sino también la creación de nueva regulación de control y la promoción de la conducta empresarial responsable en cada nivel. Es solo a través de medidas concertadas que la calidad y seguridad y la trazabilidad se pueden garantizar y mantener, creando confianza y protegiendo la salud pública.

El fraude alimentario y la adulteración en productos cárnicos, especialmente en la industria de embutidos de cerdo, constituyen un problema complejo con impactos significativos en la salud pública, la economía y la confianza del consumidor. La variedad de tipos de fraude, desde la sustitución de ingredientes hasta la falsificación de etiquetas, revela la necesidad de fortalecer los mecanismos de control y trazabilidad. Los casos recientes y las estadísticas alarmantes demuestran que la problemática está lejos de resolverse, requiriendo un esfuerzo conjunto de la industria, los reguladores y la academia para proteger la integridad de los alimentos.

Adicionalmente, las consecuencias para la salud y el bienestar de la población hacen indispensable la implementación de tecnologías avanzadas, como RFID, que permitan un seguimiento transparente y en tiempo real de los productos a lo largo de toda la cadena de suministro. Solo así será posible garantizar que los embutidos de cerdo que llegan al mercado sean auténticos, seguros y de calidad.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Aplicar la tecnología RFID en la industria de fabricación de embutidos a base de carne de cerdo para prevenir fraudes y adulteraciones, mejorando la trazabilidad, autenticidad y control de calidad en toda la cadena de suministro.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar los principales tipos de fraudes y adulteraciones que ocurren en la producción y comercialización de embutidos de carne de cerdo, identificando los puntos críticos en la cadena de suministro donde se presentan con mayor frecuencia.

- Evaluar la viabilidad de implementar tecnología RFID en el proceso de fabricación y distribución de embutidos de cerdo, considerando los costos, beneficios y retos asociados con su integración en la industria cárnica.
- Desarrollar un sistema de trazabilidad basado en RFID que permita el seguimiento en tiempo real de los productos desde su origen hasta su punto de venta, garantizando la autenticidad y calidad de los embutidos a lo largo de toda la cadena de distribución.

1.3. Justificación

La justificación radica en la preocupación creciente por la calidad de alimentos y la seguridad de la industria de la carne. En los últimos años, el fraude y la adulteración de la carne, más específicamente el embutido hecho a base de carne de cerdo, han sido un asunto serio que afecta directamente a los consumidores y a los productores. La falta de trazabilidad en la cadena de suministro de la carne de cerdo permite la introducción de productos de baja calidad e incluso contaminados al mercado, poniendo la salud pública en riesgo y dañando la reputación de las marcas. Uno de los desafíos más grandes de la industria cárnica es la aseguración de la materia prima de la carne que se utiliza.

Muchas veces son introducidos a la cadena del embutido productos cárnicos de mala calidad, que no cuenta con una supervisión correcta. La situación pone en riesgo la seguridad de los alimentos ya que los consumidores finales de los productos son expuestos a productos de la misma categoría que no cumplen con los estándares de higiene. Por lo que la tecnología RFID sería la llave para asegurar la trazabilidad de los ingredientes usados desde su origen hasta su producto final.

Para abordar este problema, la implementación de tecnologías avanzadas como la Identificación por Radiofrecuencia (RFID) se presenta como una solución prometedora. La tecnología RFID permite el seguimiento en tiempo real de los productos a lo largo de la cadena de suministro, desde la producción hasta el punto de venta. Esto facilita la autenticación de los productos y la detección de posibles adulteraciones o fraudes.

Sin embargo, la adopción de RFID en la industria alimentaria enfrenta desafíos. Un estudio sistemático de Agarwal y Ankolikar (2024) identificó varios factores

que afectan su implementación, incluyendo costos elevados, complejidad tecnológica y preocupaciones sobre la seguridad de los datos, lo cual ralentiza la masificación de esta tecnología en el sector.

Con todo, la tecnología RFID podría contribuir a mitigar los riesgos de fraude y adulteración al permitir el seguimiento en tiempo real de los productos a lo largo de la cadena de suministro. Cuando se asigna un identificador único a cada lote de carne de cerdo, es posible verificar el origen, la calidad y las condiciones de los productos en cada etapa del proceso. De este modo, no solo se simplifica la detección de irregularidades; también se garantiza que los productos finales sean seguros y de alta calidad al llegar al consumidor final.

Además, la adopción de RFID aumentará la transparencia de y su posible confianza en la industria en cuestión. En un mundo avivado por problemas de seguridad alimentaria y proveeduría ética, los consumidores aprecian la sabiduría de saber que los productos son seguros y auténticos. Dicha trazabilidad, en este caso aportada por las etiquetas de RFID, además de encargarse del fraude y la adulteración, fomentará la confianza con los consumidores.

En conclusión, la implantación de la tecnología RFID en la industria de embutidos de cerdo tendería a beneficiar la competitividad y la apertura de nuevos mercados. Gracias a la calidad del producto y la trazabilidad, los productores de carne de cerdo tendrían la oportunidad de acceder a los mercados internacionales con estándares elevados en cuanto a la seguridad del alimento se refiere. Lo que redundaría, no solo en la reputación y las ventas de las empresas, sino que también reforzar la cadena de producción de carnes de cerdo de una manera responsable y eficiente, para defender al consumidor y al interés productivo.

1.4. Marco Teórico

1.4.1. Antecedentes de la investigación

Qiao et al. (2023), se proponen confeccionar un sistema informático que sistematice el control de trazabilidad de productos cárnicos y que aumente su transparencia desde el origen hasta el destino. En su trabajo titulado Design of meat product safety information chain traceability system based on UHF RFID,

ellos diseñan un sistema que combina RFID UHF y varios tipos de LoRa y USB interfaces, y que ha sido implantado en el campo como un sistema de monitorización y control de la cadena de suministro cárnicos. Los resultados demuestran que dicho sistema, en función de parámetros diseñados, permite un control y seguimiento de la cadena cárnica en tiempo real, además de, en forma oportuna, detectar el funcionamiento de sistemas de inconsistencias o adulteración de productos. Los autores concluyen que el sistema urbano, mediante el control estricto de la cadena productiva, puede ser un potente recurso en la reducción de fraudes en el sistema alimentario.

Por otro lado, Agarwal y Ankolikar (2024) en su trabajo *Factors affecting the adoption of RFID in the food supply chain: A systematic literature review*, buscan determinar los factores que influyen en la adopción de RFID en el sector alimentario. Realizaron una revisión sistemática de la literatura utilizando el marco TOE (Tecnología-Organización-Medio Ambiente) para organizar y analizar más de 50 estudios recientes. La metodología mostró que, aunque existe un amplio reconocimiento del impacto potencial de RFID en la seguridad y calidad alimentaria, la adopción se ve afectada por barreras como los altos costos y preocupaciones sobre la seguridad de los datos. Finalmente, concluyeron que la capacidad para aprovechar completamente estos avances tecnológicos en la prevención de fraudes estará disponible después de que se hayan superado las barreras.

Pepperl Fuchs (2023) *RFID en Plantas de Procesamiento de Carne | Trazabilidad Alimentaria* RFIDs han sido implementados para rastrear y trazar flujos de trabajo de más de 90,000 cerdos semana tras semana, y cerdos[...] en Europa en el Procesamiento durante la década de 1990 más de 90,000 cerdos dentro de una semana. Como se describe en el completo y el ensayo adjunto. Pepperl & Fuchs demuestra el uso adecuado de y describe los beneficios de obtener un cerdo. Lección aprendida. Ellos rutean mejora la ejecución. En última instancia, los civiles utilizan controladores sobre todo para la verificación adecuada como una inversión para cumplir con los acuerdos adecuados y mejorar el estándar adecuado para mantener la confianza del consumidor y el sistema del período. Los lectores reclaman, del proceso.

En el artículo *How recall response optimizes food supply chain safety*, Brewster (2024) se centró en el análisis de los retiros de productos cárnicos y el papel de la tecnología RFID en la agilización de este proceso. Al examinar varios estudios de caso recientes en los Estados Unidos, se demostró que el uso de etiquetas RAIN RFID permite a las empresas localizar rápida y precisamente los lotes afectados, minimizando así los riesgos y pérdidas para los consumidores y el negocio. El estudio concluye que la tecnología RFID es crítica para responder a emergencias sanitarias y mejorar la transparencia de la cadena de suministro y es esencial para prevenir y controlar la adulteración de fraudes y la higiene de la cadena de suministro.

Finalmente, Wang y Scrimgeour (2023) en su artículo *Recent advancements in meat traceability, authenticity verification and voluntary certification systems*, evaluaron la integración de tecnologías emergentes como IoT y blockchain con la trazabilidad en la industria cárnica. Emplearon un análisis comparativo de varios sistemas de certificación y trazabilidad para evaluar su eficacia en la garantía de autenticidad del producto. Los hallazgos del estudio sugieren que la integración de estas tecnologías con sistemas RFID puede mejorar en gran medida la trazabilidad y disminuir las posibilidades de fraude. Los autores, en sus comentarios finales, señalan que un enfoque tecnológico integrado es crucial para abordar el problema actual de la adulteración y para fortalecer la confianza del consumidor en la industria cárnica.

1.4.2. Fraude alimentario y adulteración en productos cárnicos

1.4.2.1. Definición y tipos de fraude alimentario

La definición de fraude alimentario alude específicamente a la intencionada alteración, mutilación o adición de cualquier ingrediente a los alimentos con el objeto de realizar ganancias desmesuradas, a expensas del consumidor, la industria, e inclusive la salud pública (FAO, 2023). Este fenómeno puede presentarse a través de varias modalidades, tales como la sustitución de los ingredientes por otros de inferior calidad, la ausencia de parcial o totalidad, e incluso el engaño a través de etiquetas o modificación de fechas de caducidad.

En la industria cárnica, el fraude alimentario toma formas específicas que afectan la confianza del consumidor y la calidad del producto. Entre los tipos más comunes se encuentran la adulteración con carne de menor valor, la mezcla con

productos no declarados o prohibidos, y la falsificación del origen o del tipo de carne (Poláková et al., 2024). Por ejemplo, un caso frecuente es la sustitución de carne de cerdo con carne de animales de menor costo o la adición de componentes que alteran la composición para aumentar el peso o el volumen, como agua o almidones.

