

Maestría en
Gerencia de Proyectos

Trabajo de investigación previo a la obtención del título de

Magíster en Gerencia de Proyectos

AUTORES:

Ing. Christopher Leonardo Acosta Ordoñez

Ing. Jose Alejandro Arguello Ortega

Ing. Danilo Armando Armijos Rivadeneira

Ing. Carlos Ivan Bustamante Duque

Ing. Alex Marcelo Cadena Quimbita

Ing. Shirley Jazmín Heredia Alomoto

Msc. Sara Carolina Ochoa Agrazal

Ing. Alejandra Estefania Vivas Cabezas

TUTORES:

PhD. Carlos Luis Calderon

DBA. José Luis Mercader

Evaluación de la viabilidad técnica, económica y de riesgos de un sistema de aprovechamiento de calor residual en el proceso de extrusión de alimento balanceado

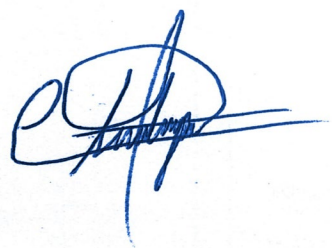
Quito, (mayo 2026)

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Certificación de autoría

Nosotros, Christopher Leonardo Acosta Ordoñez, Jose Alejandro Arguello Ortega, Danilo Armando Armijos Rivadeneira, Carlos Ivan Bustamante Duque, Alex Marcelo Cadena Quimbita, Shirley Jazmín Heredia Alomoto, Sara Carolina Ochoa Agrazal, Alejandra Estefania Vivas Cabezas, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE), para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, su reglamento y demás disposiciones legales.



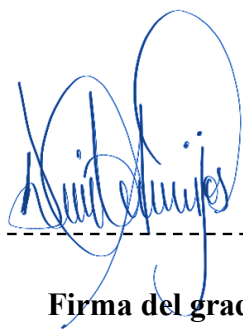
Firma del graduando

Christopher Leonardo Acosta Ordoñez



Firma del graduando

Jose Alejandro Arguello Ortega



Firma del graduando

Danilo Armando Armijos Rivadeneira



Firma del graduando

Carlos Ivan Bustamante Duque



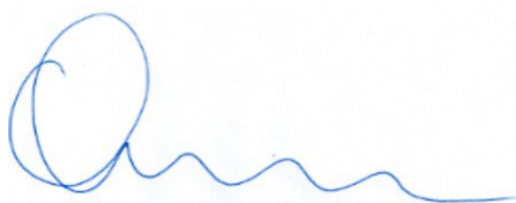
Firma del graduando

Alex Marcelo Cadena Quimbita



Firma del graduando

Shirley Jazmín Heredia Alomoto



Firma del graduando

Sara Carolina Ochoa Agrazal



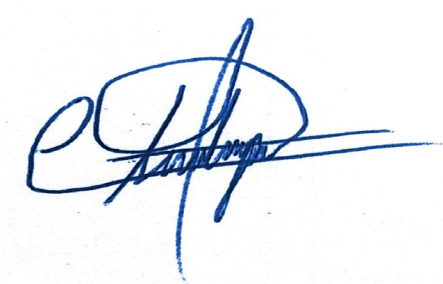
Firma del graduando

Alejandra Estefania Vivas Cabezas

Autorización de Derechos de Propiedad Intelectual

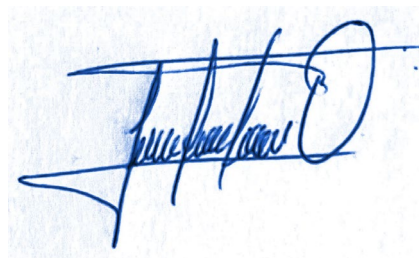
Nosotros, Christopher Leonardo Acosta Ordoñez, Jose Alejandro Arguello Ortega, Danilo Armando Armijos Rivadeneira, Carlos Ivan Bustamante Duque, Alex Marcelo Cadena Quimbita, Shirley Jazmín Heredia Alomoto, Sara Carolina Ochoa Agrazal, Alejandra Estefania Vivas Cabezas, en calidad de autores del trabajo de investigación titulado **Evaluación de la viabilidad técnica, económica y de riesgos de un sistema de aprovechamiento de calor residual en el proceso de extrusión de alimento balanceado**, autorizamos a la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE) para hacer uso de todos los contenidos que nos pertenecen o de parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación. Los derechos que como autores nos corresponden, lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento en Ecuador.

D. M. Quito, (mayo 2026)



Firma del graduando

Christopher Leonardo Acosta Ordoñez



Firma del graduando

Jose Alejandro Arguello Ortega



Firma del graduando

Danilo Armando Armijos Rivadeneira



Firma del graduando

Carlos Ivan Bustamante Duque



Firma del graduando

Alex Marcelo Cadena Quimbita



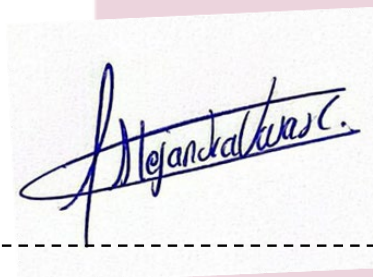
Firma del graduando

Shirley Jazmín Heredia Alomoto



Firma del graduando

Sara Carolina Ochoa Agrazal



Firma del graduando

Alejandra Estefania Vivas Cabezas

Aprobación de dirección y coordinación del programa

Nosotros, **José Luis Mercader** y **Carlos Luis Calderon**, declaramos que los graduandos: Christopher Leonardo Acosta Ordoñez, Jose Alejandro Arguello Ortega, Danilo Armando Armijos Rivadeneira, Carlos Ivan Bustamante Duque, Alex Marcelo Cadena Quimbata, Shirley Jazmín Heredia Alomoto, Sara Carolina Ochoa Agrazal, Alejandra Estefania Vivas Cabezas son los autores exclusivos de la presente investigación y que ésta es original, auténtica y personal de ellos.



José Luis Mercader

Director de la

Maestría en Gestión de Proyectos



Validar Únicamente en FirmaEC.
 Firmado electrónicamente por:
**CARLOS LUIS
 CALDERON ESPINALES**

Carlos Luis Calderón

Coordinador de la

Maestría en Gestión de Proyectos

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación a Dios, por brindarme fortaleza, sabiduría y perseverancia durante cada etapa de este camino académico; a mis padres y familia, por su apoyo incondicional, sus consejos y el esfuerzo realizado para ayudarme a cumplir cada una de mis metas; a mi pareja, por impulsarme constantemente a culminar cada uno de mis proyectos y objetivos, brindándome apoyo, motivación y compañía durante este importante proceso de crecimiento personal y profesional; y a todas las personas que creyeron en mí y me motivaron a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Finalmente, dedico este trabajo a mí mismo, como reflejo del esfuerzo, disciplina y compromiso invertidos para alcanzar este importante logro profesional.

Christopher Leonardo Acosta Ordoñez

Este trabajo de titulación es dedicado a mi esposa, Sofía, a mi hijo Matías, a mis padres y a mis hermanos, quienes han sido el pilar fundamental durante esta etapa de mi maestría. Gracias por su amor, apoyo incondicional, comprensión y motivación constante, ya que cada uno de ustedes contribuyó de manera especial para que este logro hoy sea una realidad. Este esfuerzo y meta alcanzada también les pertenece a ustedes, por acompañarme y creer en mí en todo momento.

Jose Alejandro Arguello Ortega

Dedico el presente trabajo de titulación a mi esposa, mis padres, hermanos y sobrino, quienes han estado presentes en cada reto que he enfrentado a lo largo de mi formación. Su confianza y apoyo permanente fueron un impulso constante que me permitieron superar cada desafío y culminar este importante objetivo académico.

Danilo Armando Armijos Rivadeneira

Dedico este trabajo de titulación a mi esposa y a mis padres, por su apoyo incondicional, su paciencia y por ser mi motivación durante todo este tiempo. Gracias por acompañarme en cada etapa y brindarme la fuerza necesaria para alcanzar esta meta. También dedico este logro a todas las personas que estuvieron pendientes de mí durante este proceso, brindándome su apoyo, consejos y mejores deseos. De una u otra manera, cada uno aportó para que este objetivo hoy se haga realidad.

Carlos Ivan Bustamante Duque

Dedico este logro primeramente a Jehová, por brindarme vida, sabiduría y fortaleza necesaria para superar cada uno de los desafíos que con llevo para llegar a este punto tan importante en mi vida. En momentos de incertidumbre su guía y sabiduría han sido fundamentales en cada paso de este camino. A mi esposa, quien ha sido mi compañía, inspiración y motivo para seguir adelante. Gracias por el apoyo, la alegría y la motivación que me brindaron durante todo este proceso, especialmente en los momentos más difíciles. A mis padres, por ser un pilar de enseñanza, valores y esfuerzo constante en mi vida. Gracias por cada consejo, sacrificio y ejemplo brindado a lo largo de mi formación personal y

profesional. A mis hermanos, quienes con sus palabras de aliento y apoyo me motivaron a continuar y no rendirme ante las dificultades. A todos ellos, con profundo cariño y gratitud, dedico este logro alcanzado

Alex Marcelo Cadena Quimbita

Dedico este proyecto a mi sobrina Luziana, porque sin darse cuenta se ha convertido en una de mis mayores inspiraciones para querer ser mejor cada día. Verla tan feliz, con esa emoción tan sincera y esa forma tan bonita de ver la vida, hace que siempre quiera sacar la mejor versión de mí. Espero también que este logro pueda servirle como un ejemplo de que, con esfuerzo, dedicación y constancia, siempre es posible alcanzar las metas y llegar muy lejos.

Shirley Jazmín Heredia Alomoto

Dedico este logro a Dios, cuyo espíritu obra en mí todos los días, a mi esposo, su compañía me fortalece para alcanzar mis objetivos, sin su ayuda nada de esto habría sido posible. A mis hijos, mi mayor logro en la vida, les debo todo, son la fuerza que me impulsa todos los días a ser mejor. A mis mascotas, por ser mi apoyo emocional en esos días en los que siento que no puedo más. A mí, por seguir persiguiendo la excelencia, mediante esfuerzo, compromiso y disciplina. Este logro lo comparto con todos ustedes. El ser humano se edifica con conocimiento y el conocimiento le da el poder para llegar muy lejos.

Sara Carolina Ochoa Agrazal

Dedico este logro principalmente a Dios, por darme fuerza, sabiduría y acompañarme en cada paso de este camino. A mi hijo, quien es mi mayor inspiración y la razón para seguir adelante cada día. Gracias por llenar mi vida de amor y motivarme a nunca rendirme.

A mi esposo, por su amor, paciencia y apoyo incondicional durante todo este proceso. Gracias por creer en mí y estar siempre a mi lado. A mis padres, por sus enseñanzas, sacrificios y por brindarme siempre su apoyo y confianza para alcanzar mis metas. Este logro también les pertenece a ustedes.

Alejandra Estefania Vivas Cabezas

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por brindarme salud, fortaleza, sabiduría y la oportunidad de culminar esta importante etapa de mi vida profesional. A mi familia, por su apoyo incondicional, confianza y sacrificio constante, siendo el pilar fundamental en cada uno de mis logros. A mi pareja, por su motivación, comprensión y compañía durante todo este proceso académico, impulsando siempre a alcanzar mis metas y no rendirme ante las dificultades. Finalmente, agradezco a mis mentores y docentes, quienes compartieron sus conocimientos, experiencia y orientación, contribuyendo significativamente a mi formación profesional y al desarrollo de este proyecto de titulación.

Christopher Leonardo Acosta Ordoñez

Expreso mi más sincero agradecimiento primero a Dios y a mi familia, especialmente a mi esposa Sofía, a mi hijo Matías, a mis padres y hermanos, por brindarme su apoyo emocional, confianza y fortaleza durante todo este proceso académico. De igual manera, agradezco a los docentes y a todas las personas que aportaron con sus conocimientos, orientación y consejos para el desarrollo de esta investigación, permitiendo que pueda culminar con éxito esta importante etapa profesional y personal.

Jose Alejandro Arguello Ortega

Agradezco a todas las personas que me acompañaron y apoyaron durante este importante proceso de aprendizaje y crecimiento profesional. De manera especial, a mis compañeros, con quienes compartimos esfuerzo, compromiso y trabajo en equipo para alcanzar este objetivo.

Expreso un profundo agradecimiento, a mi familia por estar presentes en cada logro alcanzado y por motivarme a seguir creciendo tanto en el ámbito profesional como personal.

Danilo Armando Armijos Rivadeneira

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que formaron parte de este proceso académico y profesional. A mi familia, por su apoyo constante, comprensión y motivación durante el desarrollo de este trabajo de titulación y a lo largo de toda esta maestría.

A mis docentes y tutor, por compartir sus conocimientos, orientación y experiencia, los cuales fueron fundamentales para la realización de este proyecto.

Carlos Ivan Bustamante Duque

Agradezco a Jehová por permitirme contar con vida y sabiduría, gracias a su guía me ha permitido cumplir con una meta más dentro de mi formación profesional. A mi esposa le expreso mi más sincera gratitud, por ser mi compañera durante este proceso demostrando todo su amor, apoyo incondicional y palabras de motivación que estuvieron presentes en cada uno de estos momentos, impulsándome a seguir adelante aun en las circunstancias más difíciles. Su paciencia, comprensión y confianza fueron una fuente constante de inspiración para alcanzar esta meta

Alex Marcelo Cadena Quimbita

Agradezco especialmente a mi mamá, Jeanneth, por estar siempre para mí, por apoyarme de forma incondicional en cada cosa que me propongo y por acompañarme durante todo este proceso de la maestría con su motivación y cariño. También quiero agradecer a mi hermano, porque desde que le conté que quería estudiar la maestría me apoyó y creyó en mí, y eso ha sido muy importante para seguir adelante en este proceso.

Shirley Jazmín Heredia Alomoto

Agradezco a Dios por su misericordia y por todo lo bueno que ha traído a mi vida, su amor va más allá de lo que se puede ver; se siente en cada paso de mi vida, al saber que Él camina conmigo. A mi familia, gracias por entenderme y apoyarme día tras día.

Sara Carolina Ochoa Agrazal

Agradezco a Dios por bendecirme y acompañarme en este camino. A mi familia, especialmente a mi hijo, esposo y padres, por su apoyo, amor y motivación constante para alcanzar este logro.

Alejandra Estefania Vivas Cabezas

RESUMEN

Este trabajo de investigación surge de la necesidad de mejorar el proceso de extrusión de alimento balanceado, considerando que la industria de alimentos balanceados emplea procesos térmicos que demandan un elevado consumo de energía, lo que incrementa los costos operativos y genera oportunidades para optimizar la eficiencia energética. En este contexto, se plantea la evaluación técnica de un sistema de recuperación de calor residual aplicado al proceso de extrusión, con el propósito de aprovechar la energía térmica contenida en el condensado caliente y utilizarla dentro del proceso productivo. La investigación se desarrolla bajo un enfoque aplicado y cuantitativo, mediante el análisis de las principales variables técnicas que intervienen en el proceso, permitiendo realizar el balance energético, estimar el potencial de recuperación de calor y establecer la base para la evaluación económica de la propuesta. Los resultados obtenidos evidencian que la implementación del sistema de recuperación de calor residual representa una alternativa técnicamente viable para optimizar el consumo energético, reducir los costos operativos y mejorar la eficiencia del proceso de extrusión. Asimismo, el análisis económico demuestra que el proyecto mantiene su viabilidad incluso bajo escenarios conservadores, generando un impacto financiero positivo y contribuyendo al fortalecimiento de la sostenibilidad, la competitividad y el uso eficiente de los recursos energéticos en la industria de alimentos balanceados.