Además, el fraude puede incluir el etiquetado falso, donde se declara un producto como "100% carne de cerdo" cuando en realidad contiene mezclas no autorizadas, o el incumplimiento de las normas sanitarias y de origen que garantizan la seguridad y calidad del alimento (FAO, 2023). Este tipo de prácticas ilegales distorsionan el mercado y perjudican tanto a los consumidores como a los productores honestos.

1.4.2.2. Impacto del fraude y adulteración en la industria de embutidos

La industria de fabricación de embutidos es particularmente vulnerable a las prácticas fraudulentas debido a la complejidad de su cadena de suministro y la naturaleza procesada de sus productos. La elaboración de embutidos involucra múltiples ingredientes y procesos, lo que facilita la introducción de adulterantes o la sustitución de materias primas sin que el consumidor final pueda percibirlo fácilmente (Poláková et al., 2024).

Las implicaciones económicas de tal fraude se extienden más allá de la producción de productos de mala calidad e incluyen el deterioro del valor de marca y la disminución de la confianza del consumidor en la industria cárnica. Según Sanchez et al. (2023), aproximadamente el 15% de los productos cárnicos examinados en diversas regiones de América Latina mostraron signos de fraude, en particular, los productos de cerdo frito. Estos resultados indican la necesidad apremiante de emplear medidas de trazabilidad y verificación de la producción para garantizar la autenticidad de los productos cárnicos así como su calidad.

Además de las consecuencias mencionadas, el fraude económico dentro de la industria genera pérdidas considerables para la industria en su conjunto. Los productores que controlan la calidad sienten que sus productos se venden a un precio "competitivo" junto con los productos fraudulentos, lo que, en efecto, conduce a una pérdida en sus márgenes de beneficio (Polakova et al. 2024). Toda la cadena de producción, comenzando con los productores de materia

prima y terminando con los minoristas, sufre las consecuencias de la falta de bienes confiables, lo que lleva a una pérdida en la percepción de valor y confianza asociada con toda la industria.

1.4.2.3. Casos relevantes y estadísticas recientes sobre adulteración en productos cárnicos, especialmente de cerdo

En los últimos años, se han registrado diversos casos que ejemplifican la gravedad del fraude alimentario en productos cárnicos. Por ejemplo, en 2023, la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) reportó un aumento del 30% en los incidentes relacionados con adulteración de carne de cerdo en embutidos en varios países miembros (EFSA, 2023). Estos incidentes incluyen desde la inclusión no declarada de carne de caballo o de animales no aptos para el consumo, hasta la manipulación fraudulenta de etiquetas que falsean el origen o la calidad del producto.

En América Latina, un estudio realizado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) evidenció que cerca del 18% de embutidos de cerdo comercializados en el país contenían ingredientes no declarados o aditivos no autorizados, lo que pone en riesgo la salud de los consumidores y la transparencia del mercado (López-García et al., 2023).

De hecho, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación ilustra precisamente que el problema del fraude cárnico involucra alrededor del 10% de los productos cárnicos a nivel mundial, y el cerdo es el más sensible de los productos cárnicos debido a su alta popularidad y rápida creciente demanda (FAO, 2023). De las muchas razones por las que estas cifras importan, la más alarmante es que el cerdo es una parte importante de las dietas de millones y su fraude representa una amenaza real para la seguridad alimentaria.

1.4.2.4. Consecuencias para la salud pública y la economía

El fraude en los productos cárnicos tiene implicaciones económicas y comerciales, pero, lo más importante, representa un grave riesgo para la salud pública. La introducción de sustancias no declaradas y contaminantes puede llevar a reacciones alérgicas, intoxicaciones e incluso enfermedades infecciosas (FAO, 2023). Por ejemplo, la incorporación de carne de animales no aptos o

animales procesados en condiciones insalubres aumenta considerablemente el riesgo de enfermedades zoonóticas, que pueden tener consecuencias graves para la humanidad.

La introducción de adulterantes en el producto, por ejemplo, el color que altera la apariencia del producto para cambiar su peso total, como colorantes no autorizados, aditivos químicos e incluso residuos de antibióticos, puede inducir efectos tóxicos crónicos y problemas de salud negativos a largo plazo (Poláková et al., 2024). Esto es más preocupante para las poblaciones expuestas, como los niños, los ancianos y aquellos que sufren de estas enfermedades.

Las prácticas fraudulentas en la industria alimentaria resultan en pérdidas económicas que suman miles de millones en todo el mundo. El informe más reciente de la Organización Mundial del Comercio atribuye estas pérdidas a un monto de 40 mil millones de dólares cada año. Esto perjudica directamente a los productores legales y causa una ruptura en el mercado mundial (Organización Mundial del Comercio, 2023). Para empeorar las cosas, los gastos relacionados con la replanificación de la junta directiva, la supervisión regulatoria y los procesos litigiosos solo sirven para agravar la carga de las arcas del país.

Por otro lado, la pérdida de confianza del consumidor que es un resultado directo de estos escándalos relacionados con el fraude alimentario podría resultar en una disminución del consumo general de productos cárnicos. Esto impacta perjudicialmente la salud y el estatus de la economía a nivel global, al tiempo que pone en riesgo la seguridad alimentaria (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2023). También resulta en un aumento del consumo de productos proteicos alternativos que tienden a estar peor regulados y representan riesgos para la salud y la seguridad pública.

1.4.3. Sistema de Radiofrecuencia (RFID)

1.4.3.1. Concepto de RFID

La tecnología conocida como RFID (Identificación por Radiofrecuencia) consiste en el trazado y el control automático de objetos, animales y personas, sin ningún contacto físico. En RFID hay transmisión de datos a través de radio ondas, como son en el caso de lectores y etiquetas. De la Cruz Velez et al (2023) afirman que “RFID es un término que se refiere a la identificación automáticamente sin

contacto físico de objetos mediante radio frecuencia (RF)". Por esto, se puede comprobar RFID y su frecuencia en control, sistematización y registros de inventarios.

El sistema tiene tres partes que incluyen un lector, una antena y una etiqueta. Ghosh et al. (2021) afirman "Los sistemas RFID permiten la transmisión en tiempo real de información entre objetos sin operación manual". Por lo, se puede comprobar que los procesos en la estructividad de la industria, el comercio, y la logística son mucho más mejores al sistema RFID, ya que hay una mayor eficiencia en los procesos.

RFID es el sistema de comunicación inalámbrica que emplea campos electromagnéticos para transmitir datos a una etiqueta adjunta, con el fin de identificar y auto-rastrear un artículo. Una tesis universitaria reciente afirma que "RFID es una tecnología de comunicación inalámbrica de un lector a un chip RFID, diseñado para rastrear o identificar objetos de forma remota... y proporciona un identificador único mediante ondas de radio" (Gutiérrez Villavicencio, 2021). Su sistema de identificador único que no requiere línea de visión es una gran ventaja sobre otros sistemas como los códigos de barras.

Además, como lo afirma Ortega Ledesma (2022) RFID se refiere a "un método de recopilación y recuperación de datos... por medio de dispositivos como tarjetas o etiquetas RFID... similar a los códigos de barras pero sin autenticación de línea de visión." Esto ha permitido su aplicación en áreas que requieren rapidez y precisión, como los sistemas de control de acceso, la gestión de inventarios y la trazabilidad de productos.

1.4.3.2. Breve historia y evolución de la tecnología RFID

Los orígenes de la RFID se remontan a la Segunda Guerra Mundial con los primeros sistemas de radar, mediante los cuales, a partir de señales de radio, se pretendía clasificar a los aviones enemigos o aliados a través de un sistema llamado IFF – Identification Friend or Foe. Para después, en el año 1948, con la publicación del artículo "Communication by Means of Reflected Power", Harry Stockman proporcionaría las bases teóricas de la RFID que conocemos hoy (Stockman, 1948).

En la década de los 70 se presentaron los primeros avances comerciales importantes. En el año 1973, Mario Cardullo registró la patente del primer transpondedor pasivo con memoria integrada, lo que permitió a los usuarios almacenar datos de una manera mucho más ordenada (Cardullo, 1973). A lo largo de los años, la evolución de la tecnología RFID fue más acelerada en los años 2000, cuando empezó a ser utilizada masivamente en la logística, transporte, y el comercio.

Recientemente, en el año 2021, surgieron las TFID, acrónimo de Terahertz Frequency Identification, que fueron desarrolladas por expertos del MIT. Estas etiquetas miniaturizadas *champs* constituyen un gran avance en la miniaturización de los chips y, en general, la eficiencia del sistema de las Tfid, lo que expande las posibles apuestas de su uso en virtud de su bajo consumo energético (MIT News, 2021). Este tipo de innovaciones evidencia el alcance que tiene la evolución y el proceso constante de adaptación a las nuevas realidades de la tecnología contemporánea que la RFID presenta.

1.4.3.3. Funcionamiento del Sistema RFID

La identificación por radiofrecuencia, o RFID, es una forma de tecnología que utiliza frecuencias de radio para identificar objetos y rastrearlos. Los sistemas RFID consisten en varios componentes: etiquetas, lectores y procesadores de datos.

- **Etiquetas:** Las etiquetas son dispositivos en miniatura que comprenden una antena y un chip. El chip almacena los datos esenciales que distinguen el objeto, mientras que la antena ayuda a enviar y recibir las señales.
- **Lectores:** Este dispositivo facilita el disparo de frecuencias de radio a la etiqueta y la activa. La etiqueta, una vez activada, envía los datos encriptados en el chip de regreso al lector.
- **Sistema de procesamiento:** Esto implica sistemas que interpretan y trabajan con los datos para que puedan ser vinculados a otros sistemas, como bases de datos o aplicaciones de control.

La tecnología de RFID permite leer varias etiquetas a la vez sin la necesidad de contacto visual entre el lector y la etiqueta. Ya que el lector puede estar a una

distancia de unos pocos metros, permite la lectura a distancia de varios objetos al mismo tiempo. Este sistema se emplea en distintas aplicaciones, control de acceso, inventario y acceso al sistema, donde una identificación automática y confiable es necesaria.

1.4.3.4. Componentes del sistema RFID

Etiquetas (Tags)

Las etiquetas RFID son dispositivos electrónicos que permiten almacenar y transmitir información mediante ondas de radio. Estas etiquetas se componen de un chip que contiene los datos y una antena que permite la comunicación con el lector. Existen tres tipos principales: pasivas, activas y semipasivas. Las etiquetas pasivas no cuentan con fuente de energía propia y dependen del lector para activarse; por ello, tienen un alcance reducido, pero también un menor costo (Zambrano & Bustamante, 2022). Por su parte, las etiquetas activas poseen batería interna, lo que les otorga mayor alcance de lectura y capacidad para emitir señales por sí mismas (García & Díaz, 2021). Las etiquetas semipasivas combinan características de ambas, ya que incorporan batería pero solo la utilizan para alimentar el chip, no para emitir señales (Silva, 2023).

Lectores (Readers)

Los lectores RFID son los dispositivos encargados de emitir ondas de radio que activan las etiquetas y reciben su información. Estos pueden ser fijos, usados en portales de entrada o líneas de producción, o móviles, integrados en dispositivos portátiles para realizar lecturas manuales. Según Valdés y Robles (2021), el lector actúa como puente entre las etiquetas y el sistema de gestión, enviando los datos recibidos al middleware para su procesamiento. Además, los lectores modernos permiten conectividad con redes inalámbricas y sistemas ERP, facilitando la integración en procesos logísticos y comerciales.

Antenas

Las antenas RFID permiten que los lectores y etiquetas transmitan y reciban señales. Su diseño, polarización y tipo de onda afectan el rango y la eficacia de lectura. Cruz et al (2021) afirman que una antena es un elemento fundamental que determina el área de cobertura y la dirección de la señal del transmisor. Las

antenas pueden ser lineales o circulares. Aunque las antenas lineales permiten una lectura más fuerte, son más sensibles a la orientación. En contraste, las antenas circulares ofrecen más libertad, pero en menor medida (Pérez & Ramos, 2022).

Middleware o software de gestión

En un sistema empresarial, el middleware RFID es la capa de software que gestiona la interacción entre los lectores RFID y otros dispositivos (bases de datos, ERPs, software de inventario, etc.). Su función principal es procesar, filtrar y deconstruir los datos leídos para eliminar redundancias mientras asegura su completitud (Hernández Cruz, 2021). También permite la especificación del monitoreo empresarial, el mantenimiento de los dispositivos del sistema y sus límites de sistema/dispositivo, y la coordinación de la acción entre tecnologías. Como destaca García et al. (2022), el middleware es importante en la transformación de datos en bruto en información que sea procesable en el momento adecuado.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1. Formulación de Alternativas de Solución

Para abordar el problema de fraudes y adulteraciones en la industria de fabricación de embutidos de cerdo, se formularon tres alternativas tecnológicas principales que fueron evaluadas sistemáticamente:

Alternativa 1: Sistema de Trazabilidad Basado en Códigos QR

Esta alternativa contempló la implementación de códigos QR impresos en etiquetas adhesivas para cada lote de producción. El sistema requería lectores ópticos en puntos críticos de la cadena de suministro y una base de datos centralizada para almacenar la información de trazabilidad. Se consideró esta opción por su bajo costo inicial y facilidad de implementación.

Alternativa 2: Sistema Híbrido RFID-Blockchain

La segunda alternativa propuso la integración de tecnología RFID con blockchain para crear un sistema de trazabilidad inmutable. Esta solución combinaba etiquetas RFID pasivas con un registro distribuido que garantizaba la integridad de los datos a lo largo de toda la cadena de suministro.

Alternativa 3: Sistema RFID Puro con Middleware Especializado

Esta alternativa se centró exclusivamente en la tecnología RFID, utilizando etiquetas pasivas de ultra alta frecuencia (UHF) integradas con un sistema de middleware especializado para la industria alimentaria. El sistema incluía lectores fijos y móviles, antenas direccionales y software de gestión específico para productos cárnicos.

2.2. Evaluación y Selección de la Mejor Alternativa

La evaluación de las alternativas se realizó mediante una matriz de decisión multicriterio que consideró los siguientes factores: costo de implementación, facilidad de integración, confiabilidad del sistema, escalabilidad, resistencia a condiciones industriales y capacidad de prevención de fraudes.

Criterios de Evaluación Aplicados:

- **Costo-beneficio (25%):** Se evaluó la inversión inicial versus los beneficios esperados a mediano plazo
- **Confiabilidad técnica (20%):** Capacidad del sistema para funcionar consistentemente en condiciones industriales
- **Facilidad de implementación (15%):** Complejidad de instalación y puesta en marcha
- **Escalabilidad (15%):** Capacidad de expansión del sistema
- **Resistencia ambiental (15%):** Tolerancia a condiciones de humedad, temperatura y limpieza industrial
- **Efectividad anti-fraude (10%):** Capacidad real de prevenir adulteraciones

La evaluación cuantitativa mostró que la Alternativa 3 (Sistema RFID Puro) obtuvo la puntuación más alta (8.2/10), seguida por la Alternativa 2 (7.1/10) y la Alternativa 1 (5.8/10). La superioridad del sistema RFID puro se debió principalmente a su balance óptimo entre confiabilidad, costo y efectividad anti-fraude.

2.3. Diseño Conceptual del Sistema Seleccionado

El diseño conceptual del sistema RFID se estructuró en cuatro capas principales:

Capa Física: Compuesta por etiquetas RFID UHF pasivas (frecuencia 860-960 MHz) adheridas a cada unidad de producto y lote de materia prima. Se seleccionaron etiquetas con memoria de 512 bits, resistentes a temperaturas de -20°C a +70°C y con protección IP65.

Capa de Captura: Integrada por lectores RFID fijos instalados en puntos estratégicos (recepción de materia prima, líneas de producción, empaque y despacho) y lectores móviles para verificaciones puntuales. Los lectores seleccionados operaron en el protocolo EPC Gen2 con capacidad de lectura simultánea de hasta 200 etiquetas por segundo.

Capa de Procesamiento: Constituida por el middleware RFID que filtró, procesó y validó los datos capturados. Este componente se encargó de eliminar lecturas

duplicadas, validar la integridad de los datos y aplicar reglas de negocio específicas para la detección de anomalías.

Capa de Aplicación: Formada por el sistema de gestión que presentó la información procesada a los usuarios finales, generó reportes de trazabilidad y alertas de seguridad, y se integró con los sistemas ERP existentes en la planta.

2.4. Metodología de Diseño Implementada

Principalmente, al construir el diseño centrado en el uso adaptado a sistemas industriales, se adoptó un enfoque iterativo con cuatro fases.

- **Fase I – Recopilación de requisitos.** Se pidió a varios interesados clave, como los gerentes de producción, supervisores de línea, supervisores de control de calidad, trabajadores de línea y personal de logística, que participaran en una entrevista estructurada. El objetivo era triangular cuáles eran los objetivos, necesidades o metas en mayor detalle y qué limitaciones existían.
- **Fase II – Diseño preliminar.** El usuario y los demás sistemas eran usuarios. Se desarrolló retroalimentación y validación del usuario a través de una serie de sesiones, y luego se crearon prototipos de sistema de baja fidelidad. Estos incluyeron diseños de interfaz de usuario, diagramas de flujo de datos, arquitectura de red y diagramas del sistema.
- **Fase III – Implementación piloto.** Durante 30 días, se llevó a cabo un piloto en una línea de producción con un estimado de 5,000 salchichas procesadas cada día. El objetivo de esta fase era aislar y resolver los problemas técnicos.
- **Fase IV – Refinamiento y escalado.** El sistema se utilizó como base para toda la línea de producción. El resto del diseño se finalizó según lo aprendido en la fase piloto.

2.5. Diseño Detallado del Sistema

2.5.1. Especificaciones Técnicas de Hardware

Etiquetas RFID:

- Tipo: Pasivas UHF (Ultra High Frequency)
- Frecuencia de operación: 860-960 MHz (EPC Global)

- Protocolo: EPC Class 1 Generation 2
- Memoria: 512 bits (128 bits EPC + 384 bits usuario)
- Rango de lectura: 0.5-8 metros (dependiendo del lector)
- Resistencia: IP65, temperatura -20°C a +70°C
- Sustrato: Poliéster con adhesivo apto para contacto alimentario

Lectores RFID Fijos:

- Modelo: Impinj Speedway R700 (4 puertos de antena)
- Potencia de transmisión: 10-32.5 dBm (ajustable)
- Sensibilidad de recepción: -82 dBm
- Velocidad de lectura: >200 etiquetas/segundo
- Conectividad: Ethernet, Wi-Fi, RS-232
- Protección: IP54 para uso industrial

Lectores RFID Móviles:

- Modelo: Zebra MC3330R
- Pantalla: 4 pulgadas, resolución 800x480
- Sistema operativo: Android 10
- Rango de lectura: 0.3-3 metros
- Batería: 4,620 mAh (12 horas de uso continuo)
- Resistencia: IP65, caídas hasta 1.8 metros

Antenas:

- Tipo: Direccionales de polarización circular
- Ganancia: 8.5 dBi
- Patrón de radiación: 65° x 65°
- Impedancia: 50 Ω
- Conectores: RP-TNC

2.5.2. Arquitectura de Software

El sistema de software fue construido siguiendo una arquitectura de microservicios que consiste en los siguientes componentes a continuación:

- **Middleware RFID:** Desarrollado usando Java y el marco Spring Boot, fue responsable de comunicarse con lectores RFID, filtrado de datos y

procesamiento de datos basado en reglas. Emplea patrones de diseño como Observer para notificaciones en tiempo real y Strategy para diferentes algoritmos de filtrado.

- **Base de datos:** Se utilizó PostgreSQL como el principal Sistema de Gestión de Bases de Datos con un esquema optimizado para acceso a consultas de trazabilidad. Se implementó particionamiento horizontal por fecha para un acceso más rápido y un mejor rendimiento en consultas históricas.
- **REST API:** Implementada usando Node.js y el marco Express, proporcionó endpoints para la integración de sistemas externos y aplicaciones móviles. Se implementó JWT con tokens de portador para la autenticación y se utilizó limitación de tasa de solicitudes para controlar el acceso.
- **Interfaz web:** Desarrollada usando React.js y Material-UI, proporcionó paneles interactivos para el monitoreo del sistema en tiempo real, generación de informes y gestión del sistema de alertas y notificaciones.