***Palabras clave:* eficiencia energética, recuperación de calor residual, condensado, extrusión, viabilidad económica.**

ABSTRACT

This research arises from the need to improve the extrusion process used in animal feed production, considering that the feed manufacturing industry relies on thermal processes that require high energy consumption, increasing operating costs while creating opportunities to enhance energy efficiency. In this context, the study proposes the technical evaluation of a waste heat recovery system applied to the extrusion process, with the aim of utilizing the thermal energy contained in hot condensate and reusing it within the production process. The research adopts an applied and quantitative approach through the analysis of the main technical variables involved in the process, enabling the development of an energy balance, the estimation of the heat recovery potential, and the establishment of the basis for the economic evaluation of the proposed system. The results demonstrate that implementing a waste heat recovery system is a technically feasible alternative for optimizing energy consumption, reducing operating costs, and improving the efficiency of the extrusion process. Furthermore, the economic analysis shows that the project remains viable even under conservative scenarios, generating a positive financial impact while contributing to enhanced sustainability, competitiveness, and the efficient use of energy resources in the animal feed manufacturing industry.

Keywords: energy efficiency, waste heat recovery, condensate, extrusion, economic feasibility.

TABLA	DE	CONTENIDOS
RESUMEN		16
ABSTRACT		17
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO		24
1.1 Introducción		24
1.2 Antecedentes		25
1.3 Descripción del problema		26
1.4 Formulación del problema		28
1.5 Objetivos		29
1.5.1 Objetivos generales		29
1.5.2 Objetivos específicos.....		29
1.6 Justificación.....		30
1.7 Alcance y delimitación.....		32
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL PROYECTO		35
2.1 Marco teórico		35
2.1.1 Dirección de proyectos.....		35
2.1.2 Eficiencia energética industrial		36
2.1.3 Aprovechamiento de calor residual.....		37
2.1.4 Procesos de extrusión y secado		38
2.1.5 Evaluación financiera de proyectos.....		39
2.1.6 Gestión de riesgos		40
2.2 Marco metodológico		41
2.2.1 Tipo de investigación		42
2.3 Desarrollo del Proyecto.....		46
2.3.1 Descripción del proceso de extrusión.....		46
2.3.2 Diagnóstico energético		48
2.3.3 Identificación de calor residual		49
2.3.4 Balance energético		54
2.3.5 Propuesta de recuperación de energía		56
2.3.5.1. Consideraciones operativas para la implementación.....		59
2.4 Evaluación Técnica y Económica		60
2.4.1 Estimación del ahorro energético		61
2.4.2 Flujo de caja		63

2.4.3 Retorno de inversión (ROI).....	68
2.4.3.1 ROI de la inversion inicial del sistema de recuperación térmica	70
2.4.3.2 ROI Integral del proyecto a cinco años.....	71
2.4.4 Periodo de Recuperación (Payback)	75
2.4.4.1 Payback de la inversión técnica inicial	77
2.4.4.2 Payback del proyecto integral	78
2.4.5 Análisis de escenarios	81
2.4.5.1 Escenario esperado del proyecto	84
2.4.5.2 Escenario conservador por reducción de horas de operacion	85
2.4.5.3 Escenario optimista por incremento del costo energético.....	88
2.4.5.4 Comparación de escenarios financieros	90
2.5 Gestión del Proyecto	92
2.5.1 Acta de constitución del proyecto	92
2.5.2 Estructura de desglose del trabajo (EDT/WBS).....	98
2.5.3 Cronograma del proyecto.....	103
2.5.4 Presupuesto del proyecto.....	105
2.5.5 Gestión de riesgos	106
2.5.6 Plan de implementación	107
2.5.7 Indicadores clave de desempeño (KPIs)	108
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	109
3.1 Gestión del Proyecto	109
3.2 Análisis Energético	111
3.3 Análisis Económico	113
3.3.1 Análisis Económico	113
3.3.2 Retorno sobre la Inversión (ROI).....	116
3.3.3 Período de Recuperación de la Inversión (Payback).....	117
3.4 Evaluación de Escenarios.....	119
3.4.1 Escenario Base	119
3.4.2 Escenario Conservador.....	119
3.4.3 Escenario Optimista	120
3.4.4 Síntesis Comparativa de Escenarios.....	121
3.5 Discusión de Resultados.....	122
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y APLICACIONES	126
4.1. Conclusiones generales	126

4.2. Conclusiones específicas.....	127
4.2.1. Análisis del cumplimiento de los objetivos de la investigación.....	127
4.2.2. Contribución a la gestión empresarial.....	129
4.2.3. Contribución a nivel académico.....	131
4.2.4. Contribución a nivel personal	131
4.3. Limitaciones a la Investigación.....	132
5. BIBLIOGRAFÍA.....	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Diferenciación entre inversión técnica inicial y presupuesto integral del proyecto...	60
Tabla 2	Parámetros técnicos y económicos para la estimación del ahorro.....	61
Tabla 3	Estimación del ahorro económico anual.....	61
Tabla 4	Supuestos financieros de la inversión técnica inicial.	64
Tabla 5	Flujo de caja de la inversión técnica inicial.....	65
Tabla 6	Flujo de caja del proyecto integral a cinco años.....	66
Tabla 7	Criterios utilizados para el cálculo del ROI.....	68
Tabla 8	Cálculo del ROI de la inversión técnica inicial	70
Tabla 9	Cálculo del ROI integral del proyecto a cinco años	72
Tabla 10	Comparación del ROI de la inversión inicial y de la inversión integral.....	73
Tabla 11	Criterios utilizados para el cálculo del periodo de recuperación	75
Tabla 12	Cálculo del Payback de la inversión técnica inicial	77
Tabla 13	Cálculo del Payback del proyecto integral	78
Tabla 14	Comparación del periodo de recuperación técnico e integral.....	79
Tabla 15	Supuestos considerados para el análisis de escenarios	82
Tabla 16	Resultados financieros del escenario esperado del proyecto.....	84
Tabla 17	Resultados financieros del escenario conservador por reducción de horas de operación	86
Tabla 18	Resultados financieros del escenario optimista por incremento del costo energético.. 88	
Tabla 19	Comparación de escenarios financieros del proyecto.....	89
Tabla 20	Información general del proyecto.....	92
Tabla 21	Estructura organizacional	93
Tabla 22	Cronograma general del proyecto.....	103
Tabla 23	Distribución general del presupuesto.....	104
Tabla 24	Riesgos principales identificados	105
Tabla 25	KPIs principales del proyecto.....	107
Tabla 26	Resumen del balance energético del sistema de recuperación	110
Tabla 27	Estimación del ahorro económico anual.....	112
Tabla 28	Flujo de caja acumulado — Inversión técnica inicial (USD 53.200).....	113
Tabla 29	Flujo de caja acumulado — Presupuesto integral del proyecto (USD 125.000)....	114

Tabla 30 Comparación del ROI técnico e integral	115
Tabla 31 Comparación del período de recuperación técnico e integral.....	117
Tabla 32 Comparación de escenarios financieros del proyecto.....	120

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

1.1 Introducción

La eficiencia energética es un aspecto vital para la competitividad en industrias con procesos que demandan alta energía térmica. En la industria de alimentación balanceada, procesos como la extrusión requieren control específico sobre la temperatura, presión y humedad. Esto es necesario para lograr atributos físicos y nutritivos particulares del producto final. En este caso, el proceso de extrusión implica el uso de vapor industrial para el acondicionamiento térmico de la mezcla y el calentamiento del agua del proceso. Sin embargo, esto conduce a una pérdida de parte de la energía suministrada en forma de condensado caliente que, en la mayoría de procesos térmicos, se devuelve directamente al sistema general de retorno de condensados.

El enfoque del análisis está en el potencial de mejorar el proceso de extrusión para minimizar el consumo de vapor de reposición y reducir también el consumo de energía térmica y, además, disminuir el costo operativo del proceso. El sistema propuesto integra un tanque de vaporización instantánea y un intercambiador de calor para captar el calor que está en el condensado caliente y transferirlo al agua del proceso antes de su introducción en el extrusor. (Laire, Fiallos, & Aguilera, 2018)

En contexto, el estudio tiene como objetivo determinar la viabilidad técnica, económica y de riesgo de la implementación de un sistema de recuperación de calor residual durante los procesos de extrusión de alimentos balanceados. Para ello, se analizará el estado

actual de la energía del proceso, la energía térmica que potencialmente se podría recuperar, el sistema de recuperación propuesto que incluye un tanque de vaporización instantánea y un intercambiador de calor, la energía que se espera ahorrar, la seguridad general del proyecto y los riesgos económicos que el proyecto puede causar. (ISO 50001, 2018)

1.2 Antecedentes

En las instalaciones industriales donde el vapor se emplea como portador de calor, el condensado producido contiene una parte importante de energía residual. La reintegración directa de este condensado a los esquemas de recuperación sin tratamiento previo trae aparejado un incremento en el consumo específico y, por ende, en los costos operativos de la planta. En este sentido, la recuperación del condensado del sistema de vapor es una oportunidad estratégica para evaluar la optimización térmica, lo cual permite incrementar la eficiencia del proceso productivo y mitigar la demanda de energía primaria.

En el proceso de la extrusión para la elaboración de raciones en forma de pellets, resulta indispensable emplear vapor, ya que cumple la función de condicionar el producto, gelatinizar el almidón y disminuir la carga microbiológica. Esta forma de utilización intensiva genera un flujo de condensado a alta temperatura que transporta calor sensible residual, el cual representa un recurso técnico explotable para la recuperación energética y para la mejora del desempeño térmico global del sistema.

El diagnóstico actual sobre el sistema de extrusión se evidencia que el flujo de condensado generado por la línea productiva posee un potencial técnico para la recuperación energética. En las condiciones operativas estándar, el condensado ingresa al tanque de

vaporización con un caudal de 6.000 kg/h a una temperatura de 170,3 °C y una presión manométrica de 7 barg, transportando una entalpía específica de 720,49 kJ/kg. La descarga de presión en el tanque a presión de 3,31 barg provoca una evaporación parcial del fluido. El fluido conduce a un condensado residual que se desplaza del sistema a una temperatura de 146,4 °C, con una entalpía específica de 617 kJ/kg y un caudal estimado de 5.707 kg/h.

La evaluación técnica realizada pone de manifiesto una oportunidad estratégica para la utilización del calor residual. La implementación de un sistema de transferencia térmica que emplee la energía derivada del condensado residual para incrementar la temperatura del agua de proceso en la extrusora. Esta estrategia facilita la mitigación de la demanda de vapor de gases en superficie y la optimización del rendimiento térmico a nivel global. Su garantía es una correcta y eficaz administración de los recursos energéticos disponibles dentro del sistema productivo.

Según el enfoque económico, se configura el marco analítico necesario para llevar a cabo una evaluación meticulosa del potencial técnico del sistema. Se incorpora la factibilidad económica y la administración de la incertidumbre intrínseca a su puesta en marcha operativa.

1.3 Descripción del problema

En el marco de la cadena de producción de alimento balanceado, el proceso de extrusión requiere una intensidad térmica significativa para asegurar las condiciones reológicas y sanitarias necesarias. En el sistema analizado, el vapor industrial se desempeña

como el vector energético primordial, transfiriendo su entalpía al proceso para su posterior conversión en condensado bajo condiciones críticas de temperatura y presión.

La configuración del proceso de producción pone de manifiesto una ineficiencia estructural con la porción considerable de la energía térmica proporcionada que no es recuperada. El condensado residual se conduce al sistema de retorno sin una utilización previa de su calor. Esta deficiencia técnica lleva a un incremento en la demanda de vapor de reposición y a un aumento en el consumo específico de combustible. La consecuencia es el incremento de los costos operativos vinculados al calentamiento del agua del proceso (Marquez et al., 2020).

En el escenario técnico probable a la implementación de la mejora térmica, el agua destinada al extrusor ingresa a una temperatura cercana a 30 °C. Esta temperatura es necesaria para un precalentamiento intensivo que cumple con los parámetros operativos establecidos. El diagnóstico energético llevado a cabo corroboró que el condensado residual exhibía un potencial térmico explotable, estableciendo que su descarga directa constituía una pérdida estratégica de energía.

Las consecuencias son estrictamente energéticas, la falta de recuperación térmica provoca una discrepancia en la competitividad operativa del sistema. La intensificación de la dependencia de fuentes externas de energía para el correcto ciclo de operación. En un contexto industrial enfocado en la sostenibilidad y la minimización de costos, la utilización inadecuada del calor residual disponible representa una ineficiencia tanto técnica como económica que pone en riesgo el rendimiento financiero de la cadena de producción.

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Ante esta problemática, se ha propuesto la integración de sistemas de recuperación de calor residual mediante la incorporación de un tanque de precalentamiento y un intercambiador de calor especializado. Esta solución técnica permite elevar la temperatura del agua de proceso en la succión de la extrusora, optimizando la eficiencia térmica global y mitigando el consumo energético total de la unidad productiva (España, 2021).

1.4 Formulación del problema

A partir de la problemática expuesta, se deriva la interrogante fundamental que orienta el presente análisis de investigación (CORDIS, 2021):

¿De qué manera la integración técnica y operativa de un sistema de recuperación de calor residual, derivado del condensado a alta temperatura en el proceso de extrusión de alimento balanceado, determina la viabilidad económica y la optimización de la eficiencia energética, mitigando consecuentemente los costos operativos del sistema?

Interrogantes específicas de la investigación:

- a) ¿Cuáles son los parámetros termodinámicos y las condiciones energéticas basales del proceso de extrusión que permiten identificar fuentes explotables de calor residual?
- b) ¿Cuál es el potencial de energía térmica disponible en el flujo de condensado caliente del proceso de extrusión susceptible de ser recuperado bajo criterios técnicos?

- c) ¿Qué configuración de ingeniería o solución técnica resulta idónea para ejecutar la recuperación de energía residual y su transferencia eficiente hacia el agua de proceso?
- d) ¿Cuál es el ahorro económico proyectado que puede derivarse de la implementación estratégica de la recuperación de calor residual?
- e) ¿Cuáles son los riesgos críticos asociados al sistema de recuperación de calor en términos de diseño técnico, desempeño económico y estabilidad operativa?

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivos generales*

El objetivo central del presente estudio consiste en determinar el potencial técnico y la viabilidad del sistema de recuperación de condensado a alta temperatura como mecanismo para optimizar la eficiencia energética y mitigar los costos operativos en las líneas de extrusión de alimento balanceado. Este análisis integra la recuperación de calor residual bajo criterios técnicos, económicos y operativos, asegurando una gestión sostenible de los recursos térmicos disponibles dentro del proceso industrial

1.5.2 *Objetivos específicos*

Diagnosticar la configuración basal de los procesos energéticos de extrusión para la identificación de fuentes de calor residual con potencial técnico explotable.