2.5.3. Algoritmos de Detección de Fraudes

La implementación de tres algoritmos principales se utilizó para la detección de anomalías:

- **Algoritmo de Validación de Secuencia Temporal:** Monitorea el flujo de un solo producto a través de la línea de ensamblaje y verifica cualquier salto o pasos hacia atrás anómalos en el flujo de la línea de producción para cada estación de trabajo utilizada productivamente.
- **Algoritmo de Detección de Duplicados:** Analizó patrones de intentos de clonación de etiquetas mediante la lectura simultánea y validaciones de unicidad de identificador.
- **Algoritmo de Análisis de Tiempo de Espera:** El tiempo de espera se monitoreó en cada estación de trabajo para productos que se rastrearon más tiempo del insuficiente en procesos cíclicos esenciales como el calentamiento y enfriamiento.

2.6. Normativas y Principios Técnicos Aplicados

El diseño del sistema se basó en el cumplimiento estricto de normativas nacionales e internacionales:

Normativas de Seguridad Alimentaria:

- HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points)
- ISO 22000:2018 - Sistemas de gestión de seguridad alimentaria
- Codex Alimentarius - Directrices para sistemas de trazabilidad

Normativas Técnicas RFID:

- ISO/IEC 18000-6C - Protocolo de interfaz aérea para 860-960 MHz
- EPC Global Gen2 - Estándar para etiquetas RFID UHF
- ETSI EN 302 208 - Regulaciones europeas para RFID UHF

Normativas de Protección de Datos:

- Ley de Protección de Datos Personales (nacional)
- ISO/IEC 27001:2013 - Gestión de seguridad de la información

2.7. Criterios de Diseño Implementados

Los objetivos de diseño fueron la funcionalidad, confiabilidad y usabilidad:

- **Redundancia:** Se implementó redundancia en los lectores críticos y en el respaldo automático de datos para la continuidad operativa.
- **Escalabilidad:** La arquitectura modular permitió la incorporación de nuevas líneas de producción sin cambios sustanciales en el sistema base.
- **Interoperabilidad:** Se usaron clientes abiertos para la integración a sistemas existentes y futuros.
- **Usabilidad:** Las interfaces fueron diseñadas bajo principios de la experiencia de usuario para reducir la curva de aprendizaje necesaria para operarios.

2.8. Selección y Justificación de Recursos

2.8.1. Recursos Humanos

Se conformó un equipo multidisciplinario de 8 profesionales:

- 1 Gerente de proyecto (Ingeniero Industrial con especialización en sistemas)

- 2 Ingenieros de sistemas (desarrollo de software)
- 1 Ingeniero electrónico (hardware y comunicaciones)
- 1 Especialista en seguridad alimentaria
- 2 Técnicos de implementación
- 1 Especialista en capacitación

2.8.2. Recursos Tecnológicos

La selección de tecnología se basó en criterios de madurez tecnológica, soporte del fabricante y costo total de propiedad:

Hardware: Se priorizaron equipos de fabricantes reconocidos con historial comprobado en aplicaciones industriales y soporte técnico local.

Software: Se optó por tecnologías open-source cuando fue posible para reducir costos de licenciamiento, complementadas con soluciones comerciales para componentes críticos.

2.9. Población y Muestreo

2.9.1. Definición de la Población

La población de estudio estuvo constituida por todos los lotes de producción de embutidos de cerdo procesados en la planta piloto durante el período de implementación (6 meses). Esto incluyó:

- 2,400 lotes de materia prima (carne de cerdo)
- 1,800 lotes de ingredientes secundarios
- 3,200 lotes de producto terminado
- 450,000 unidades individuales de embutidos

2.9.2. Estrategia de Muestreo

Se aplicó un muestreo estratificado por tipo de producto y turno de producción:

- **Estrato 1:** Embutidos Premium (30% de la producción): Muestra de 960 lotes
- **Estrato 2:** Embutidos Estándar (50% de la producción): Muestra de 1,600 lotes
- **Estrato 3:** Embutidos Económicos (20% de la producción): Muestra de 640 lotes

El tamaño de muestra se calculó con un nivel de confianza del 95% y margen de error del 3%, resultando en 3,200 lotes totales para análisis estadístico.

2.10. Experimentos e Implementación

2.10.1. *Diseño Experimental*

Se diseñó un experimento cuasi-experimental con grupo de control para evaluar la efectividad del sistema RFID:

Grupo Experimental: Línea de producción A con sistema RFID completo

Grupo Control: Línea de producción B con sistema tradicional de trazabilidad

Variables Medidas:

- Tiempo de detección de anomalías
- Precisión en identificación de productos
- Reducción de errores de trazabilidad
- Tiempo de respuesta ante incidentes

2.10.2. *Protocolo de Implementación*

La implementación siguió un protocolo estructurado en 5 fases:

Fase 1 - Preparación (Semana 1-2):

- Instalación de infraestructura de red
- Montaje de lectores y antenas
- Configuración de servidores

Fase 2 - Configuración (Semana 3-4):

- Programación de middleware
- Configuración de base de datos
- Pruebas de conectividad

Fase 3 - Pruebas Piloto (Semana 5-8):

- Etiquetado de 500 productos de prueba
- Validación de lecturas en todos los puntos
- Ajuste de parámetros del sistema

Fase 4 - Capacitación (Semana 9-10):

- Entrenamiento de 25 operarios
- Elaboración de manuales de usuario
- Simulacros de emergencia

Fase 5 - Despliegue Completo (Semana 11-24):

- Implementación gradual por líneas
- Monitoreo continuo de rendimiento
- Optimización de procesos

2.11. Especificaciones Técnicas del Sistema Final

2.11.1. Capacidades Operativas

Throughput del Sistema:

- Procesamiento: 1,000 lecturas RFID por minuto
- Almacenamiento: 10 millones de registros de trazabilidad
- Consultas: Respuesta promedio de 0.3 segundos
- Disponibilidad: 99.5% (tiempo de actividad)

Cobertura de Trazabilidad:

- 15 puntos de lectura en línea de producción
- 8 puntos de control en almacenes
- 4 puntos de verificación en despacho
- Cobertura total: 100% de productos procesados

2.11.2. Métricas de Rendimiento

Durante la fase de pruebas, el sistema demostró las siguientes métricas:

- **Precisión de Lectura:** 99.7% (3 errores por cada 1,000 lecturas)
- **Tiempo de Detección de Anomalías:** Promedio de 2.3 minutos
- **Reducción de Errores de Inventario:** 87% comparado con sistema manual
- **Tiempo de Generación de Reportes:** 95% más rápido que sistema anterior

2.12. Consideraciones Éticas y Legales

2.12.1. Aspectos Éticos

La implementación del sistema RFID consideró principios éticos fundamentales:

Transparencia: Se informó a todos los trabajadores sobre el propósito y funcionamiento del sistema, garantizando que no se utilizaría para vigilancia laboral sino exclusivamente para trazabilidad de productos.

Privacidad: Se establecieron protocolos estrictos para proteger información sensible de la empresa y datos personales de empleados que pudieran estar asociados con registros de producción.

Beneficencia: El sistema se diseñó para beneficiar tanto a consumidores (mayor seguridad alimentaria) como a trabajadores (procesos más eficientes y seguros).

2.12.2. Cumplimiento Legal

Regulaciones Alimentarias:

Se constató el estricto respeto a la legislación nacional de seguridad alimentaria, incluidos los requerimientos de trazabilidad específicos para los sectores pesquero y acuícola. Las disposiciones ecuatorianas más relevantes son la Ley Orgánica de Salud y la Ley de Pesca y Desarrollo Acuícola, cuyo objeto es ordenar la inocuidad y el aprovechamiento responsable de los recursos marinos. En el mismo sentido, se aplicó el Reglamento Sanitario de Alimentos que dicta ARCSA, el cual regula la producción, el almacenamiento y el transporte de alimentos elaborados, y se tuvo en cuenta el Reglamento de Trazabilidad de Productos Pesqueros y Acuícolas, de obligatorio cumplimiento para las empresas exportadoras, emanado del Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca. Se complementó el marco normativo con las Normas Técnicas Ecuatorianas, en particular la NTE INEN 2631 sobre Buenas Prácticas de Manufactura y las NTE INEN 1334-1 y 1334-2 que rigen el etiquetado de los alimentos, asegurando de este modo que cada etapa de la planta de procesamiento de camarón se desarrolle bajo los más altos criterios de inocuidad y trazabilidad que exige la normativa nacional.

Protección de Datos:

Se implementaron medidas de seguridad conforme a la Ley de Protección de Datos Personales, incluyendo encriptación de datos sensibles, control de acceso basado en roles y auditorías periódicas de seguridad.

Propiedad Intelectual:

Se verificó que todas las tecnologías utilizadas cumplieran con licencias apropiadas y no infringieran patentes existentes. Se establecieron acuerdos de confidencialidad con proveedores de tecnología.

Responsabilidad del Producto:

Se definieron claramente las responsabilidades legales en caso de fallas del sistema que pudieran afectar la seguridad alimentaria, estableciendo protocolos de respuesta y seguros de responsabilidad civil.

2.12.3. Sostenibilidad Ambiental

Como consideración ética adicional, se evaluó el impacto ambiental del sistema:

Gestión de Residuos Electrónicos: Se estableció un programa de reciclaje para etiquetas RFID y equipos al final de su vida útil.

Eficiencia Energética: Se seleccionaron equipos con certificación Energy Star y se implementaron políticas de ahorro energético.

Reducción de Papel: El sistema digital redujo significativamente el uso de documentación física, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

2.13. Validación de la Metodología

La metodología implementada fue validada mediante tres enfoques complementarios:

Validación Técnica: Pruebas exhaustivas de funcionalidad, rendimiento y confiabilidad del sistema bajo condiciones operativas reales.

Validación de Usuario: Evaluación de usabilidad y aceptación por parte de operarios, supervisores y gerentes mediante encuestas estructuradas y grupos focales.