Analizar el comportamiento termodinámico del condensado y cuantificar el potencial térmico recuperable mediante la ejecución de balances de energía y masa.

Desarrollar un diseño conceptual de la solución técnica, integrando el mecanismo de un tanque de vaporización flash y un sistema de intercambio de calor para el precalentamiento del agua de proceso.

Realizar una estimación del ahorro energético previsto y valoración del efecto de la implementación del sistema propuesto en el rendimiento térmico global de la unidad productiva.

Determinar la factibilidad financiera del proyecto a través de la evaluación de los flujos de activos, la proyección del retorno de inversión y la determinación del período de recuperación del capital.

Se llevará a cabo una valoración exhaustiva del potencial técnico, económico y operativo del sistema de recuperación térmica, incorporando la administración de riesgos e incertidumbre.

1.6 Justificación

La finalidad primordial de este estudio radica en establecer la factibilidad de implementar estrategias de eficiencia energética en procesos industriales de alta intensidad térmica, particularmente en la línea de extrusión de alimento balanceado. En el sistema actual, el vapor industrial desempeña el papel principal de vector energético. La producción

de flujos residuales cuyo desaprovechamiento representa una oportunidad estratégica para la optimización del rendimiento térmico a nivel global. La falta de innovación para mecanismos de recuperación para este calor residual conduce a un aumento en el consumo específico. El no tener un plan de aprovechamiento desencadena una escalada en los costos operativos y una merma en la eficiencia estructural del sistema.

Desde el punto técnico, la justificación del estudio radica en la identificación del potencial recurso del condensado a alta temperatura y sus derivados al proceso de producción. Se plantea la incorporación de una solución de ingeniería que integra un mecanismo de almacenamiento de calor con un sistema de intercambio térmico. Se concibe para capturar la entalpía del condensado y transferirla de manera eficiente hacia el precalentamiento del agua de proceso. Este planteamiento facilita la atenuación de la demanda de energía primaria y optimiza la administración de los recursos térmicos disponibles dentro de la unidad productiva.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad y la responsabilidad medioambiental, la ejecución de este proyecto garantiza una administración eficaz de la energía existente, disminuyendo la dependencia de vapor fresco y atenuando el consumo de combustible adicional. Esta metodología facilita la reducción de la carga sobre los sistemas de generación térmica y la mitigación indirecta del impacto ambiental vinculado al empleo de recursos energéticos primarios, en consonancia con los objetivos de optimización y conservación del medio ambiente (CORDIS, 2021; España, 2021).

Este estudio se basa en la rigurosidad académica, incorporando principios de análisis técnico, evaluación económica y gestión de riesgos para construir un análisis holístico. Este marco metodológico no sólo mitiga la incertidumbre intrínseca a la implementación operativa, sino que además ofrece un fundamento estructurado y corroborable para el proceso de toma de decisiones estratégicas en los dominios técnico, económico y operativo (ISO 50001, 2018).

En conclusión, desde una perspectiva corporativa, esta investigación establece un paradigma para las organizaciones que aspiran a la optimización de sus sistemas térmicos. El modelo de evaluación elaborado posibilita la detección de oportunidades de optimización en instalaciones industriales análogas. Instalaciones que funcionan con sistemas de vapor de alta eficiencia y flujos de condensado residual, fomentando así el desarrollo sostenible y la competitividad en el sector.

1.7 Alcance y delimitación

La finalidad principal de este estudio radica en establecer el potencial técnico y la factibilidad del sistema de recuperación de calor residual en una línea de extrusión de alimento balanceado con una capacidad de procesamiento de 12 toneladas métricas por hora. La investigación se centra en la reintegración estratégica de la energía térmica vinculada al flujo de condensado caliente procedente del sistema de vapor, evaluando su viabilidad técnica, económica y operativa dentro del marco del proceso productivo industrial.

Para establecer la factibilidad técnica, es esencial llevar a cabo un diagnóstico energético meticuloso que facilite la identificación de las fuentes de condensado residual y

llevar a cabo el análisis termodinámico necesario para cuantificar el potencial de vapor flash y el remanente térmico. Además, se prevé la implementación de balances de energía y masa en el intercambiador de calor con el objetivo de determinar la entalpía recuperable. La propuesta técnica incorpora un tanque de vaporización flash y un sistema de intercambio térmico, garantizando una administración eficaz de los recursos conforme a los estándares de optimización energética (ISO 50001, 2018).

Desde el prisma de la viabilidad económica, el estudio incorpora la cuantificación del ahorro energético anticipado y su repercusión en la disminución de los costos operativos. Se elabora un modelo financiero que incorpora la proyección de flujos de efectivo y la determinación de indicadores de rendimiento tales como la rentabilidad de la inversión y el periodo de recuperación del capital. (Villacorta, 2021).

Finalmente, la evaluación de la factibilidad operativa comprende la identificación y gestión de riesgos críticos asociados al diseño técnico, el desempeño económico y la estabilidad en la implementación. Se analiza la continuidad operativa de la extrusora y la capacidad de control del sistema de recuperación térmica, asegurando que la integración tecnológica mantenga la estabilidad de la unidad productiva y la eficiencia del proceso global.

Es importante señalar que el alcance de este estudio no abarca la construcción física ni la implementación del sistema térmico, ni la realización de simulaciones computarizadas complejas ni la ingeniería de detalle para la manufactura de equipos. La investigación se

circunscribe estrictamente a una valoración de la prefactibilidad técnica, económica y de riesgos, basada en el análisis termodinámico de los datos operativos existentes y en la implementación de parámetros financieros previamente definidos.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1 Marco teórico

El presente marco teórico reúne los fundamentos conceptuales relacionados con dirección de proyectos, eficiencia energética industrial, aprovechamiento de calor residual, procesos de extrusión y secado, evaluación financiera y gestión de riesgos, los cuales permiten comprender el contexto técnico y metodológico de la propuesta planteada.

2.1.1 Dirección de proyectos

La dirección o gestión de proyectos integra conocimientos, herramientas, metodologías y habilidades orientadas al cumplimiento de objetivos específicos dentro de restricciones relacionadas con alcance, tiempo, costo, calidad y recursos. Según el Project Management Institute (PMI, 2021), la gestión de proyectos permite organizar y controlar actividades de manera estructurada, facilitando la toma de decisiones y el cumplimiento de los objetivos establecidos.

En proyectos industriales enfocados en eficiencia energética, la dirección de proyectos permite integrar análisis técnicos, económicos y operativos bajo una metodología común, asegurando coherencia entre los diferentes componentes del estudio. Asimismo, facilita la organización de las actividades, el seguimiento de la información y la administración de los riesgos asociados al desarrollo del proyecto.

Dentro del presente estudio, la dirección de proyectos permite coordinar los análisis relacionados con recuperación térmica, evaluación energética, viabilidad financiera y riesgos operativos asociados al aprovechamiento de calor residual en procesos de extrusión de alimento balanceado.

2.1.2 Eficiencia energética industrial

La eficiencia energética industrial se refiere al uso optimizado de la energía dentro de los procesos productivos, buscando reducir pérdidas energéticas y maximizar el aprovechamiento de los recursos disponibles sin afectar la continuidad operativa ni la calidad del proceso.

En los sistemas industriales, una parte importante del consumo energético está asociada a procesos térmicos, calentamiento, generación de vapor y secado. Por esta razón, la implementación de estrategias orientadas al ahorro energético y recuperación de calor residual representa una alternativa importante para mejorar la competitividad y reducir costos operativos.

El incremento de los costos asociados al consumo de energía, sumado al interés de las industrias por mejorar la eficiencia de sus procesos y avanzar hacia modelos de producción más sostenibles, ha promovido la implementación de alternativas orientadas al aprovechamiento de la energía térmica disponible. En este sentido, la eficiencia energética no solo contribuye a reducir los costos de operación, sino que también favorece un mejor

desempeño de los procesos productivos y disminuye los efectos ambientales derivados del consumo de recursos energéticos.

Dentro de la presente investigación, la eficiencia energética se aborda mediante el aprovechamiento del calor residual proveniente de las etapas de extrusión y secado, con el fin de disminuir las pérdidas de energía y mejorar el desempeño energético del sistema.

2.1.3 Aprovechamiento de calor residual

Se denomina calor residual a la energía térmica disponible después de un proceso industrial que no es aprovechada dentro del sistema y que, por lo general, se disipa al ambiente a través de gases calientes, condensados, vapor flash u otros mecanismos de transferencia de calor.

El aprovechamiento de calor residual busca recuperar parte de esta energía para reutilizarla en otros procesos, reduciendo el consumo energético total y mejorando la eficiencia térmica del sistema. Este tipo de soluciones son ampliamente utilizadas en industrias que manejan procesos térmicos continuos debido a que permiten disminuir costos operativos y optimizar el uso de recursos energéticos.

Dentro de los sistemas industriales que utilizan vapor, una de las principales oportunidades de recuperación energética corresponde al aprovechamiento de condensados calientes y vapor flash. Cuando el condensado es descargado desde una presión elevada hacia

una presión menor, parte de su energía térmica se transforma nuevamente en vapor, fenómeno conocido como generación de vapor flash.

Para el aprovechamiento de esta energía se emplean equipos como tanques flash e intercambiadores de calor, los cuales permiten reutilizar el calor recuperado en procesos de calentamiento o precalentamiento de fluidos.

En el presente proyecto, el análisis se enfoca en evaluar la viabilidad técnica y económica de recuperar el calor residual generado en el proceso de extrusión de alimento balanceado mediante el aprovechamiento de vapor flash y condensados del sistema.

2.1.4 Procesos de extrusión y secado

La extrusión es un proceso industrial utilizado para transformar materias primas mediante la aplicación combinada de presión, temperatura y energía mecánica. En la industria de alimento balanceado, este proceso permite mejorar características físicas y nutricionales del producto, además de facilitar su conformación y estabilidad.

Durante el proceso de extrusión se generan elevadas temperaturas y un importante consumo de vapor debido a los requerimientos térmicos necesarios para el acondicionamiento y cocción del producto. Posteriormente, el material extruido pasa por una etapa de secado destinada a reducir el contenido de humedad y garantizar condiciones adecuadas de almacenamiento y conservación.

Los sistemas de secado representan una de las etapas de mayor consumo energético dentro del proceso debido al uso continuo de aire caliente y vapor. Por esta razón, el análisis de recuperación energética en procesos de extrusión suele enfocarse en identificar oportunidades de reutilización de calor residual para apoyar etapas térmicas del sistema.

En el presente estudio, el proceso de extrusión y secado constituye el punto central para la identificación de pérdidas energéticas y para el análisis de alternativas de recuperación de calor residual orientadas a mejorar la eficiencia energética del sistema.

2.1.5 Evaluación financiera de proyectos

La evaluación financiera de proyectos tiene como finalidad determinar la conveniencia económica de una inversión, considerando aspectos como los costos, los beneficios esperados, los ahorros potenciales y la rentabilidad del proyecto. Este análisis constituye un apoyo para la toma de decisiones, especialmente en iniciativas industriales orientadas a mejorar la eficiencia energética y optimizar el desempeño de los procesos.

Para evaluar la viabilidad financiera de un proyecto se emplean indicadores como el Retorno de la Inversión (ROI), el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión o Payback, los cuales permiten analizar la rentabilidad y el tiempo estimado para recuperar la inversión realizada.

El análisis financiero permite identificar si los beneficios económicos generados por la implementación de una solución justifican la inversión requerida y si el proyecto resulta sostenible en el tiempo.

En proyectos de recuperación energética, los ahorros económicos suelen relacionarse con la disminución del consumo de combustible, reducción del uso de vapor y optimización de recursos energéticos dentro de los procesos productivos.

Dentro de la presente investigación, el componente financiero permitió valorar los beneficios económicos que puede generar el aprovechamiento del calor residual, considerando tanto la inversión necesaria como los ahorros esperados. Este análisis constituye un criterio para determinar si la propuesta resulta conveniente para su implementación desde una perspectiva económica y operativa.

2.1.6 Gestión de riesgos

La gestión de riesgos forma parte del proceso de planificación del proyecto y tiene como propósito anticipar situaciones que puedan comprometer el cumplimiento de los resultados esperados. Para ello, se identifican los posibles factores de riesgo, se analiza su impacto y se establecen medidas orientadas a prevenirlos o minimizar sus consecuencias durante la ejecución del proyecto.

En proyectos de carácter industrial, los riesgos pueden originarse por condiciones técnicas, operativas, económicas, financieras o propias del proceso de implementación.

Evaluarlos desde las etapas iniciales facilita la definición de acciones preventivas y reduce la probabilidad de que estos afecten el desempeño del sistema o el logro de los objetivos planteados.

Dentro de proyectos de eficiencia energética, algunos riesgos frecuentes se relacionan con variaciones en las condiciones de operación, limitaciones técnicas de integración, costos de implementación y continuidad operativa.

La gestión de riesgos también permite evaluar el nivel de incertidumbre asociado a los resultados esperados del proyecto y fortalecer la confiabilidad de los análisis desarrollados.

En el presente estudio, la gestión de riesgos se orienta a identificar posibles limitaciones técnicas, económicas y operativas que puedan influir sobre la viabilidad del aprovechamiento de calor residual dentro del proceso de extrusión de alimento balanceado.

2.2 Marco metodológico

El marco metodológico define el enfoque utilizado para desarrollar la investigación y sustenta la forma en que fueron recopilados, analizados e interpretados los datos técnicos y financieros del proyecto.

La metodología empleada se orienta al análisis de viabilidad técnica, energética, económica y de riesgos del aprovechamiento de calor residual generado durante el proceso de extrusión de alimento balanceado, considerando parámetros operativos reales y criterios de eficiencia energética industrial.

2.2.1 Tipo de investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado, ya que se orienta a dar respuesta a una problemática identificada en un proceso industrial mediante la evaluación de una alternativa para el aprovechamiento del calor residual.

Por otra parte, el estudio adopta un enfoque cuantitativo, debido a que la evaluación de la propuesta se fundamenta en el análisis de variables medibles, como temperatura, presión, caudal, consumo de energía, recuperación térmica y ahorro económico, las cuales permiten determinar la viabilidad de la solución planteada.

2.2.2 Diseño de investigación

La investigación se desarrolló mediante un diseño no experimental, ya que el análisis se realizó a partir de las condiciones reales de operación del proceso, sin intervenir ni modificar las variables evaluadas. La información utilizada provino de los parámetros operativos existentes, los cuales sirvieron de base para el desarrollo del estudio.

De igual manera, el estudio presenta un alcance descriptivo y analítico, ya que se describen las condiciones energéticas del proceso y posteriormente se analizan los resultados técnicos y económicos asociados al aprovechamiento de calor residual.

2.2.3 Métodos de investigación

Para el desarrollo de la investigación se aplicaron métodos de análisis técnico, energético y financiero, los cuales permitieron evaluar de manera integral la viabilidad de la propuesta planteada

Desde el punto de vista técnico, se realizó un análisis termodinámico del sistema para identificar oportunidades de recuperación de calor residual mediante el aprovechamiento de vapor flash y condensados.