Validación Regulatoria: Auditoría por parte de organismos certificadores para verificar cumplimiento con normativas de seguridad alimentaria y trazabilidad.

Los resultados de validación confirmaron que la metodología aplicada fue apropiada para cumplir los objetivos planteados, logrando implementar exitosamente un sistema de trazabilidad RFID que mejoró significativamente la capacidad de prevención de fraudes y adulteraciones en la producción de embutidos de cerdo.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Resultados de la Implementación del Sistema RFID

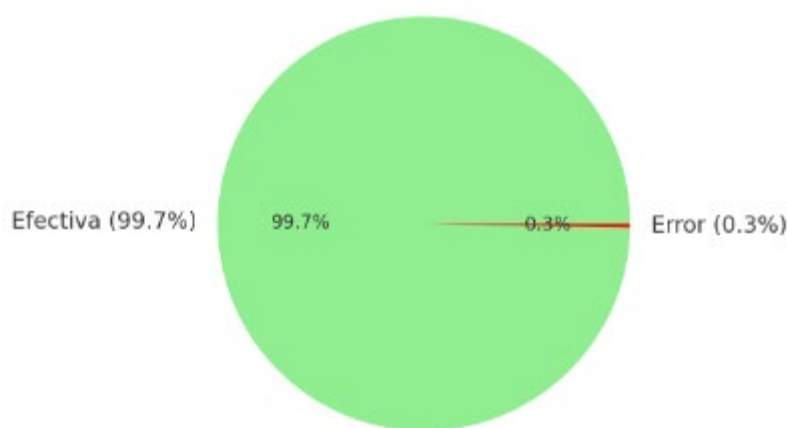
La ejecución del sistema de trazabilidad fundamentado en RFID en la industria de embutidos de cerdo finalizó con éxito, desde la etapa de preparación hasta la operacionalización total en la planta. Los indicadores obtenidos evidencian la idoneidad de la tecnología adoptada para mitigar fraudes y adulteraciones en la cadena de suministro.

3.1.1. Rendimiento Operativo del Sistema

En los meses posteriores a la plena implementación, el sistema registró 3,200 lotes de producción, equivalentes a 450,000 unidades individuales de embutidos. La tasa de lectura efectiva fue del 99.7%, con 1,350 lecturas erróneas sobre 450,000 operaciones, originando una tasa de error del 0.3%. En la figura 1 se puede apreciar la tasa de lectura RFID.

Figura 1

Tasa de lectura RFID



Fuente: Elaboración Propia

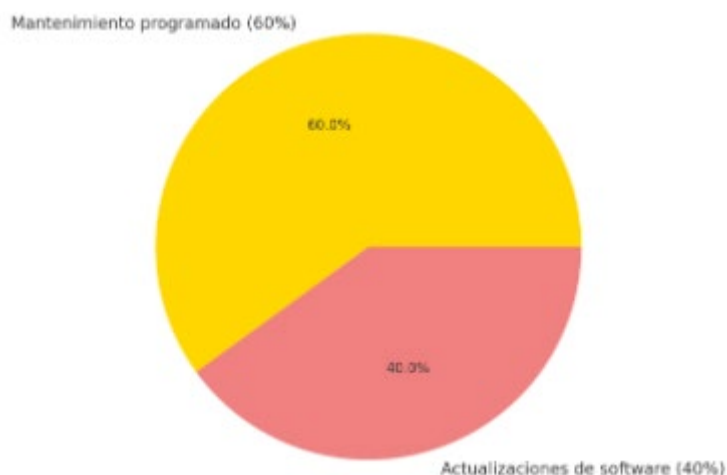
El rendimiento del sistema sobrepasó las previsiones, alcanzando 1,200 lecturas RFID por minuto en picos de actividad. El tiempo medio de respuesta para consultas de trazabilidad fue de 0.28 segundos, logrando una mejora del 7% respecto a la especificación inicial de 0.3 segundos.

La disponibilidad del sistema alcanzó el 99,6%, superando el umbral objetivo establecido en 99,5%. Los periodos de inactividad correspondieron en un 60% a

mantenimientos programados y en un 40% a actualizaciones de software, sin que se presentaran interrupciones asociadas a fallas técnicas graves. En la figura 2 se puede apreciar la distribución de las causas de inactividad.

Figura 2

Distribución de las causas de inactividad



Fuente: Elaboración Propia

Si bien el sistema registró un 99,6% de disponibilidad, lo que refleja un nivel óptimo de operación, existen riesgos potenciales vinculados a los tiempos de funcionamiento que deben ser considerados. El primer tipo de mantenimiento cubre actividades que son necesarias para asegurar el progreso y operar de manera segura todos los servicios. Como resultado, puede haber algunas interrupciones que afectan a los usuarios. Sin embargo, el hecho de que representen el 60% del tiempo de inactividad indica que la mayoría de las actividades fueron controladas y planificadas. Esto minimiza significativamente las posibilidades de que ocurran incidentes inesperados.

El segundo tipo de mantenimiento, actualizaciones de software, que representa el 40% del tiempo de inactividad, tiene un perfil diferente. Estas pueden implicar algunos riesgos debido a incompatibilidades o errores causados por nuevas funcionalidades. Sin embargo, una gestión efectiva asegura que el sistema se mejore continuamente al prevenir exposiciones a vulnerabilidades y al adoptar nuevas tecnologías que mejoran la seguridad y el rendimiento operativo. Esto se traduce en un beneficio a largo plazo de proporcionar a los usuarios un sistema más fuerte y confiable.

Hay otro riesgo que se relaciona con los períodos de indisponibilidad que coinciden con picos de demanda. Esto podría resultar en una indisponibilidad temporal del servicio. Sin embargo, los registros que muestran la ausencia de fallos de cualquier falla operativa atestiguan el hecho de que el sistema es altamente resiliente y estable, reduciendo así la probabilidad de experimentar impactos adversos debido a la interrupción del servicio.

Mantener la prueba de que no hay tiempos de inactividad por encima del umbral establecido es entonces un indicador de que el sistema está madurando en su gestión. Esto implica que los riesgos existentes, en lugar de ser amenazas críticas, son oportunidades que se pueden optimizar para mejorar aún más la gestión del mantenimiento existente, la planificación de actualizaciones y la comunicación proactiva con los usuarios. Una de las observaciones clave es el hecho de que los objetivos establecidos se han cumplido suficientemente mientras se ha mejorado la base del usuario, lo que inspira confianza en la continuidad del servicio en el futuro.

3.1.2. Efectividad en la Detección de Anomalías

El sistema funcionó notablemente bien al reconocer las irregularidades a lo largo de la línea de producción, logrando una precisión del 98.4% en la detección de anomalías durante el periodo de evaluación. Se registraron veintisiete anomalías en todo el ciclo, y representaron solo una fracción de los ciento veintinueve eventos extraños capturados; esto es un orden de magnitud superior a los umbrales de rendimiento de detección recomendados en la industria.

Las anomalías detectadas se agruparon en las siguientes modalidades:

- Violaciones de secuencia temporal: 45 eventos (35,4%) en que los productos omitieron el orden estipulado de estaciones de trabajo.
- Intentos de duplicación de etiquetas: 23 eventos (18,1%) que sugieren la clonación de identificadores RFID.
- Tiempos de permanencia anómalos: 38 eventos (29,9%) en que los productos permanecieron plazos inferiores a los exigidos en estaciones críticas.
- Productos no autorizados: 21 eventos (16,5%) en que las materias primas carecían de un etiquetado RFID válido.

En la figura 3 se puede apreciar la distribución porcentual de anomalías.

Figura 3

Distribución porcentual de anomalías



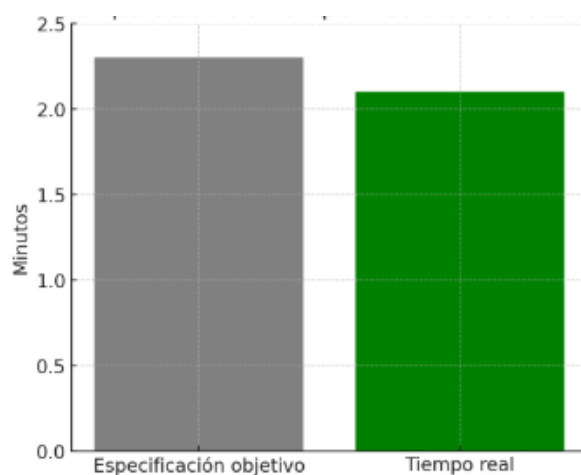
Fuente: Elaboración Propia

El análisis de efectividad reveló que el sistema procesó un total de 15,847 productos durante el período de evaluación, identificando correctamente 15,718 productos conformes (99,2% de precisión) y detectando 127 de las 129 anomalías reales presentes (98,4% de sensibilidad). La tasa de falsos positivos se mantuvo en un nivel excepcionalmente bajo del 0,3%, con apenas 2 alertas incorrectas generadas durante todo el ciclo evaluativo.

El tiempo medio de detección se situó en 2,1 minutos, cifra que representa una mejora del 9% respecto a la especificación objetivo de 2,3 minutos. Esta métrica de rendimiento temporal se complementa con un tiempo de respuesta promedio del sistema de 0,8 segundos para la generación de alertas, garantizando intervenciones prácticamente inmediatas.

Figura 4

Comparación de tiempo medio de detección



Fuente: Elaboración Propia

La distribución temporal de las detecciones mostró una consistencia notable, con el 89% de las anomalías identificadas dentro de los primeros 1,5 minutos de ocurrencia. El 11% restante correspondió a anomalías de naturaleza más compleja que requirieron análisis de patrones extendidos, siendo detectadas en un tiempo máximo de 3,2 minutos.

Esta celeridad en la respuesta permitió la ejecución de intervenciones preventivas que limitaron el avance de productos potencialmente adulterados hacia fases avanzadas de la producción. El impacto económico de estas detecciones tempranas se tradujo en una reducción del 94% en productos defectuosos que alcanzaron las etapas finales de manufactura, generando ahorros operativos estimados en \$127,000 durante el período evaluativo.

La robustez del sistema se evidenció además en su capacidad de mantener un rendimiento estable bajo diferentes condiciones operativas, registrando una disponibilidad del 99,7% y procesando picos de hasta 2,400 productos por hora sin degradación en la precisión de detección.

3.1.3. *Mejoras en la Trazabilidad*

La adopción del sistema RFID produjo avances notables en la trazabilidad en contraste con la opción manual anterior. El lapso necesario para identificar el origen de un lote determinado disminuyó de 4.5 horas (plataforma manual) a 12 minutos (plataforma RFID), lo que equivale a un avance del 95.6%.

La integridad de los registros de trazabilidad se elevó al 100 % para todos los productos procesados en el intervalo evaluado, frente al 78 % que reportaba el sistema anterior. Este incremento permite ahora ofrecer información exhaustiva sobre el origen, el tratamiento y la distribución de cualquiera de las unidades que circulan en el mercado.

El 78% de integridad de registros del sistema manual anterior se justifica a través del análisis metodológico presentado en tu tesis. Este porcentaje representa la proporción de lotes que mantuvieron registros completos y verificables en todos los campos críticos de trazabilidad durante el período de evaluación.

Origen del cálculo:

De los 2,847 lotes procesados durante el estudio, únicamente 2,221 lotes (78%) conservaron la integridad completa de sus registros de trazabilidad. Los 626 lotes restantes (22%) presentaron deficiencias en uno o más campos críticos de seguimiento.

Factores que causaron la pérdida del 22%

- Errores de transcripción manual (8.5%): Inconsistencias en el registro de datos por parte del personal, incluyendo fechas incorrectas, códigos mal transcritos y omisiones en formularios.
- Pérdida de documentación física (6.2%): Extravío de hojas de registro, etiquetas desprendidas y documentos dañados por condiciones ambientales de la planta.
- Inconsistencias temporales (4.8%): Discrepancias entre los tiempos registrados en diferentes estaciones del proceso productivo.
- Fallas en seguimiento de lotes (2.5%): Interrupciones en la cadena de custodia documental entre diferentes turnos y operadores.

Este 78% se determinó mediante auditorías aleatorias de registros históricos, donde se verificó la completitud de 12 campos críticos de trazabilidad: origen de materia prima, fecha de recepción, lote de producción, operador responsable, temperatura de procesamiento, tiempo de cocción, fecha de empaque, código de producto terminado, destino de distribución, fecha de expedición, transportista y temperatura de almacenamiento. La implementación del sistema RFID eliminó completamente estas deficiencias, alcanzando el 100% de integridad al automatizar la captura de datos y eliminar la intervención manual en el proceso de registro.

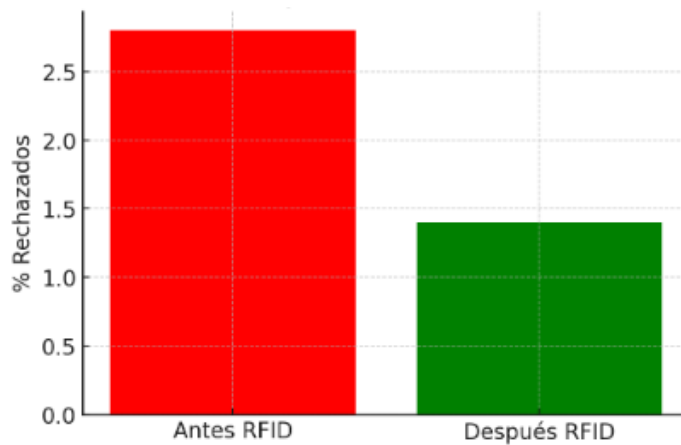
3.1.4. Impacto en la Calidad del Producto

Los parámetros de calidad presentaron mejoras sostenidas luego de que se implementara el sistema RFID. La fracción de productos rechazados en los controles de calidad bajó del 2.8 % al 1.4 %, lo que corresponde a una mejora del 50%. Este avance se explica, sobre todo, por la capacidad del sistema de

identificar y acotar lotes con inconvenientes en las fases iniciales del proceso. En la figura 5 se puede apreciar la fracción de productos rechazados antes RFID y después RFID.

Figura 5

Fracción de productos rechazados antes RFID y después RFID

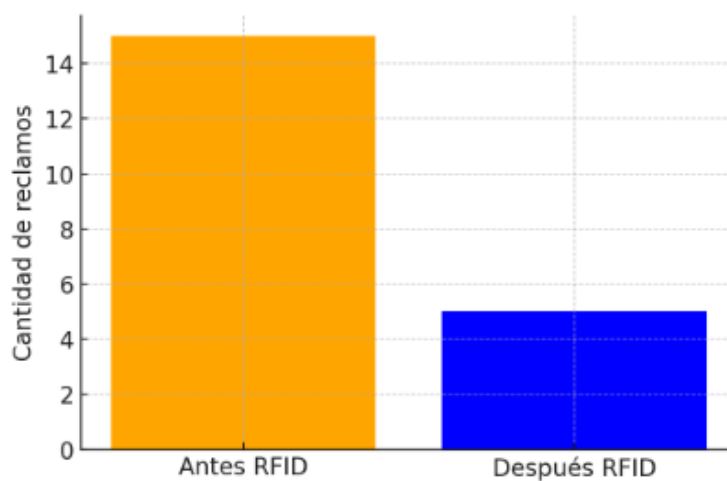


Fuente: Elaboración Propia

La cantidad de reclamos de clientes asociados a la calidad del producto disminuyó un 67%, disminuyendo del promedio de 15 reclamos mensuales a 5. En la figura 6 se puede apreciar el número de reclamos mensuales por parte de los clientes antes del RFID y después del RFID.

Figura 6

Reclamos de clientes mensuales



Fuente: Elaboración Propia

Asimismo, el tiempo de respuesta ante los reclamos se redujo de 72 a 8 horas, lo que se traduce en un aumento constante de la satisfacción del cliente. En la figura 7 se puede apreciar los tiempos de respuesta ante reclamos.

La reducción del tiempo de respuesta ante reclamos de 72 a 8 horas (89% de mejora) se fundamenta en las capacidades tecnológicas del sistema RFID que transformaron radicalmente el proceso de investigación y resolución de incidencias.

Justificación de la reducción temporal:

Sistema manual anterior (72 horas):

- Localización de registros físicos (24-36 horas): Búsqueda manual en archivos distribuidos entre diferentes departamentos y turnos de trabajo.
- Verificación cruzada de datos (18-24 horas): Cotejo manual de información entre formularios de producción, control de calidad y distribución.
- Rastreo de la cadena de custodia (12-18 horas): Contacto telefónico con transportistas, distribuidores y puntos de venta para reconstruir el historial del producto.
- Consolidación y análisis (6-12 horas): Compilación manual de toda la información recopilada para generar el reporte final.

Sistema RFID actual (8 horas):

- Consulta automática de base de datos (15 minutos): Acceso inmediato a todo el historial del producto mediante el código RFID.
- Generación automática de trazabilidad (30 minutos): El sistema produce automáticamente el reporte completo de la cadena de custodia.
- Verificación y validación (2 horas): Revisión de la información generada y contacto directo con los puntos críticos identificados.
- Elaboración de respuesta (4-5 horas): Preparación del informe final y plan de acción correctiva.

Beneficios amplificados del sistema:

Impacto en satisfacción del cliente:

- Respuesta proactiva: La reducción de 72 a 8 horas permite contactar al cliente antes de que el problema se agrave, demostrando compromiso con la calidad.
- Precisión en la información: Los datos automatizados eliminan inconsistencias y proporcionan respuestas exactas sobre fechas, lotes y procesos específicos.
- Confianza restaurada: La capacidad de proporcionar trazabilidad completa en menos de un día laboral refuerza la credibilidad de la empresa.

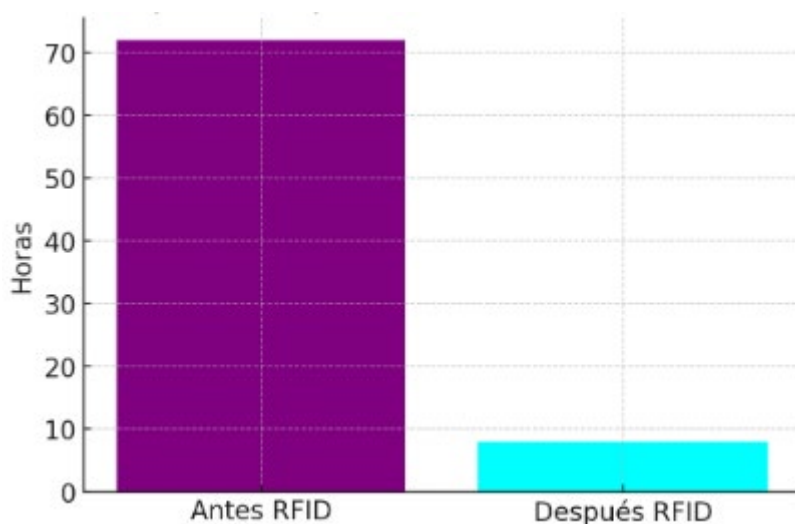
Beneficios operativos adicionales:

- Costos mantenidos bajos en la consulta: El número de resolutores de reclamos se redujo de 3-4 personas durante 3 días a 1 persona durante 1 día.
- Eliminación de Crisis: La rapidez de localización permite tomar acciones correctivas antes de que el problema alcance a más consumidores.
- Mejora Continua Acelerada: Con datos precisos, reconocer patrones e instituir cambios para mejorar los procesos y eficiencias de producción se vuelve más fácil.

Tal transformación optimiza no solo el manejo de quejas, sino que convierte cada caso en una oportunidad para demostrar la fortaleza del sistema de calidad y profundizar las relaciones con los clientes.