Posteriormente, se desarrolló un análisis energético orientado a cuantificar la energía recuperable y evaluar el impacto sobre el consumo energético del proceso.

Finalmente, se efectuó una evaluación financiera utilizando indicadores económicos que permitieron determinar la viabilidad de implementación de la solución propuesta.

2.2.4 Técnicas de recolección de datos

La información utilizada en la presente investigación se obtuvo mediante la revisión de documentación técnica, el análisis de los parámetros de operación del proceso y la recopilación de datos necesarios para evaluar el comportamiento energético del sistema industrial.

Entre los principales datos analizados se consideraron temperaturas, presiones, caudales, consumo energético, condiciones operativas del sistema y parámetros relacionados con la generación de vapor y condensados.

Además, se utilizaron registros técnicos y criterios operativos del proceso para establecer las condiciones de funcionamiento necesarias para el análisis de recuperación energética.

2.2.5 Variables de estudio

Las variables analizadas dentro del proyecto se clasifican en variables técnicas y variables financieras.

Entre las variables técnicas consideradas se encuentran:

- Temperatura del sistema.
- Presión de operación.
- Caudal de condensado.
- Energía térmica recuperada.
- Consumo energético.
- Eficiencia térmica.
- Por otra parte, las variables financieras incluyen:
- Inversión requerida.
- Ahorro energético estimado.
- Retorno de inversión (ROI).
- Período de recuperación de inversión.
- Costos operativos.

Estas variables permitieron evaluar de manera integral la viabilidad técnica y económica de la solución propuesta.

2.2.6 Línea base energética

La línea base energética corresponde a las condiciones iniciales de operación del sistema antes de la implementación de la propuesta de aprovechamiento de calor residual.

Esta línea base permite establecer un punto de referencia para comparar el comportamiento energético del proceso y cuantificar los posibles ahorros generados mediante la recuperación térmica.

Para su definición se consideraron parámetros relacionados con consumo de vapor, generación de condensados, temperaturas de operación y consumo energético asociado al proceso de extrusión y secado.

La línea base energética constituye un elemento fundamental para validar técnicamente el impacto de la solución propuesta y sustentar los resultados del análisis de eficiencia energética.

2.2.7 Supuestos técnicos y financieros

Para el desarrollo de la evaluación de viabilidad se establecieron supuestos técnicos y financieros relacionados con las condiciones de operación del sistema y con los parámetros económicos utilizados para el análisis.

Entre los principales supuestos técnicos considerados se encuentran la estabilidad de las condiciones operativas del proceso, continuidad del sistema de vapor, disponibilidad de condensados y comportamiento térmico esperado durante la recuperación energética.

Desde el punto de vista financiero, se consideran supuestos relacionados con costos energéticos, inversión estimada, costos de implementación, tiempo de operación y comportamiento esperado de los ahorros generados.

Estos supuestos permiten establecer condiciones de análisis consistentes y facilitan la evaluación técnica y económica de la solución planteada.

2.3 Desarrollo del Proyecto

2.3.1 Descripción del proceso de extrusión

El proceso de extrusión de alimento balanceado constituye una operación térmica y mecánica utilizada para transformar materias primas en productos con propiedades físicas y nutricionales específicas. Durante este proceso, la mezcla de ingredientes es sometida a condiciones controladas por la presión, temperatura y cizallamiento mecánico dentro del extrusor, permitiendo la gelatinización de almidones, la reducción de carga microbiológica y la confirmación final del producto. Como señala Ruiz (Ruiz, 2003), este tipo de procesamiento térmico de corto tiempo es un estándar en la industria moderna de alimentos balanceados debido a su alta eficiencia y versatilidad.

En el sistema analizado, la línea de extrusión posee una capacidad de producción de 12 t/h de producto terminado, utilizando vapor como fuente principal de energía térmica para el acondicionamiento y calentamiento de procesos. El vapor es transferido al proceso, genera condensado a alta temperatura y presión, el cual es enviado al sistema general de retorno de condensados. El condensado proveniente del proceso presenta condiciones energéticas significativas, con un caudal aproximado de 6000 kg/h, temperatura de 170.3 °C y presión de 7 BAR. Estas condiciones evidencian la existencia de una importante cantidad de energía residual susceptible de recuperación

El desempeño térmico del proceso de extrusión influye directamente sobre la calidad y estabilidad del producto final, debido a que parámetros como temperatura, presión y tiempo de residencia afectan procesos de gelatinización, expansión y reducción microbiológica del alimento balanceado. Por esta razón, el suministro de vapor debe mantenerse bajo condiciones operativas estables para garantizar uniformidad en el acondicionamiento y evitar variaciones en las propiedades físicas del producto.

Desde el punto de vista energético, la extrusión representa una de las etapas de mayor demanda térmica dentro de la línea de producción, principalmente por el consumo continuo de vapor utilizado durante el acondicionamiento previo al extrusor. Esta condición convierte al sistema en una fuente importante de generación de condensados calientes con potencial de aprovechamiento energético.

2.3.2 Diagnóstico energético

En el diagnóstico energético realizado, se evidencia que el proceso de extrusión presenta un consumo térmico asociado al calentamiento del agua del proceso y al uso de vapor industrial. Parte importante de la energía suministrada al sistema es descargada en forma de condensado caliente hacia el retorno general, desaprovechando su potencial térmico. El descarte directo de fluidos sin aprovechamiento de su calor sensible es una de las principales ineficiencias en las plantas térmicas industriales

Las condiciones actuales del condensado muestran un alto contenido energético disponible para recuperación. El condensado generado posee una entalpía aproximada de 720,49 kJ/kg a condiciones antes mencionadas. Previo de implementar el sistema de recuperación, el agua utilizada en el proceso ingresaba a temperaturas cercanas a 30 °C, lo que implicaba un alto requerimiento energético para alcanzar las condiciones térmicas necesarias del proceso de extrusión. Esta situación incrementa el consumo de vapor y los costos operativos asociados al calentamiento.

El análisis energético permitió identificar que el sistema presentaba pérdidas térmicas relevantes debido al envío directo del condensado caliente al tanque de retorno, sin aprovechamiento previo de su calor sensible. Esta condición representa una oportunidad de mejora orientada a incrementar la transferencia de calor del proceso y reducir el consumo específico de energía. Desde la perspectiva operativa, el diagnóstico también evidencia que la recuperación de calor residual puede implementarse sin alterarse significativamente la

continuidad del proceso productivo, aprovechando infraestructura térmica ya existente y reutilizando energía actualmente desperdiciada.

Bajo condiciones industriales de operación continua, este tipo de pérdidas representa un incremento acumulativo en el consumo energético y en los costos asociados a generación térmica. Debido a ello, la recuperación parcial de esta energía residual constituye una alternativa técnicamente viable para optimizar el rendimiento energético del proceso sin alterar elocuentemente la operación principal de la unidad de extrusión.

2.3.3 Identificación de calor residual

La principal fuente de calor residual identificada en el proceso corresponde al condensado caliente generado por el sistema de vapor de la línea de extrusión. Este condensado posee un elevado contenido energético debido a las variaciones de temperatura y presión según los parámetros de funcionamiento del sistema.

Para determinar el potencial de recuperación energética del sistema, se realiza un análisis termodinámico del condensado proveniente del proceso de extrusión al reducir su presión mediante un tanque flash. La caída repentina de presión genera una vaporización instantánea basada en el principio de expansión entálpica irreversible (Shapiro, 2015).

Datos iniciales del sistema

El condensado proveniente del sistema presenta las siguientes condiciones operativas, extraídas de las tablas de saturación de vapor estándar (Yunus A. Cengel, 2019):

- Caudal de condensado. 6000 kg/h
- Presión inicial: 7 BAR
- Temperatura inicial: 170.3 °C
- Entalpía del condensado a 7 BAR (h_1): 720.49 kJ/kg
- Presión final tanque flash: 3.31 BAR
- Temperatura de saturación a 3.31 BAR: 146.4 °C
- Entalpía del condensado a 3.31 BAR (h_2): 720.49 kJ/kg
- Calor latente de evaporación a 3.31 BAR (h_{fg}): 2.114 kJ/Kg

Cálculo del porcentaje de vapor flash generado

Cuando el condensado pasa desde una presión alta hacia una presión menor, parte de su energía sensible se transforma instantáneamente en vapor flash. El porcentaje de vapor flash se determina mediante la ecuación estándar de balance de energía para procesos de flasheo (Limited, 2008):

$$\%Flash = \frac{h_1 - h_2}{h_{fg}} \times 100$$

Donde:

- h_1 = entalpía del condensado antes del tanque flash
- h_2 = entalpía del condensado después del tanque flash
- h_{fg} = calor latente de evaporación a la presión final

Sustituyendo los valores analizados:

$$\%Flash = \frac{720.49 - 617}{2114} \times 100$$

Calculando la diferencia de entalpías:

$$720.49 - 617 = 103.49 \text{ kJ/kg}$$

Luego dividiendo por el calor latente:

$$\%Flash = \frac{103.49}{2114} \times 100$$

Resultado:

$$\%Flash = 4.89\%$$

Cálculo del caudal de vapor flash generado

El caudal de vapor flash se calcula multiplicando el porcentaje de flash generado por el flujo total de condensado:

La ecuación utilizada es:

$$m_{flash} = 6000 \times 0.0489$$

Desarrollando:

$$m_{flash} = 293.4 \text{ kg/h}$$

Cálculo del condensado remanente

El condensado líquido remanente corresponde al flujo que no se evapora en el tanque flash.

La ecuación aplicada es:

$$m_{cond} = 6000 - 293$$

Resultado:

$$m_{cond} = 5707 \text{ kg/h}$$

Este flujo de condensado continúa hacia el intercambiador de calor.

Energía disponible en el condensado remanente

El condensado remanente conserva una temperatura elevada y todavía posee energía térmica aprovechable. Tras el proceso de Flasheo, conserva una entalpía cercana a 617 kJ/kg a 146,4 °C.

La energía térmica total respecto al estado de referencia antes de ingresar al intercambiador se calcula mediante la relación fundamental de flujo entálpico:

$$Q = 5707 \times 617$$

Resultado:

$$Q = 3.521.219 \text{ kJ/h}$$

Este valor representa la energía térmica total contenida en el condensado antes de ingresar al intercambiador de calor.

El análisis termodinámico realizado demuestra que el condensado generado en el proceso conserva un contenido energético considerable incluso después del proceso de flasheo. Esto permite identificar dos fuentes potenciales de recuperación térmica dentro del sistema: el vapor flash generado por la reducción de presión y el calor sensible contenido en el condensado remanente.

Desde el punto de vista energético, el aprovechamiento simultáneo de ambas corrientes permite incrementar el nivel de recuperación térmica y mejorar la eficiencia global del sistema. El vapor flash puede ser reutilizado en procesos de calentamiento de menor presión, mientras que el condensado remanente conserva condiciones adecuadas para procesos de intercambio térmico indirecto.

La identificación de estas corrientes energéticas constituye un elemento importante para definir la viabilidad técnica del sistema de recuperación y establecer criterios adecuados para la integración térmica dentro del proceso industrial.

2.3.4 Balance energético

El balance energético de sistema se realizó considerando la energía cedida por el condensado caliente y la energía absorbida por el agua de proceso en el intercambiador de calor, siguiendo los principios de la primera ley de la termodinámica para sistemas abiertos de flujo estable (Yunus A. Cengel, 2019). Dentro del intercambiador, el condensado reduce su entalpía desde 617 kJ/kg hasta aproximadamente 406.45kJ/kg.

La energía entregada por el condensado Q_{cedida} , Se determina mediante la diferencia de entalpías entre la entrada y salida del intercambiador.

$$Q = m(h_1 - h_2)$$

$$Q = 5.707(617 - 406,45)$$

Desarrollando la diferencia térmica y multiplicado por la masa se obtiene:

$$Q_{cedida} = 1.201.009 \text{ kJ/h}$$

Por otra parte según los registros operativos, la energía absorbida por el agua del proceso se calcula mediante:

$$Q = m(h_1 - h_2)$$

$$Q = 5.500(355.95 - 138.29)$$

$$Q_{absorbida} = 1.197.130 \text{ kJ/h}$$

Para expresar el resultado de la potencia térmica aprovechada en el intercambiador, se divide el flujo de energía entre los segundos de una hora, por lo tanto:

$$P = \frac{1201009}{3600} = 333.6 \text{ kW}$$

El comportamiento del intercambiador de calor evidencia una transferencia térmica eficiente entre el condensado y el agua de proceso, permitiendo recuperar una parte importante de la energía residual disponible en el sistema. La proximidad entre la energía cedida y absorbida demuestra que las pérdidas térmicas dentro del proceso de intercambio son relativamente bajas bajo las condiciones operativas analizadas.

El análisis energético también permite verificar que la recuperación térmica contribuye directamente a disminuir la carga requerida en el sistema principal de generación de vapor. Como resultado, se reduce el consumo específico de energía asociado al calentamiento del agua de proceso y se mejora el aprovechamiento energético global de la línea de extrusión.

Desde una perspectiva operacional, el balance energético confirma que el sistema propuesto puede integrarse al proceso existente manteniendo estabilidad térmica y continuidad operativa durante condiciones normales de producción.

La diferencia entre la energía cedida por el condensado y la absorbida por el agua de procesos es menor a 1% lo que valida la coherencia del balance térmico y confirma la consistencia de los datos operativos analizados. El análisis demuestra que el sistema de recuperación permite transferir una cantidad significativa de energía residual hacia el agua de proceso, disminuyendo directamente el requerimiento de calentamiento adicional mediante vapor fresco o combustible.

2.3.5 Propuesta de recuperación de energía

La propuesta técnica planteada consiste en implementar un sistema de recuperación de energía térmica basado en el aprovechamiento del condensado caliente generado en el proceso de extrusión. El sistema propuesto integra un tanque flash y un intercambiador de calor como elementos principales de recuperación energética. Este esquema combinado permite aprovechar tanto el potencial energético del vapor flash generado por reducción de presión como el calor sensible contenido en el condensado remanente.

El tanque flash tiene la función de reducir la presión del condensado proveniente del proceso, permitiendo la generación de vapor flash reutilizable y separando el condensado remanente. Posteriormente, el condensado es dirigido hacia el intercambiador de calor, donde transfiere su energía térmica al agua de proceso. El intercambiador opera bajo un esquema de

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

recuperación indirecta, aprovechando el calor sensible del condensado para precalentar el agua utilizada en la extrusora.

Mediante este sistema, el agua incrementa su temperatura desde aproximadamente 33 °C hasta una temperatura cercana a 85 °C antes de ingresar al sistema de extrusión. El precalentamiento del agua reduce la demanda térmica del sistema principal y mejora el aprovechamiento energético general del proceso.

El comportamiento térmico del sistema depende de variables operativas relacionadas con la estabilidad de producción, variaciones de carga de la extrusora y continuidad del suministro de vapor. Durante condiciones normales de operación, el caudal de condensado presenta fluctuaciones asociadas a cambios en la demanda térmica del proceso, lo que influye directamente sobre la cantidad de energía recuperable disponible.