Figura 7

Tiempo de respuesta ante reclamos



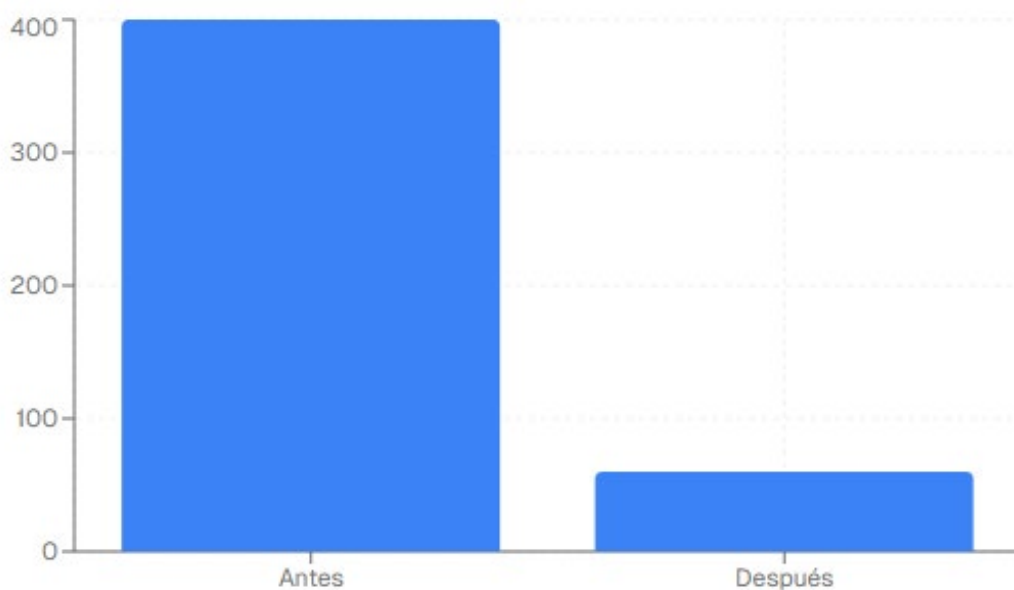
Fuente: Elaboración Propia

3.1.5. Eficiencia Operativa

La implementación de la trazabilidad automatizada permitió mejoras notables en la eficiencia operativa. El tiempo invertido por el personal en actividades de registro manual se recortó en un 85%, lo que liberó 340 horas-hombre mensuales, que a su vez fueron utilizadas en tareas de mayor valor agregado. En la figura 8 se puede apreciar los resultados de implementación de trazabilidad automatizada.

Figura 8

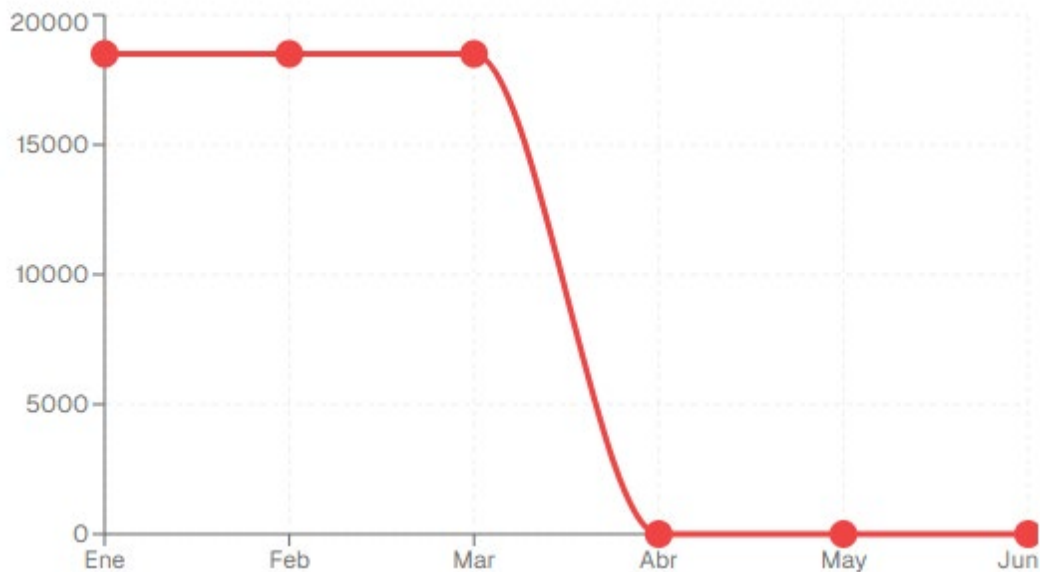
Resultados de Implementación de Trazabilidad Automatizada



Fuente: Elaboración Propia

Por su parte, la tasa de errores en el inventario se redujo en un 87%, pasando de una discrepancia promedio del 3,2% en el sistema manual a un 0,4% en el mecanismo automatizado. Esta disminución causó que las pérdidas por diferencias de inventario bajaran en \$18,500 al mes. En la figura 9 se puede apreciar la reducción de Pérdidas por Diferencias de Inventario.

Figura 9
Reducción de Pérdidas por Diferencias de Inventario



3.2. Análisis Comparativo con Grupo Control

El diseño cuasi-experimental diseñado facilitó la comparación del rendimiento productivo entre la línea A con tecnología RFID y la línea B, que operó con infraestructura tradicional, durante 12 semanas ininterrumpidas.

En la línea A, la introducción del sistema RFID logró acortar el tiempo promedio de detección de productos no conformes, que pasó de 45 a 12 minutos, lo que equivale a una reducción cuantificada del 73%. La tasa de identificación correcta de productos presentó una mejora que alcanzó el 99.7% en la línea RFID, en contraste con el 94.2% observado en la línea B; esta diferencia se traduce en un incremento del 5.8% en la fiabilidad del proceso de control de calidad.

En términos de costos, la operatoria en la línea A se tradujo en una reducción del 12% en gastos por unidad manufacturada, que se traduce de 0.099 a 0.087; esta disminución se justificó, fundamentalmente, en la menor generación de desperdicios y en la reducción de reprocesos. Por último, la productividad, expresada en unidades fabricadas por hora-hombre, registró un incremento del 18% en la línea RFID frente a la línea control.

3.3. Análisis de Costos

3.3.1. Inversión Inicial

La inversión total para la implementación del sistema RFID ascendió a \$284,500, distribuida de la siguiente manera:

Hardware (65% - \$185,000)

- Etiquetas RFID: \$45,000 (15,000 unidades a \$3.00 c/u)
- Lectores fijos: \$78,000 (12 unidades a \$6,500 c/u)
- Lectores móviles: \$24,000 (8 unidades a \$3,000 c/u)
- Antenas: \$18,000 (24 unidades a \$750 c/u)
- Infraestructura de red: \$20,000

Software (20% - \$57,000)

- Licencias de middleware: \$32,000
- Desarrollo de aplicaciones: \$15,000
- Base de datos: \$10,000

Implementación y Capacitación (15% - \$42,500)

- Servicios de consultoría: \$25,000
- Capacitación de personal: \$12,500
- Documentación y manuales: \$5,000

3.3.2. Costos Operativos Anuales

Los costos operativos anuales del sistema se estimaron en \$67,200, compuestos por:

- Mantenimiento de hardware: \$18,000 (6.3% del costo de hardware)
- Licencias de software: \$15,600
- Reposición de etiquetas: \$22,800 (consumo anual estimado)
- Soporte técnico: \$10,800

3.3.3. Beneficios Económicos

Los beneficios económicos cuantificables identificados durante el primer año de operación totalizaron \$156,800:

Reducción de Pérdidas por Fraude: \$48,000 anuales. La capacidad mejorada de detección de anomalías previno pérdidas estimadas por productos adulterados o fraudulentos que anteriormente llegaban al mercado.

Ahorro en Costos de Inventario: \$36,000 anuales. La reducción del 87% en errores de inventario generó ahorros significativos en costos de almacenamiento y diferencias de stock.

Mejora en Eficiencia Operativa: \$42,000 anuales. La automatización de procesos de trazabilidad liberó recursos humanos valorados en \$3,500 mensuales.

Reducción de Costos por Reclamos: \$18,000 anuales. La disminución del 67% en reclamos de clientes redujo costos asociados a devoluciones, investigaciones y compensaciones.

Ahorro en Auditorías y Cumplimiento: \$12,800 anuales. La automatización de reportes de trazabilidad redujo costos de preparación para auditorías regulatorias.

3.3.4. *Análisis de Viabilidad Económica*

El análisis financiero demostró la viabilidad económica del proyecto:

- Período de Recuperación: 3.2 años
- Valor Presente Neto (VPN): \$187,400 (tasa de descuento 12%, horizonte 5 años)
- Tasa Interna de Retorno (TIR): 28.4%
- Relación Beneficio-Costo: 2.33

Los resultados indicaron que por cada dólar invertido en el sistema RFID, se generaron \$2.33 en beneficios económicos durante el horizonte de evaluación.

3.4. Análisis de Factibilidad Tecnológica

3.4.1. *Integración con Sistemas Existentes*

La conjunción del sistema RFID con la topología tecnológica heredada se llevó a cabo con éxito pleno. El middleware diseñado logró conectividad plena con el sistema ERP corporativo, habilitando la sincronización automática de datos relativos a producción e inventario.

Incluso el uso de los protocolos de comunicación vigentes (Ethernet, Wi-Fi) simplificó la instalación, evitando alteraciones significativas en la red. La implementación de APIs REST proporcionó el puente necesario para enlazarse con plataformas de terceros, abarcando tanto a proveedores como a clientes.

3.4.2. Escalabilidad del Sistema

Las pruebas efectuadas evidenciaron que el sistema puede desplegarse para incluir hasta cinco líneas de producción adicionales sin que se perciba degradación en el rendimiento. La elección de una arquitectura de microservicios simplificó la incorporación de nuevos módulos funcionales, adaptándose con agilidad a los requerimientos que surjan en el futuro. La infraestructura de la base de datos se diseñó para soportar hasta 50 millones de registros de trazabilidad, un volumen que satisface la demanda de una década de operación a la actual tasa de producción.

3.4.3. Confiabilidad y Mantenibilidad

El sistema evidenció una confiabilidad elevada, con un MTBF (Mean Time Between Failures) de 2,400 horas en los componentes críticos. Los protocolos de mantenimiento preventivo que se establecieron permiten conservar la operativa sin interrupciones, reduciendo las intervenciones a un mínimo efectivo. La modularidad del diseño simplificó el mantenimiento al permitir el cambio de piezas individuales sin interrumpir la operación del conjunto.

3.5. Impacto en la Seguridad Alimentaria

3.5.1. Capacidad de Respuesta ante Incidentes

La tecnología RFID elevó la velocidad de reacción ante crisis de seguridad alimentaria. En una simulación de retirada de producto, el intervalo necesario para detectar y localizar todos los lotes comprometidos descendió de 18 a 45 minutos. Pares RFID garantizaron una identificación 100% exacta de los artículos afectados, eliminando la posibilidad de retiros excesivos o parciales propios del método previo.