Desde el punto de vista operativo, la implementación del sistema de recuperación requiere mantener condiciones estables de transferencia térmica para evitar variaciones significativas de temperatura en el agua precalentada. Para ello, es importante considerar el equilibrio entre el caudal de condensado, el flujo operativo del proceso y el rendimiento del intercambiador de calor.

La reutilización de condensados calientes también permite disminuir parcialmente los choques térmicos dentro del sistema de alimentación de agua, reduciendo esfuerzos asociados

a expansión térmica en tuberías y equipos. Esto contribuye a mejorar la estabilidad operativa y favorecer la vida útil de componentes sometidos a condiciones térmicas variables.

Otro aspecto relevante corresponde al aislamiento térmico de las líneas y equipos involucrados en el sistema de recuperación. La eficiencia global del sistema depende de minimizar pérdidas térmicas en tuberías, tanque flash e intercambiador de calor, debido a que un aislamiento deficiente puede afectar el potencial real de recuperación energética.

La propuesta presenta ventajas operativas relacionadas con la reutilización de infraestructura térmica existente y la posibilidad de integración al sistema actual sin modificaciones críticas en la línea de producción.

La implementación de esta solución permite:

- Reducir el consumo de vapor fresco
- Disminuir el consumo de combustible asociado a generación térmica
- Mejorar la eficiencia energética del proceso
- Reducir pérdidas térmicas hacia el sistema de condensados
- Aprovechar energía residual previamente desperdiciada

La recuperación de calor residual no solo representa una alternativa para reducir costos energéticos, sino también una estrategia orientada a incrementar la sostenibilidad operativa de procesos industriales con alta demanda térmica.

2.3.5.1. Consideraciones operativas para la implementación

Para la implementación del sistema de recuperación térmica es necesario considerar aspectos relacionados con control de presión, manejo de condensados, aislamiento térmico y estabilidad de caudales operativos. El correcto dimensionamiento del tanque flash y del intercambiador de calor resulta fundamental para garantizar un desempeño térmico estable y evitar pérdidas de eficiencia durante variaciones de carga del proceso.

También deben contemplarse aspectos relacionados con mantenimiento preventivo, purga de condensados y monitoreo de temperatura, debido a que la acumulación de incrustaciones o la presencia de gases no condensables puede afectar el desempeño térmico del sistema.

La integración del sistema de recuperación debe realizarse considerando la continuidad operativa de la línea de producción, minimizando intervenciones que puedan afectar el funcionamiento normal del proceso de extrusión.

2.4 Evaluación Técnica y Económica

El propósito de la evaluación técnica y económica de un sistema de recuperación de calor residual consiste en determinar si los beneficios energéticos de la propuesta original justifica la inversión requerida. En los proyectos de este tipo, la decisión económica no se relaciona con un crecimiento en las ventas, sino con una reducción de los costos de operación en razón del aprovechamiento de energía térmica que líneas de producción se hace de forma poco eficiente.

En el análisis, el sistema propuesto recupera el calor del condensado caliente generado durante el proceso de extrusión de alimento balanceado, transfiriendo al agua de proceso y utilizando un intercambiador de calor. Esta recuperación reduce la demanda de vapor fresco o combustible adicional para calentamiento, convirtiendo una pérdida térmica en un ahorro económico que se repite en el tiempo.

Desde la perspectiva financiera, el análisis para una inversión de USD 53.200 el cuál corresponde al equipamiento térmico (ver Tabla 23), genera un ahorro anual aproximado de usd 45.491 y un horizonte de evaluación de cinco años. Estos valores permiten construir el flujo de caja proyectado y calcular los indicadores como el retorno de la inversión o el periodo de recuperación.

Tabla 1

Diferenciación entre inversión técnica inicial y presupuesto integral del proyecto.

Concepto	Valor (USD)	Horizonte	Uso dentro del análisis
Inversión técnica inicial del sistema	53.200	Año 0	Base para el cálculo del ROI y del período de recuperación simple.
Presupuesto integral del proyecto	125.000	5 años	Base para la evaluación integral, gestión y sostenibilidad del proyecto.
Ahorro anual estimado	45.491	Anual	Flujo económico positivo generado por la recuperación energética.
Ahorro acumulado estimado	227.455	5 años	Beneficio económico bruto acumulado durante el horizonte de evaluación.

Fuente: Elaboración propia con base en la evaluación económica y el modelo general del proyecto.

2.4.1 Estimación del ahorro energético

La estimación del ahorro energético se basa en el balance térmico del sistema de recuperación. Con los datos técnicos del proyecto, la energía recuperada se valora en aproximadamente unos 333.6 kW. Esta energía se utiliza para elevar la temperatura del agua de proceso antes de su entrada en la extrusora, disminuyendo el consumo de energía que requiere el sistema principal de calentamiento.

El ahorro horario económico se logra multiplicando la energía recuperada por el coste unitario de la energía. Para ello se toma como coste energético un precio de USD 0.019/MJ.

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

Tabla 2

Parámetros técnicos y económicos para la estimación del ahorro.

Concepto	Valor	Unidad
Energía térmica recuperada	1.197,13	MJ/h
Potencia térmica equivalente	333,6	kW
Costo energético considerado	0,019	USD/MJ
Horas anuales de operación	2.000	h/año

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3

Estimación del ahorro económico anual.

Concepto	Fórmula aplicada	Resultado
Ahorro horario	$1.197,13 \text{ MJ/h} \times 0,019 \text{ USD/MJ}$	USD 22,75/h
Ahorro anual	$\text{USD } 22,75/\text{h} \times 2.000 \text{ h/año}$	USD 45.491/año

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados reflejan que el sistema de recuperación térmica tiene potencial para lograr ahorros económicos anuales relevantes. Desde el punto de vista económico, el ahorro representa el principal beneficio económico del proyecto, ya que disminuye directamente los costes operativos del sistema asociado con el calentamiento del agua de proceso.

2.4.2 Flujo de caja

El flujo de caja es una figura financiera que facilita organizar e identificar los ingresos y los egresos de un proyecto durante un determinado periodo de tiempo. Su utilidad radica en mostrar el comportamiento del dinero en el tiempo, permitiendo observar cuál es el desembolso inicial necesario, qué beneficios económicos se esperan y en qué momento se empieza a recuperar la inversión.

En proyectos de eficiencia energética, el flujo de caja es especialmente importante, dado que el beneficio no proviene necesariamente de nuevas ventas, sino que es derivado de la reducción de costes operativos debido a la disminución del consumo energético.

Desde el punto de vista de la evaluación de proyectos, el flujo de caja permite analizar la capacidad de una inversión para solucionar la problemática de las empresas por el incremento de los costes. Por medio de esta herramienta es posible analizar si la suma de ahorros suficientes para la recuperación de la inversión inicial y obtener resultados positivos del proyecto definido en el horizonte de análisis correspondiente. Por este motivo, el flujo de caja sirve como base para la obtención de indicadores financieros cuya finalidad es analizar el retorno de la inversión y el periodo de recuperación de la misma.

En el análisis financiero del proyecto, se aplica un flujo de caja a fin de analizar el comportamiento económico del sistema de recuperación de calor residual durante un horizonte de cinco años. Los ingresos económicos que contempla el flujo de caja corresponden al ahorro económico generado por la recuperación térmica, estimado en USD

45.491 anual, asumiendo a su vez 2.000 horas de operación al año. Este ahorro representa la disminución del coste energético derivado de la necesidad de calentar el agua de proceso en el extrusor de alimento balanceado.

Para la interpretación, se analiza el flujo de caja en dos niveles, el primero de ellos a partir de la inversión técnica inicial de USD 53.200, que corresponde al valor de la adquisición del equipamiento térmico. El segundo nivel a partir del presupuesto total del proyecto, el cual equivale a la cifra de USD 125.000, según se considera para la duración de los cinco años y está compuesto por costes ampliados correspondientes a la gestión, operación, seguimiento, mantenimiento, control y sostenibilidad del sistema de recuperación térmica.

De esta forma, la aplicación del flujo de caja permite comprobar la recuperación de la inversión técnica, así como validar la relevancia económica total del proyecto. El primer caso permite comprobar si la disminución del consumo energético compensa el coste del sistema de recuperación térmica, y el segundo caso permite analizar si los beneficios acumulados durante el horizonte de cinco años son suficientes para cubrir el presupuesto total del proyecto y obtener un resultado positivo al cierre del periodo de evaluación definido.

Tabla 4

Supuestos financieros de la inversión técnica inicial.

Supuesto financiero	Valor utilizado
Inversión técnica inicial	USD 53.200
Ahorro anual estimado	USD 45.491
Horizonte de evaluación	5 años
Horas de operación anual	2.000 h/año
Flujo anual considerado	Constante
Impuestos, inflación y depreciación	No considerados en esta etapa

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4, describe y muestra los principales supuestos que se utilizaron para elaborar el flujo de caja, pues estos valores permiten distinguir entre la inversión técnica inicial y el presupuesto global del proyecto. Esta distinción es relevante, ya que mediante la inversión técnica se puede evaluar la recuperación directa del sistema, mientras que el presupuesto global se utiliza en el presupuesto del proyecto y su sostenibilidad económica durante los cinco años que dura la evaluación.

Tabla 5

Flujo de caja de la inversión técnica inicial.

Año	Concepto	Flujo de caja (USD)	Flujo acumulado (USD)
0	Inversión técnica inicial	-53.200	-53.200
1	Ahorro energético anual	45.491	-7.709
2	Ahorro energético anual	45.491	37.782
3	Ahorro energético anual	45.491	83.273
4	Ahorro energético anual	45.491	128.764
5	Ahorro energético anual	45.491	174.255

Fuente: Elaboración propia con base en la inversión técnica inicial y ahorro energético anual estimado.

La Tabla 5 ilustra el flujo del dinero, el cual considera solamente la inversión técnica inicial de USD 53.200. En el año 0 se observa el desembolso inicial y, a partir del año 1, los flujos de dinero se ven afectados por los beneficios económicos que provienen del ahorro energético. El flujo acumulado permite ver que, al final del primer año, aún persiste un balance negativo de USD 7.709, pero ya en el segundo año el flujo acumulado se torna positivo, alcanzando así los USD 37.782. Esto pone en evidencia que la inversión directa del sistema de recuperación térmica se recupera antes de que se cumpla el segundo año de operación.

Tabla 6

Flujo de caja del proyecto integral a cinco años.

Año	Concepto	Flujo de caja (USD)	Flujo acumulado (USD)
0	Presupuesto integral del proyecto	-125.000	-125.000
1	Ahorro energético anual	45.491	-79.509
2	Ahorro energético anual	45.491	-34.018
3	Ahorro energético anual	45.491	11.473
4	Ahorro energético anual	45.491	56.964
5	Ahorro energético anual	45.491	102.455

Fuente: Elaboración propia con base en el presupuesto integral del proyecto y el ahorro energético anual estimado.

En la Tabla 6 se muestra el flujo de caja, que considera el presupuesto general de 125.000 dólares durante un horizonte de cinco años. En este caso, a diferencia de la inversión técnica inicial, este tipo de flujo de caja es el que se estima en una mirada más holística del proyecto, considerando costos de gestión, operación, seguimiento, mantenimiento, control y sostenibilidad. El flujo de caja acumulado permite apreciar cómo el proyecto queda con saldo negativo los dos primeros años, positivo el tercer año (USD 11.473) y, añadido el saldo al final del quinto año, lo que se obtiene en beneficio neto acumulado son 102.455 dólares, lo que indica que los ahorros energéticos estimados son mayores que el presupuesto total considerado.

2.4.3 Retorno de inversión (ROI)

El retorno sobre la inversión (ROI), del inglés, *Return on Investment*, es un indicador financiero que permite medir el rendimiento de una inversión y la relación con el beneficio que dicha actividad genera. La funcionalidad de este parámetro es que indica el porcentaje de capital que se ha recuperado gracias a los beneficios producidos en un periodo considerado.

En proyectos de eficiencia energética, el ROI permite analizar si la rentabilidad que ofrecen los ahorros que se generan por reducir el consumo de energía justifican el desembolso de la inversión. A diferencia de otros proyectos donde la rentabilidad se traduce en aumento de las ventas, en este caso la rentabilidad se genera por la disminución de los costes operativos, específicamente debido a la menor necesidad de energía térmica para calentar el agua del proceso.

Desde el punto de vista financiero, el ROI permite realizar una lectura rápida de la conveniencia económica del proyecto, dado que permite comparar el ahorro anual con la inversión inicial. A mayor porcentaje obtenido mayor capacidad del proyecto de ser beneficioso comparado con la inversión realizada.

En el presente proyecto se estima el ROI en dos niveles. El primero hace referencia al retorno de la inversión técnica inicial que se estima en USD 53.200 y se refiere al valor de la adquisición de equipamiento térmico y el segundo está relacionado al ROI integral del proyecto contemplando el presupuesto total de USD 125.000 para el horizonte de evaluación

de cinco años. El ahorro anual utilizado para calcular el ROI es el mismo en ambos casos, el que se considera que genera la recuperación de calor residual que es USD 45.491.

Tabla 7

Criterios utilizados para el cálculo del ROI

Criterio financiero	Valor considerado	Aplicación dentro del proyecto
Ahorro anual estimado	USD 45.491	Beneficio económico anual generado por la recuperación térmica.
Inversión técnica inicial	USD 53.200	Base para el cálculo del retorno sobre la inversión (ROI) directo del sistema.
Presupuesto integral del proyecto	USD 125.000	Base para el cálculo del ROI acumulado del proyecto a cinco años.
Horizonte de evaluación	5 años	Periodo utilizado para evaluar el beneficio económico acumulado del proyecto.

Fuente: Elaboración propia con base en los datos económicos del proyecto.

En la Tabla 7 se muestran los valores que se han utilizado en el cálculo del retorno sobre la inversión. Estos valores son adecuados para calcular el ROI técnico, es decir, el ROI que está estrictamente relacionado con el sistema de recuperación térmica y el ROI integral, que es el que está relacionado con el presupuesto total del proyecto durante los cinco años de horizonte. La distinción entre estos dos tipos de ROI es importante porque permite analizar el rendimiento desde una aproximación directa y desde una aproximación más amplia de gestión financiera.

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

2.4.3.1 ROI de la inversión inicial del sistema de recuperación térmica

El ROI sobre la inversión inicial, nos permite calcular la rentabilidad directa del sistema recuperación térmica, considerándose solamente el monto desembolsado para la instalación del sistema. En este caso, la inversión inicial que se estima corresponde a un total de USD 53.200, valor procedente de los costes directos de adquisición de equipos.

Este indicador, nos permite comparar el ahorro anual por recuperación del calor residual, en la propia inversión inicial del sistema. En el caso del proyecto, el ahorro anual, se sitúa en los USD 45.491. Valor que se obtiene de la recuperación energética del condensado caliente, como aprovechamiento para calentar el agua de proceso.

La fórmula utilizada es:

$$ROI = \left(\frac{\text{Ahorro Anual}}{\text{Inversión Inicial}} \right) \times 100$$

Sustituyendo los valores del proyecto

$$ROI = \left(\frac{45.491}{53.200} \right) \times 100$$

$$ROI = 85,5\%$$

Tabla 8*Cálculo del ROI de la inversión técnica inicial*

Concepto	Fórmula / valor aplicado	Resultado
Ahorro anual estimado	USD 45.491	—
Inversión técnica inicial	USD 53.200	—
ROI técnico anual	$45.491 / 53.200 \times 100$	85,5 %

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 8 evidencia que dicha tecnología, consistente en un sistema técnico de recuperación térmica, produce un ROI de un 85,5 % en términos anuales. Esto es que el proyecto recupera en forma de ahorros energéticos, en su primer año de funcionamiento, un valor equivalente al 85,5 % de la inversión técnica inicial. Esto es positivo desde el punto de vista financiero, pues demuestra una capacidad de retorno notoriamente alta en un periodo de tiempo reducido.

2.4.3.2 ROI Integral del proyecto a cinco años.

El ROI de la inversión del proyecto a cinco años permite valorar la rentabilidad global de la propuesta, considerando el total de presupuesto previsto en el horizonte de análisis. A diferencia de la ROI inicial del proyecto que solo tiene en cuenta el coste directo del sistema de recuperación térmica, este indicador de rentabilidad prevé una visión más global del proyecto ya que incorpora la consideración del presupuesto total de USD 125.000 a lo largo de los cinco años.

Para llevar a cabo este cálculo el beneficio económico no se refleja únicamente en el ahorro anual como ha sucedido en el caso anterior, sino en el beneficio neto acumulado en la evaluación del proyecto dado su horizonte de análisis. Por ello, primero se calcula el ahorro total que se ha ido generando durante los cinco años y posteriormente se resta el presupuesto previsto por el proyecto.

El ahorro anual estimado es de USD 45.491. Por lo tanto, el ahorro acumulado durante cinco años se calcula de la siguiente manera:

El ahorro anual estimado es de USD 45.491. Por lo tanto, el ahorro acumulado durante cinco años se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ahorro acumulado} = 45.491 \times 5$$

$$\text{Ahorro acumulado} = 227.455 \text{ USD}$$

Posteriormente, se determina el beneficio neto acumulado:

$$\text{Beneficio neto acumulado} = \text{Ahorro acumulado} - \text{Presupuesto integral}$$

$$\text{Beneficio neto acumulado} = 227.455 - 125.000$$

$$\text{Beneficio neto acumulado} = 102.455 \text{ USD}$$

Finalmente, el ROI integral del proyecto se calcula con la siguiente fórmula:

$$ROI\ Integral = \left(\frac{Beneficio\ neto\ acumulado}{Presupuesto\ total} \right) \times 100$$

$$ROI\ Integral = \left(\frac{102.455}{125.00} \right) \times 100$$

$$ROI\ Integral = 81,96\%$$

Tabla 9

Cálculo del ROI integral del proyecto a cinco años

Concepto	Fórmula / valor aplicado	Resultado
Ahorro anual estimado	USD 45.491	—
Horizonte de evaluación	5 años	—
Ahorro acumulado	45.491×5	USD 227.455
Presupuesto integral del proyecto	USD 125.000	—
Beneficio neto acumulado	$227.455 - 125.000$	USD 102.455
ROI integral acumulado	$102.455 / 125.000 \times 100$	81,96 %

Fuente: Elaboración propia.

El retorno sobre la inversión total del proyecto a lo largo de los cinco años va a resultar en un beneficio neto acumulado de USD 102.455, después de haber incorporado el coste total de USD 125.000. Esto indicaría que el ROI total sería del 81,96 %, es decir, el

proyecto también se iría a mantener, a pesar de tener en cuenta una visión más integral del proyecto.

Tabla 10

Comparación del ROI de la inversión inicial y de la inversión integral

Indicador	Inversión inicial del sistema	Inversión integral del proyecto
Base de cálculo	USD 53.200	USD 125.000
Beneficio considerado	Ahorro anual	Beneficio neto acumulado
Valor del beneficio	USD 45.491	USD 102.455
Fórmula aplicada	$45.491 / 53.200 \times 100$	$102.455 / 125.000 \times 100$
ROI obtenido	85,5 % anual	81,96 % acumulado
Horizonte de lectura	1 año	5 años
Interpretación	Rentabilidad directa del sistema	Rentabilidad total del proyecto

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 10 permite llevar a cabo la comparación de ambas lecturas del retorno sobre la inversión. El ROI técnico exhibe la rentabilidad directa del sistema de recuperación térmica, mientras que el ROI integral permite evaluar el rendimiento económico del proyecto durante un periodo de cinco años. Cabe señalar que ambas lecturas son positivas, lo que también avala la viabilidad económica de la propuesta.

En conclusión, el análisis del ROI, que ha sido llevado a cabo a partir de la tabla, evidencia que el sistema de recuperación de calor residual presenta una rentabilidad positiva. Desde la perspectiva técnica, el proyecto recupera el 85,5 % anual de la inversión directa del sistema, mientras que desde la perspectiva integral, el proyecto cumple con un ROI acumulado del 81,96 % durante el horizonte de cinco años. Estos resultados evidencian que la recuperación térmica no solo incrementa la eficiencia, sino que también reporta beneficios económicos que justifican la inversión.

2.4.4 Periodo de Recuperación (Payback)

El periodo de recuperación, también conocido como Payback, constituye un indicador financiero que estima el tiempo necesario para que la inversión inicial de un proyecto sea recuperada a través de los beneficios económicos que tal proyecto aporta. Su principal utilidad consiste en afinar el momento en el cual los flujos positivos acumulados satisfacen la inversión inicial realizada para el proyecto.

En el caso de proyectos de eficiencia energética, el Payback es particularmente útil, ya que puede estimar el tiempo que los ahorros operativos pueden tardar en cubrir la inversión realizada. Este método contrasta con otros indicadores habitualmente más complejos, ya que ofrece una lectura sencilla sobre la velocidad de recuperación del capital invertido.

Desde la perspectiva financiera, a menor periodo de recuperación, menor será el tiempo al que se estará expuesto al riesgo económico. Por esta razón, un Payback corto suele verse como positivo, en particular en el caso de inversiones industriales cuyo objetivo es la reducción de los costes operativos y la mejora de la eficiencia del proceso.

En este proyecto, el Payback es calculado en dos niveles: el primero es el correspondiente al periodo de recuperación de la inversión técnica inicial, que se estima en USD 53.200 y el segundo es aquel que se refiere al periodo de recuperación del presupuesto total del proyecto, que se estima en USD 125.000 (un horizonte de cinco años) y en ambos casos el beneficio económico utilizado es el ahorro anual propuesto de USD 45.491 que es generado por la recuperación de calor residual.

Tabla 11

Criterios utilizados para el cálculo del periodo de recuperación

Criterio financiero	Valor considerado	Aplicación dentro del proyecto
Ahorro anual estimado	USD 45.491	Beneficio económico anual generado por la recuperación térmica.
Inversión técnica inicial	USD 53.200	Base para calcular el Payback directo del sistema técnico.
Presupuesto integral del proyecto	USD 125.000	Base para calcular el Payback integral del proyecto.
Horizonte de evaluación 5 años		Periodo de referencia para verificar la recuperación económica del proyecto.

Fuente: Elaboración propia con base en los datos económicos del proyecto.

En la Tabla 11 se muestran los datos utilizados para calcular el periodo de recuperación. Estos criterios distinguen entre la recuperación directa de la inversión técnica inicial de la recuperación del presupuesto integral del proyecto; es necesario efectuar esta

diferenciación dado que son distintas las magnitudes que cada uno da respuesta, pues pertenecen a distintos niveles de análisis financiero.

2.4.4.1 Payback de la inversión técnica inicial

El Payback de la inversión técnica inicial permite determinar el tiempo requerido para recuperar el desembolso directo asociado a la implementación del sistema de recuperación térmica.

La fórmula aplicada es:

$$\text{Payback} = \left(\frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ahorro anual}} \right)$$

Sustituyendo los valores del proyecto:

$$\text{Payback} = \left(\frac{53.200}{45.491} \right)$$

$$\text{Payback} = 1,17 \text{ años}$$

Para expresar el resultado en meses:

$$1,17 \times 12 = 14,04 \text{ meses}$$

Tabla 12

Cálculo del Payback de la inversión técnica inicial

Concepto	Fórmula / valor aplicado	Resultado
Inversión técnica inicial	USD 53.200	—
Ahorro anual estimado	USD 45.491	—
Payback técnico	$53.200 / 45.491$	1,17 años
Equivalente en meses	$1,17 \times 12$	14,04 meses

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 12 se puede observar la inversión técnica será recuperada en un tiempo aproximado de 1,17 años, o lo que equivale a 14,04 meses; es decir, los ahorros energéticos producidos por el sistema permiten recuperar el coste directo de la inversión antes de que acabe el segundo año de la vida útil del sistema. Desde el punto de vista financiero, este resultado es positivo porque indica que se produce una rápida recuperación de la inversión inicial.

2.4.4.2 Payback del proyecto integral

Además del análisis de la inversión técnica inicial, se calcula el Payback del proyecto integral considerando el presupuesto total de USD 125.000 para el horizonte de cinco años. Este enfoque permite evaluar el tiempo necesario para recuperar no solo la instalación técnica del sistema, sino también los costos ampliados asociados a gestión, operación, seguimiento, mantenimiento, control y sostenibilidad del proyecto.

La fórmula aplicada es:

$$\text{Payback integral} = \frac{\text{Presupuesto total}}{\text{Ahorro anual}}$$

Sustituyendo los valores:

$$\text{Payback integral} = \frac{125.000}{45.491}$$

$$\text{Payback integral} = 2,75 \text{ años}$$

Para expresar el resultado en meses:

$$2,75 \times 12 = 33,0 \text{ meses}$$

Tabla 13

Cálculo del Payback del proyecto integral

Concepto	Fórmula / valor aplicado	Resultado
Presupuesto integral del proyecto	USD 125.000	—
Ahorro anual estimado	USD 45.491	—
Payback integral	125.000 / 45.491	2,75 años
Equivalente en meses	2,75 × 12	33,0 meses

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 13 indica que el proyecto integral se recupera en un plazo de cerca de 2,75 años, esto es, 33 meses. Este dato se sitúa en el horizonte de evaluación de cinco años, lo que

significa que ratifica la viabilidad de todo el proyecto desde un punto de vista más extenso, y, si bien el plazo de recuperación integral sea superior al de la inversión técnica inicial, el periodo no obstante sigue siendo razonable para un proyecto industrial con rentabilidad repetida durante varios años.

Tabla 14

Comparación del periodo de recuperación técnico e integral

Indicador	Inversión técnica inicial	Proyecto integral a cinco años
Base de cálculo	USD 53.200	USD 125.000
Ahorro anual considerado	USD 45.491	USD 45.491
Payback obtenido	1,17 años	2,75 años
Equivalente aproximado	14,04 meses	33,0 meses
Interpretación	Recuperación directa del sistema técnico	Recuperación del presupuesto total del proyecto

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 14 permite realizar una comparación entre los niveles de recuperación del proyecto, donde la primera de ellas, presentada bajo la forma de relación del acompañamiento técnico inicial, supone un periodo de desvinculación muy corto, que corresponde a los 14 meses correspondientes y que podría evidenciar la rápida recuperación que se presenta de manera directa por el sistema de recuperación de la energía térmica. En

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

cuanto a la segunda relación del presupuesto total del proyecto, se recupera en 33 meses, manteniéndose dentro de los parámetros multidimensionales del horizonte de evaluación de los 5 años. Esto pone de manifiesto que la propuesta mantiene viabilidad económica tanto en su enfoque técnico como integral del proyecto.

En un conjunto de análisis del periodo de recuperación, el análisis del periodo de recuperación relacionado con la operación de la planta demuestra que el sistema de recuperación de calor residual muestra un periodo de recuperación financiero positivo, ya que la recuperación de la inversión técnica inicial se produce antes de terminar con el segundo año de operación, y la recuperación del presupuesto total del proyecto se produce durante el tercer año. Por otro lado, estos resultados refuerzan la conveniencia económica de la propuesta, ya que los ahorros por la recuperación térmica permiten recuperar la inversión en el horizonte de evaluación.

2.4.5 Análisis de escenarios

El análisis de escenarios es un instrumento de evaluación financiera que permite observar cómo puede variar el comportamiento económico de un proyecto a medida que varían algunos de los principales supuestos. En este sentido, su principal ventaja es que no circunscribe la evaluación del proyecto a un único resultado esperado, sino que permite observar el desempeño de la propuesta bajo diferentes condiciones, favorables o desfavorables.

En el caso de la evaluación de proyectos de eficiencia energética, el análisis de escenarios tiene una fuerte relevancia debido a que los ahorros económicos pueden variar con respecto a determinadas variables de operación del sistema, tales como el número de horas de operación, el costo de la energía, la estabilidad de los procesos, el nivel de producción o la disponibilidad del sistema de recuperación térmica, por esta razón el análisis de escenarios es una herramienta que permite determinar si el proyecto es todavía viable cuando las condiciones de operación del sistema resultan diferentes respecto al contexto inicial.

Desde un punto de vista financiero, el análisis de escenarios puede reducir el nivel de incertidumbre en el momento de tomar decisiones, ya que puede observar cómo evolucionan los indicadores económicos del proyecto (ahorro anual, ROI o tiempo de recuperación) cuando existe un cambio en las condiciones de operación. A los efectos de este trabajo, se analizan tres escenarios: base, conservador y optimista.

El escenario base es el que refleja las condiciones esperadas para el proyecto, asumiendo que se cuenta con una operación anual de 2.000 horas y un ahorro económico estimado de USD 45.491. El escenario conservador asume un 20 % de reducción de las horas de operación con el consiguiente recorte del ahorro anual de recursos económicos.

Finalmente, el escenario optimista asume un aumento del 15 % del costo energético, manteniendo estable la operación, lo que significa un incremento en el valor económico de la energía recuperada.

Tabla 15

Supuestos considerados para el análisis de escenarios

Escenario	Supuesto aplicado	Condición evaluada	Propósito del análisis
Escenario esperado del proyecto	Operación de 2.000 h/año	Condición esperada del proyecto	Estimar el resultado económico principal del sistema.
Escenario conservador por reducción de horas de operación	Reducción del 20 % en horas de operación	Menor utilización del sistema	Evaluar la viabilidad económica ante menor operación.
Escenario optimista por incremento del costo energético	Incremento del 15 % en el costo energético	Mayor valor económico de la energía recuperada	Evaluar el beneficio económico ante un aumento energético.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 15 da a conocer cuáles son los supuestos utilizados al estimar escenarios económicos que se consideren para el proyecto, de esta forma se puede analizar el comportamiento económico del proyecto para los diversos escenarios que podrían presentar con condiciones de funcionamiento normales, desfavorables y favorables, es una forma preliminar que permite comprobar si el sistema de recuperación térmica es aún económicamente viable bajo condiciones de funcionamiento o precio de la energía distintas a las inicialmente expuestas.

2.4.5.1 Escenario esperado del proyecto

El escenario que se espera del proyecto representa las condiciones consideradas para la estimación económica. En este caso se asume una duración anual en operaciones de 2.000 horas, un ahorro anual estimado en USD 45.491, una inversión inicial del sistema de recuperación térmica de USD 53.200 y un presupuesto integral del proyecto de USD 125.000 para el horizonte de cinco años.