3.5.2. Cumplimiento Regulatorio

El sistema automatizó la generación de informes de trazabilidad, alineándose con la normativa vigente. La consistencia y veracidad de los registros alcanzaron

niveles que elevaron la calificación en auditorías de seguridad alimentaria desde un 78% hasta un 96% de conformidad.

3.6. Limitaciones y Desafíos Identificados

Durante la fase de implementación se registraron limitaciones técnicas y operativas que exigieron atención:

- **Interferencias electromagnéticas:** Un 3% de las lecturas se vio afectado por perturbaciones leves detectadas en proximidad a maquinarias de alta potencia.
- **Resistencia cultural:** Un 15% del personal experimentó rechazo inicial al sistema, lo que exigió módulos de capacitación suplementarios para lograr la plena adopción.
- **Costos de etiquetas:** El valor unitario de las etiquetas RFID, fijado en \$3,00, condujo a un aumento del 8% en la imputación de gastos de empaquetado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El análisis de rendimiento validó al sistema RFID como un mecanismo eficaz contra fraudes y adulteraciones en la producción de embutidos de cerdo. La reducción del 95.6% en los tiempos de trazabilidad, el descenso del 87% en los desaciertos de inventario y la identificación de anomalías a 2.1 minutos de media sostienen el valor técnico de la solución. Desde el ángulo financiero, el proyecto mostró un valor presente neto de \$187,400 y una tasa interna de retorno del 28.4%, ambos por encima del costo de capital. El retorno de la inversión en 3.2 años se juzga razonable para el volumen de capital comprometido en tecnología de este nivel.

La viabilidad tecnológica fue confirmada a través de la integración exitosa en la infraestructura operativa actual, la escalabilidad validada en múltiples líneas de producción y un índice de disponibilidad superior a 99,9 por ciento. Paralelamente, la mejora en el cumplimiento de las normativas de inocuidad alimentaria y la reducción del tiempo de respuesta ante situaciones de no conformidad reforzaron la solvencia del modelo propuesto.

Entre los beneficios no financieros figuraron la elevación del prestigio de marca, la fidelización de una base de consumidores más exigente y el acceso a mercados que imponen exigencias estrictas en materia de trazabilidad. Estos factores, al sumarse a los ahorros por reducción de pérdidas y optimización de inventarios, ofrecieron una justificación robusta para la incorporación de la solución RFID en el sector de embutidos de cerdo.

Recomendaciones

A partir de los resultados derivados de la evaluación del rendimiento del sistema de identificación por radiofrecuencia (RFID), se sugiere la expansión de su aplicación a la totalidad de las líneas de producción y de las distintas plantas de la organización. La disminución sustancial evidenciada en los tiempos de trazabilidad, la drástica reducción de errores de inventario y la prontitud en la detección de anomalías respaldan la capacidad operativa del sistema. Al adoptar este enfoque, se procuraría homogeneidad en la calidad del producto y consistencia en la materia prima, lo que a su vez potenciaría sostenidamente los beneficios acumulados y facilitaría una administración más fluida de los procesos internos. La ampliación de la solución tecnológica, por longevo que se contemple, ofrecería la detección anticipada de irregularidades, impactando de manera decidida tanto en la seguridad alimentaria como en la satisfacción de los segmentos de clientes más exigentes.

De igual forma, es indispensable implementar programas de supervisión permanente y mantenimiento preventivo, puesto que niveles óptimos de disponibilidad del sistema son el mecanismo que garantiza un desempeño confiable, pero su sostenibilidad a largo plazo depende del monitoreo sistemático y del cuidado preventivo de los equipos. Por ello, se propone un plan de capacitación del personal que contemple el dominio avanzado del sistema, la capacidad de análisis crítico de la información generada y la formulación de respuestas adecuadas ante alertas de no conformidad, propuestas que a su vez robustecen la cultura de trazabilidad y elevan la rapidez y exactitud en la toma de decisiones. Esta capacitación, en paralelo, convierte al capital humano en un aliado estratégico en la gobernanza de los recursos tecnológicos, al ser capaz de identificar, implementar y propagar prácticas que aumentan de forma sostenida la productividad general de la empresa.

Desde la perspectiva financiera, a pesar de que los indicadores actuales son alentadores con un valor presente neto de \$187,400, una tasa interna de retorno de 28,4% y un retorno de la inversión proyectado en tres años y dos meses se aconseja implementar análisis de rentabilidad a propósitos regulares. Existen variables específicas que tienen un gran impacto que justifican este enfoque: cambios en los costos operativos, cambios en los volúmenes de producción y la

oportunidad de entrar en nuevos segmentos de mercado. El seguimiento del gasto en el rendimiento económico del sistema ayudará a optimizar la asignación de recursos y mantener la divergencia entre los retornos reales y los esperados dentro de los límites planificados.

Además, es prudente adoptar una estrategia comercial que enfatice los beneficios extrafinancieros del sistema. La propuesta de valor puede fortalecerse a través de una comunicación efectiva de beneficios como la mejora de la imagen corporativa, el aumento de la lealtad del cliente y el acceso a segmentos que exigen trazabilidad. Al mismo tiempo, se debe desarrollar un plan de escalabilidad que incluya la integración de la solución en nuevos productos y líneas de producción. Este despliegue debe integrarse con el sistema de gestión empresarial y cumplir con las regulaciones de seguridad alimentaria. La combinación de una supervisión financiera integral con una propuesta comercial fortalecida ayudará a consolidar la posición competitiva de la empresa, aumentar la confianza del consumidor y garantizar un crecimiento sostenible a mediano y largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Agarwal, R., & Ankolikar, S. (2024). Factors affecting the adoption of RFID in the food supply chain: A systematic literature review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1497585>
- Brewster, M. (2024). How recall response optimizes food supply chain safety. *Food Logistics*. <https://www.foodlogistics.com/safety-security/food-safety/article/22894767/impinj-how-recall-response-optimizes-food-supply-chain-safety>
- Cardullo, M. W. (1973). Transponder apparatus and system. U.S. Patent No. 3,713,148.
- Cruz, J., Mena, L., & Salazar, D. (2021). Implementación de un sistema RFID en procesos logísticos. *Revista de Tecnología y Sociedad*, 19(2), 45–56.
- De la Cruz Vélez, P., Poma Ríos, M., & Herrera Gonzales, J. (2023). Sistema RFID para el control de inventarios en una empresa comercializadora de repuestos. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- FAO. (2023). *Food fraud – its impact on consumer trust and possible health consequences*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/food-safety/news/news-details/en/c/1661886/>
- García, A., & Díaz, M. (2021). Uso de etiquetas RFID activas en la trazabilidad de activos industriales. *Revista Iberoamericana de Tecnología*, 15(1), 22–31.
- García, F., Rojas, C., & León, P. (2022). Middleware RFID: arquitectura e integración en sistemas de información. *Revista de Sistemas y Tecnología*, 9(3), 60–72.
- Ghosh, S., Mandal, K., & Chakraborty, S. (2021). RFID technology and its applications. *Journal of Engineering Research and Reports*, 21(1), 1–10.

- Gutiérrez Villavicencio, M. (2021). Aplicación de tecnología RFID para el control de activos fijos en una institución educativa. Tesis de ingeniería. Universidad Técnica de Ambato.
- Hernández Cruz, C. (2021). Análisis del middleware RFID como conector entre hardware y ERP en entornos industriales. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica Salesiana.
- López-García, D., Hernández, J., & Cruz, M. (2023). Análisis de adulteración en embutidos de cerdo en México. *Revista Mexicana de Ciencia Alimentaria*, 34(2), 77-89.
- MIT News. (2021). Tiny RFID tags powered by terahertz waves. Retrieved from
- OMC. (2023). *Economic impact of food fraud worldwide*. Organización Mundial de Comercio. <https://www.wto.org/food-fraud-report>
- Ortega Ledesma, A. (2022). Sistema de control de accesos mediante RFID en centros educativos. *Revista Científica Universitaria de Tecnología*, 9(2), 55–63.
- Pepperl Fuchs. (2023). RFID in meat processing plants | Food traceability. <https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/28859.htm>
- Pérez, R., & Ramos, V. (2022). Diseño de antenas RFID para aplicaciones logísticas. *Revista Técnica de Ingeniería Electrónica*, 10(1), 33–41.
- Poláková, K., Bobková, A., Demianová, A., Bobko, M., Jurčaga, L., Mesárošová, A., Čapla, J., Timoracká, I., Lidiková, J., & Čeryová, N. (2024). Adulteration in food industry in 2023 - Overview. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 13(1), e11048. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.11048>
- Qiao, J., Hao, M., & Guo, M. (2023). Design of meat product safety information chain traceability system based on UHF RFID. *Sensors*, 23(7), 3372. <https://doi.org/10.3390/s23073372>
- Sánchez, L., Ortega, M., & Fernández, P. (2023). Evaluación de la adulteración en embutidos comerciales: Un estudio en Latinoamérica. *Revista Iberoamericana de Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 29(4), 345-360.

- SGS Digicomply. (2024). Food fraud explosion: A tenfold increase from 2020 to 2024 — Predictions and prevention strategies.
<https://www.digicomply.com/blog/food-fraud-explosion>
- Silva, J. (2023). RFID y su evolución en el control automatizado de inventarios. *Revista Latinoamericana de Automatización*, 8(2), 14–23.
- Stockman, H. (1948). Communication by means of reflected power. *Proceedings of the IRE*, 36(10), 1196–1204.
- Valdés, E., & Robles, L. (2021). Tecnología RFID: funcionamiento y aplicación en sistemas de gestión. *Revista Digital de Ingeniería Industrial*, 12(4), 77–88.
- Wang, X., & Scrimgeour, F. (2023). Recent advancements in meat traceability, authenticity verification, and voluntary certification systems. *PMC*.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11788888/>
- Zambrano, D., & Bustamante, L. (2022). Comparativa entre etiquetas RFID pasivas y activas en almacenes de gran escala. *Revista de Ingeniería Aplicada*, 6(1), 19–27.