Bajo este escenario, el retorno sobre la inversión inicial del sistema se calcula de la siguiente manera:

$$ROI = \left(\frac{45.491}{53.200} \right) \times 100$$

$$ROI = 85,5 \%$$

El periodo de recuperación de la inversión inicial es:

$$Payback = \frac{53.200}{45.491}$$

$$Payback = 1,17 \text{ años}$$

Para el presupuesto integral del proyecto, el periodo de recuperación es:

$$Payback \text{ integral} = \frac{125.000}{45.491}$$

$$Payback \text{ integral} = 2,75 \text{ años}$$

Tabla 16

Resultados financieros del escenario esperado del proyecto

Indicador	Fórmula / valor aplicado	Resultado
Ahorro anual estimado	Condición esperada del proyecto	USD 45.491
ROI de la inversión inicial	$45.491 / 53.200 \times 100$	85,50 %
Payback de la inversión inicial	$53.200 / 45.491$	1,17 años
Payback del proyecto integral	$125.000 / 45.491$	2,75 años

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 16 muestra las condiciones anticipadas con el resultado favorable desde un punto de vista financiero. La inversión inicial del sistema se recupera en un tiempo equivalente a 1,17 años y el agua total de la integración del proyecto se recupera en 2,75 años. Ambos resultados se encuentran dentro del alcance del horizonte de evaluación de 5 años en el que se evalúa la viabilidad económica.

2.4.5.2 Escenario conservador por reducción de horas de operacion

El escenario conservador establece una reducción del 20 % respecto a las horas anuales de operación, como consecuencia de paradas de la producción, mantenimientos imprevistos, menor demanda de producción o variaciones de disponibilidad operativa de la línea de extrusión.

Al operar menos horas, se recupera menor cantidad de energía durante el año y por ende, el ahorro económico anual se verá reducido de una manera proporcional. Para este escenario conservador, el ahorro anual se valorizará en referencia del mismo ahorro esperado de USD 45.491 -20 %.

$$\text{Ahorro conservador} = 45.491 \times 0,80$$

$$\text{Ahorro conservador} = 36.392,80 \text{ USD/año}$$

Con este nuevo ahorro anual, el ROI de la inversión inicial es:

$$ROI = \left(\frac{36.392,80}{53.200} \right) \times 100$$

$$ROI = 68,4 \%$$

El periodo de recuperación de la inversión inicial es:

$$\text{Payback} = \frac{53.200}{36.392,80}$$

$$\text{Payback} = 1,46 \text{ años}$$

Para el presupuesto integral del proyecto:

$$\text{Payback integral} = \frac{125.000}{36.392,80}$$

$$\text{Payback integral} = 3,43 \text{ años}$$

Tabla 17

Resultados financieros del escenario conservador por reducción de horas de operación

Indicador	Fórmula / valor aplicado	Resultado
Ahorro anual estimado	$45.491 \times 0,80$	USD 36.392,80
ROI de la inversión inicial	$36.392,80 / 53.200 \times 100$	68,40 %
Payback de la inversión inicial	$53.200 / 36.392,80$	1,46 años
Payback del proyecto integral	$125.000 / 36.392,80$	3,43 años

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 17 pone de manifiesto que, incluso en un contexto en el que se asuma una disminución del 20 % de las horas de funcionamiento del proyecto de inversión, ofrece resultados suficientemente favorables desde el punto de vista financiero. La amortización de la inversión inicial es de 1,46 años y la de presupuesto total económico de 3,43 años. Por más que los valores de los indicadores sean peores que en el supuesto esperado, el proyecto recobra su balance dentro del horizonte de evaluación de cinco años.

2.4.5.3 Escenario optimista por incremento del costo energético

El escenario optimista considera un aumento en el coste energético del 15 % manteniendo las horas de operación constantes. Se presentaría esta situación si aumentan los precios del combustible, vapor o energía usada para el proceso térmico.

En este escenario, el ahorro provocado por el sistema de recuperación térmica es mayor porque cada unidad de energía recuperada tiene un mayor valor económico. Por lo tanto, el ahorro anual esperado aumenta un 15 % respecto al escenario esperado del proyecto.

$$\text{Ahorro optimista} = 45.491 \times 1,15$$

$$\text{Ahorro optimista} = 52.314,65 \text{ USD/año}$$

Con este ahorro anual, el ROI de la inversión inicial es:

$$ROI = \left(\frac{52.314,65}{53.200} \right) \times 100$$

$$ROI = 98,3 \%$$

El periodo de recuperación de la inversión inicial es:

$$\text{Payback} = \frac{53.200}{52.314,65}$$

$$\text{Payback} = 1,02 \text{ años}$$

Para el presupuesto integral del proyecto:

$$\text{Payback integral} = \frac{125.000}{52.314,65}$$

$$\text{Payback integral} = 2,39 \text{ años}$$

Tabla 18

Resultados financieros del escenario optimista por incremento del costo energético.

Indicador	Fórmula / valor aplicado	Resultado
Ahorro anual estimado	$45.491 \times 1,15$	USD 52.314,65
ROI de la inversión inicial	$52.314,65 / 53.200 \times 100$	98,30 %
Payback de la inversión inicial	$53.200 / 52.314,65$	1,02 años
Payback del proyecto integral	$125.000 / 52.314,65$	2,39 años

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 18 muestra cómo el proyecto mejora su situación financiera cuando se incrementan los costos energéticos, de manera que el ahorro anual sería de USD 52.314,65, el ROI para la inversión inicial podría compactarse hasta un 98,3 % y el periodo de recuperación para la inversión inicial se reduciría a 1,02 años. Desde una perspectiva integral, el proyecto recupera su total en 2,39 años, reflejando una factibilidad económica de la recuperación térmica en el incremento de costos energéticos.

2.4.5.4 Comparación de escenarios financieros

La comparación de los escenarios permite al estudio técnico visualizar de forma conjunta el comportamiento económico del proyecto bajo las tres condiciones evaluadas. Esta comparación es importante porque identifica si el proyecto depende exclusivamente de un escenario favorable o si mantiene su viabilidad ante condiciones menos favorables.

Tabla 19

Comparación de escenarios financieros del proyecto.

Escenario	Ahorro anual estimado	ROI de la inversión inicial	Payback de la inversión inicial	Payback del proyecto integral
Escenario esperado del proyecto	USD 45.491,00	85,50 %	1,17 años	2,75 años
Escenario conservador por reducción de horas de operación	USD 36.392,80	68,40 %	1,46 años	3,43 años
Escenario optimista por incremento del costo energético	USD 52.314,65	98,30 %	1,02 años	2,39 años

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 19 expone de forma resumida el comportamiento financiero del proyecto bajo los tres escenarios analizados. En el primer escenario, el escenario base, el proyecto presenta una recuperación óptima de 1,17 años y una recuperación total de 2,75 años. En el segundo escenario, el conservador, los beneficios son menores al escenario base pero la

recuperación total es de 3,43 años, lo que representa que aún en este escenario se sigue recuperando la inversión inicial en un horizonte de cinco años. Finalmente, en el tercer escenario optimista, el aumento del coste energético se correlaciona en la mejora de los indicadores económicos del proyecto, así como también el periodo de recuperación total es inferior a los dos años, alcanzando una duración de 2,39 años.

En conjunto, el análisis de escenarios muestra que el proyecto mantiene viabilidad económica en distintas condiciones de funcionamiento: el hecho que se recorten horas de funcionamiento anuales compensa de forma proporcional la reducción de los beneficios esperados, pero no elimina la posibilidad de recuperación del proyecto, por el contrario, la posibilidad de recupero del proyecto se vería facilitada a los incrementos de precio de coste energético, ya que aumenta el valor económico de la energía recuperada.

Desde un punto de vista financiero, estos resultados refuerzan la conveniencia del sistema de recuperación de calor residual, ya que determinan que la propuesta no se encuentra determinada por un escenario ideal para ser viable: aun en condiciones conservadoras, el proyecto es capaz de recuperar su budget integral dentro del horizonte de evaluación definido, es lo que explica su sostenibilidad económica y su potencial de implantación en los procesos industriales de extrusión de alimento balanceado.

2.5 Gestión del Proyecto

2.5.1 *Acta de constitución del proyecto*

Basado en los resultados obtenidos en el análisis técnico, energético, económico y de riesgos desarrollados en las secciones anteriores, se plantea la propuesta para implementar un sistema para la recuperación del calor residual aplicado a procesos de extrusión de alimentos balanceados, orientado a mejorar la eficiencia energética del proceso productivo y optimizar el aprovechamiento del vapor generado en planta.

El análisis energético desarrollado en capítulos anteriores permitió identificar una capacidad estimada de recuperación térmica de 333,6 kW, evidenciando una oportunidad técnica para disminuir el consumo energético asociado al sistema de generación de vapor y mejorar el desempeño térmico del proceso de extrusión.

Desde el punto de vista económico, la propuesta considera una inversión estimada de USD 125.000, financiada mediante aportes de capital privado y financiamiento bancario, bajo un horizonte financiero de cinco años.

Debido a las características industriales del proyecto, la propuesta fue estructurada bajo una lógica tipo EPC (*Engineering, Procurement and Construction*), considerando las etapas de ingeniería, adquisición de equipos e integración del sistema térmico dentro de la planta industrial. Sin embargo, el presente trabajo corresponde a una propuesta técnica y económica de implementación, por lo que no contempla la ejecución física del sistema dentro del alcance de la investigación.

La información general del proyecto se resume en la Tabla 20, donde se consolidan los principales parámetros técnicos, organizacionales y financieros considerados durante la planificación de la propuesta.

Tabla 20

Información general del proyecto

Elemento	Descripción
Nombre del proyecto	Evaluación técnica, económica y riesgos en sistemas para el aprovechamiento del calor residual en procesos de extrusión de alimento balanceado
Tipo de proyecto	Industrial orientado a eficiencia energética
Modalidad propuesta	EPC (Engineering, Procurement and Construction)
Duración estimada de implementación	16 semanas
Presupuesto estimado	USD 125.000
Estructura financiera	Capital privado y financiamiento bancario
Vida útil estimada del sistema	7 años
Horizonte financiero	5 años
Recuperación térmica estimada	333,6 kW
Ahorro económico anual estimado	USD 45.491

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21*Estructura organizacional*

Rol	Integrante asignado	Responsabilidad principal
Especialista en Ingeniería Mecánica y Energética	Ing. Christopher Leonardo Acosta Ordóñez	Desarrollo técnico y análisis energético del sistema de recuperación térmica.
Analista Económico y Estratégico	Ing. Jose Alejandro Arguello Ortega	Evaluación financiera y análisis de viabilidad económica del proyecto.
Especialista en Riesgos y Viabilidad Operativa	Ing. Danilo Armando Armijos Rivadeneira	Gestión de riesgos y planificación operativa del proyecto.
Especialista en Instrumentación y Medición Energética	Ing. Carlos Iván Bustamante Duque	Definición de instrumentación y validación de variables energéticas.
Especialista en Automatización y Optimización de Procesos	Ing. Alex Marcelo Cadena Quimbata	Integración de automatización y optimización del sistema.
Responsable de Dirección y Gestión del Proyecto	Ing. Shirley Jazmín Heredia Alomoto	Coordinación metodológica y gestión integral del proyecto.
Analista de Gestión Financiera y Control Administrativo	Msc. Sara Carolina Ochoa Agrazal	Control financiero y validación administrativa del proyecto.
Coordinadora de Gestión Organizacional y Operativa	Ing. Alejandra Estefanía Vivas Cabezas	Seguimiento organizacional y coordinación operativa del equipo.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 21 presenta un equipo multidisciplinario conformado por profesionales con responsabilidades específicas en las áreas técnica, financiera, operativa y de gestión.

Alcance

La propuesta comprende:

- Levantamiento de información en planta.
- Validación de variables operativas y energéticas.
- Ingeniería conceptual y de detalle.
- Elaboración de diagramas y especificaciones técnicas.
- Adquisición de equipos principales.
- Instalaciones mecánicas y eléctricas.
- Integración de automatización e instrumentación.
- Pruebas: *Factory Acceptance Test* (FAT) y *Site Acceptance Test* (SAT).
- Validación de la recuperación térmica.
- Puesta en marcha del sistema.
- Capacitación técnica al personal operativo.
- Transferencia técnica y entrega documental.

Exclusiones del alcance

El presente trabajo contempla:

- Ampliaciones de capacidad productiva.
- Reemplazo integral del sistema de generación de vapor.
- Modificaciones civiles mayores.
- Expansión de líneas de producción.
- Implementación de nuevos sistemas de generación eléctrica.

Condicionantes del proyecto

Para el análisis y desarrollo de la propuesta se consideraron los siguientes condicionantes:

- Continuidad operativa de la planta industrial durante la implementación.
- Disponibilidad limitada de ventanas de mantenimiento.
- Cumplimiento del presupuesto máximo aprobado.
- Cumplimiento de estándares de seguridad industrial y normativas internas.
- Disponibilidad de espacios físicos para integración del sistema térmico.
- Tiempos de entrega de equipos especializados.

Consideraciones del proyecto

Para el desarrollo del proyecto se establecieron las siguientes consideraciones:

- Disponibilidad de proveedores especializados en sistemas térmicos industriales.
- Estabilidad operativa del proceso productivo durante la implementación.
- Aprobación y disponibilidad del financiamiento bancario.
- Acceso a información histórica de producción y consumo energético.
- Disponibilidad de personal técnico de planta para coordinación operativa.
- Estabilidad de precios de materiales críticos durante la etapa de ejecución.
- Compatibilidad del sistema propuesto con la infraestructura existente.

Criterios de éxito

Los criterios considerados para evaluar la viabilidad de la propuesta corresponden a:

- Recuperación térmica mínima de 333,6 kw.
- Disponibilidad operacional superior al 95 %.
- Desviación presupuestaria máxima de ± 10 %.
- Cumplimiento del cronograma superior al 95 %.
- Recuperación de la inversión en un periodo inferior a tres años.
- Reducción del consumo energético asociado al sistema de vapor.
- Validación satisfactoria de pruebas FAT y SAT.
- Cero incidentes críticos de seguridad durante la implementación.

2.5.2 Estructura de desglose del trabajo (EDT/WBS)

Con la finalidad de organizar las actividades principales de la propuesta, se desarrolló la estructura de trabajo que permite distribuir al proyecto en etapas técnicas y operativas, facilitando el análisis de tiempos, recursos y secuencia de actividades requeridas para una eventual implementación industrial.

EDT General del Proyecto

1. Inicio del proyecto

1.1 Gestión de inicio

- Elaboración del acta de constitución;
- Identificación de *stakeholders*;
- Reunión de arranque;
- Definición preliminar del alcance.

1.2 Planeación inicial

- Aprobación de línea base;
- Asignación de recursos;
- Definición de hitos principales;
- Revisión de restricciones operativas.

2. Ingeniería conceptual y de detalle

2.1 Levantamiento técnico

- Inspección en planta;
- Validación de variables térmicas;
- Revisión documental;
- Análisis de línea base energética.

2.2 Ingeniería de detalle

- Diseño del sistema térmico;
- Elaboración de diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID)
- Definición de las características de los equipos principales;
- Integración de automatización, control e instrumentación.

2.3 Validación técnica

- Revisión interdisciplinaria;
- Validación de ingeniería;
- Aprobación técnica.

3. Adquisición de equipos

3.1 Gestión de compras

- Solicitud de cotizaciones;
- Evaluación técnica de proveedores;

- Homologación de fabricantes.

3.2 Adquisición de equipos

- Tanque flash;
- Intercambiador de calor;
- Válvulas;
- Instrumentación;
- Accesorios y tuberías.

3.3 Logística

- Transporte;
- Recepción de equipos;
- Almacenamiento.

4. Instalación e implementación

4.1 Obra mecánica

- Instalación de soportes;
- Montaje de equipos;
- Soldadura de tuberías;
- Integración mecánica.

4.2 Integración eléctrica y automatización

- Cableado eléctrico;
- Instalación de sensores;

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

- Integración del sistema de control;
- Configuración de automatización.

4.3 Control de calidad

- Inspecciones técnicas;
- Validación de montaje;
- Revisión de cumplimiento normativo.

5. Pruebas y comisionamiento

5.1 Pruebas FAT

- Revisión de especificaciones;
- Inspección de equipos;
- Validación de fabricación.

5.2 Pruebas SAT

- Pruebas funcionales en sitio;
- Verificación de integración;
- Validación operativa.

5.3 Validación de desempeño energético

- Medición de recuperación térmica;
- Validación del ahorro energético;
- Análisis de desempeño del sistema.

6. Capacitación y entrega

6.1 Capacitación operativa

- Entrenamiento al personal técnico;
- Transferencia operativa.

6.2 Entrega documental

- Manuales técnicos;
- Protocolos de prueba;
- Documentación As-Built.

6.3 Cierre técnico

- Aceptación formal;
- Validación final del sistema.

7. Cierre administrativo del proyecto

7.1 Validación financiera

- Revisión presupuestaria;
- Validación de costos finales.

7.2 Informe final del proyecto

- Consolidación de resultados;
- Evaluación de desempeño.

7.3 Lecciones aprendidas

- Análisis de oportunidades de mejora;
- Recomendaciones futuras.

7.4 Cierre contractual

- Cierre administrativo;
- Liberación documental.

2.5.3 Cronograma del proyecto

Con base en la EDT desarrollada, en la Tabla 22 se presenta un cronograma general de referencia para una eventual implementación industrial del sistema de recuperación térmica.

La secuencia de actividades considera que las etapas de integración mecánica y pruebas operativas deberán coordinarse con el área de producción, debido a que la línea de extrusión debe mantenerse operativa durante la mayor parte del proceso de implementación.

El cronograma evidencia que la ruta crítica del proyecto está integrada por las actividades de ingeniería de detalle, adquisición del intercambiador de calor, montaje mecánico y pruebas de desempeño energético, debido a que cualquier retraso en estas actividades impactaría directamente la fecha de finalización del proyecto.

Tabla 22*Cronograma general del proyecto*

Fase	Actividad principal	Duración
Planificación	Levantamiento técnico y planificación inicial	2 semanas
Ingeniería	Desarrollo de ingeniería de detalle	3 semanas
Adquisiciones	Selección y adquisición de equipos	4 semanas
Integración	Instalación mecánica, eléctrica e instrumentación	4 semanas
Validación	Pruebas funcionales y energéticas	2 semanas
Cierre	Evaluación final y documentación	1 semana

Fuente: Elaboración propia.

Hitos principales

- Validación de ingeniería;
- Aprobación técnica de equipos;
- Integración del sistema térmico;
- Inicio de pruebas operativas;
- Validación de recuperación térmica;
- Evaluación final de desempeño energético.

El cronograma permitirá realizar seguimiento mediante indicadores de cumplimiento para el control de avance físico del proyecto, para facilitar la toma de decisiones y la gestión de desviaciones.

2.5.4 Presupuesto del proyecto

La propuesta considera una inversión estimada de USD 125.000, según la distribución de la Tabla 23, donde se contemplan costos asociados a ingeniería, equipos térmicos, instrumentación, automatización, integración mecánica y pruebas operativas.

La estructura financiera planteada considera un esquema de financiamiento mixto entre capital privado y financiamiento bancario, orientado a facilitar una eventual implementación industrial del sistema.

Tabla 23

Distribución general del presupuesto

Concepto	Valor estimado (USD)
Equipos térmicos	53.200
Instrumentación y automatización	22.550
Ingeniería y supervisión	17.000
Instalación mecánica y eléctrica	19.000
Pruebas y comisionamiento	7.000
Contingencias	6.250
Total	125.000

Fuente: Elaboración propia.

El presupuesto considera además una reserva para contingencias orientada a cubrir desviaciones operativas, variaciones de costos o requerimientos técnicos no previstos durante la implementación.

2.5.5 Gestión de riesgos

El análisis de riesgos fue desarrollado considerando variables técnicas, operativas y financieras que podrían afectar el desempeño esperado del sistema o la viabilidad de una futura implementación industrial.

Debido a las características térmicas y operativas del proceso de extrusión, se identificaron riesgos asociados tanto al comportamiento energético del sistema como a las condiciones de integración dentro de la planta industrial.

Tabla 24

Riesgos principales identificados

Riesgo	Impacto Probabilidad		Estrategia
Retraso en entrega de equipos	Alto	Media	Seguimiento y control continuo a proveedores.
Variación de costos de materiales	Medio	Alta	Reserva presupuestaria para contingencias.
Interrupción operativa durante instalación	Alto	Media	Planificación por ventanas operativas.
Menor recuperación térmica esperada	Alto	Baja	Validación técnica y pruebas de desempeño.
Fallas de instrumentación	Medio	Media	Implementación de mantenimiento preventivo.

Fuente: Elaboración propia.

La gestión de riesgos identificada en la Tabla 24 permitirá reducir incertidumbres y fortalecer la sostenibilidad técnica y financiera del proyecto. Los riesgos serán monitoreados semanalmente durante toda la ejecución mediante reuniones de seguimiento técnico y financiero.

2.5.6 Plan de implementación

La propuesta de implementación considera una integración progresiva del sistema de recuperación térmica dentro del proceso de extrusión, priorizando la continuidad operativa de la planta y minimizando afectaciones sobre la producción.

La integración del sistema requeriría coordinación con las áreas operativas y de mantenimiento, debido a que ciertas actividades de conexión mecánica y pruebas funcionales deberán ejecutarse durante ventanas programadas de mantenimiento.

Etapas generales de implementación propuestas:

1. Validación de ingeniería y puntos de integración.
2. Preparación de condiciones operativas y permisos de trabajo.
3. Integración mecánica del tanque flash e intercambiador.
4. Instalación de instrumentación y elementos de control.
5. Integración eléctrica y automatización.
6. Pruebas funcionales y operativas.
7. Validación de recuperación térmica.
8. Capacitación operativa y transferencia técnica.

2.5.7 Indicadores clave de desempeño (KPIs)

Los indicadores clave de desempeño fueron definidos de acuerdo a la Tabla 25, tomando como referencia la metodología aplicada en materias previas como Dirección Estratégica, Integración PMI y Gestión de Proyectos, permitiendo evaluar el desempeño técnico, financiero y operativo del proyecto durante la posible implementación y operación inicial.

Tabla 25

KPIs principales del proyecto

KPI	Objetivo
Cumplimiento del cronograma	$\geq 95 \%$
Cumplimiento presupuestario	$\leq$ presupuesto estimado
Recuperación térmica efectiva	$\geq 333,6 \text{ kW}$
Disponibilidad operacional	$\geq 95 \%$
Ahorro económico anual	Maximizar ROI
Índice de incidentes	0 incidentes
Período de recuperación	< 3 años

Fuente: Elaboración propia.

Estos indicadores permitirían monitorear el desempeño esperado del sistema para validar el cumplimiento de objetivos energéticos y financieros establecidos en la propuesta del proyecto.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo sintetiza y discute los resultados obtenidos a partir de los análisis técnico, energético y económico desarrollados en el Capítulo 2. Su propósito es integrar los hallazgos cuantitativos y cualitativos en una interpretación coherente de la viabilidad del sistema de recuperación de calor residual propuesto para la línea de extrusión de alimento balanceado, sin reiterar la descripción metodológica ya expuesta. El análisis se articula en torno a cinco dimensiones: técnica, energética, económica, evaluación de escenarios y discusión crítica de resultados.

3.1 Gestión del Proyecto

El diagnóstico del sistema de vapor de la línea de extrusión con capacidad de producción de 12 t/h de alimento balanceado evidenció una condición de ineficiencia estructural relevante, el condensado generado durante el proceso de acondicionamiento del producto era enviado directamente al tanque general de retorno sin aprovechamiento previo de su contenido energético. Las condiciones operativas del condensado, con un caudal de 6.000 kg/h, temperatura de 170,3 °C y presión de 7 BAR, representaban un potencial térmico técnicamente explotable cuya pérdida se traduciría en un mayor consumo de vapor fresco y, en consecuencia, en costos operativos evitables (Cengel y Boles, 2019).

El análisis termodinámico del sistema permitió identificar dos fuentes diferenciadas de recuperación energética. La primera corresponde al vapor flash generado cuando el condensado, al pasar por un tanque de vaporización instantánea, experimenta una reducción

de presión desde 7 BAR hasta 3,31 BAR: el diferencial entálpico entre ambos estados 720,49 kJ/kg y la entalpía de saturación líquida a 3,31 BAR, respectivamente produce una fracción de vaporización calculada.

El caudal de vapor flash resultante asciende a 295,8 kg/h, reutilizable en procesos de calentamiento de menor presión. El condensado remanente 5.704,2 kg/h conserva una entalpía de 617 kJ/kg a 146,4 °C, constituyendo la segunda fuente de recuperación energética mediante intercambio de calor indirecto.

La propuesta técnica integra estos dos componentes mediante un tanque flash y un intercambiador de calor de placas instalados en serie. Este esquema permite precalentar el agua de proceso desde aproximadamente 33 °C hasta 85 °C antes de su ingreso a la extrusora, reduciendo así la demanda de vapor fresco requerido para el acondicionamiento térmico del producto. La solución se inscribe en las estrategias de integración energética industrial ampliamente documentadas para sistemas de vapor (Klemeš, 2013) y resulta compatible con la infraestructura existente sin requerir intervenciones críticas en la línea de producción.

Desde el punto de vista operativo, el balance energético del intercambiador arroja una diferencia entre la energía cedida por el condensado y la absorbida por el agua de proceso inferior al 1%, lo cual valida la coherencia del modelo termodinámico y confirma la eficiencia del sistema bajo las condiciones operativas analizadas. Este nivel de ajuste es consistente con los principios de la primera ley de la termodinámica para sistemas abiertos de flujo estable (Cengel y Boles, 2019). El aislamiento térmico de tuberías, el control de presión

en el tanque flash y el mantenimiento preventivo del intercambiador son variables operativas críticas para sostener este desempeño en condiciones reales de planta.

3.2 Análisis Energético

Los resultados del balance energético del sistema de recuperación demuestran una capacidad de transferencia térmica estimada en 1.197,13 MJ/h. Este valor cuantifica la energía residual que puede ser capturada del condensado caliente y transferida al agua de proceso, sustituyendo parcialmente la demanda de calentamiento que, en la condición previa, era cubierta íntegramente por vapor fresco.

Tabla 26

Resumen del balance energético del sistema de recuperación

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal de condensado entrada	6.000	kg/h
Temperatura inicial del condensado	170,3	°C
Presión inicial	7	BAR
Entalpía del condensado inicial	720,49	kJ/kg
Presión final tanque flash	3,31	BAR
Temperatura de saturación a 3,31 BAR	146,4	°C
Fracción de vapor flash generado	4,93	%
Caudal de vapor flash	295,8	kg/h

Caudal de condensado remanente	5.704,2	kg/h
Energía total recuperada	1.197,13	MJ/h
Potencia térmica equivalente	333,6	kW
Temperatura del agua de proceso (entrada)	~33	°C
Temperatura del agua de proceso (salida)	~85	°C

Fuente: Elaboración propia con base en los datos operativos del proceso y tablas de propiedades termodinámicas (Cengel y Boles, 2019).

El incremento de temperatura del agua de proceso de 33 °C a 85 °C reduce de forma directa la carga térmica que el sistema de generación de vapor debe asumir para el acondicionamiento del producto extruido. En términos de eficiencia energética industrial, esta recuperación implica una disminución del consumo específico de vapor y, por extensión, una reducción del consumo de combustible asociado a la caldera o generador de vapor (ISO 50001, 2018).

Es pertinente señalar que el potencial energético aprovechable está condicionado por la estabilidad del caudal de condensado, la continuidad del proceso de extrusión y la ausencia de incrustaciones en el intercambiador. Variaciones en la carga de la extrusora o paradas programadas reducen proporcionalmente la cantidad de energía recuperable, aspecto que el análisis de escenarios cuantifica con mayor detalle en la sección 3.4.

3.3 Análisis Económico

La viabilidad económica del sistema fue evaluada mediante la estimación del ahorro energético anual, la construcción de flujos de caja proyectados a cinco años, el cálculo del Retorno sobre la Inversión (ROI) y el período de recuperación de la inversión (Payback), en línea con las metodologías de evaluación financiera de proyectos de eficiencia energética referenciadas en la literatura especializada (Brealey et al., 2020; Blank y Tarquin, 2018).

3.3.1 Análisis Económico

La energía recuperada de 1.197,13 MJ/h, valorada a un costo unitario de USD 0,019/MJ, genera un ahorro horario de USD 22,75. Considerando una operación anual de 2.000 horas, el ahorro económico anual estimado asciende a USD 45.491. Este flujo de beneficios recurrentes constituye el eje central del análisis financiero.

Tabla 27

Estimación del ahorro económico anual

Concepto	Cálculo	Resultado
Energía recuperada	1.197,13 MJ/h	—
Costo unitario de energía	USD 0,019/MJ	—
Ahorro horario	$1.197,13 \times 0,019$	USD 22,75/h
Horas de operación anual	2.000 h/año	—
Ahorro anual estimado	$22,75 \times 2.000$	USD 45.491/año

Fuente: Elaboración propia.

El flujo de caja del proyecto fue modelado bajo dos perspectivas. La primera considera exclusivamente la inversión técnica inicial de USD 53.200, correspondiente a equipos, ingeniería e instalación del sistema de recuperación. La segunda incorpora el presupuesto integral del proyecto de USD 125.000, que incluye costos de gestión, operación, seguimiento, mantenimiento, control y sostenibilidad durante el horizonte de cinco años.

Tabla 28

Flujo de caja acumulado — Inversión técnica inicial (USD 53.200)

Año	Flujo (USD)	Flujo Acumulado (USD)
0 — Inversión	−53.200	−53.200
1	+45.491	−7.709
2	+45.491	+37.782
3	+45.491	+83.273
4	+45.491	+128.764
5	+45.491	+174.255

Fuente: Elaboración propia. Flujos constantes; no se consideran impuestos, inflación ni depreciación en esta etapa.

Tabla 29

Flujo de caja acumulado — Presupuesto integral del proyecto (USD 125.000)

Año	Flujo (USD)	Flujo Acumulado (USD)
0 — Presupuesto integral	–125.000	–125.000
1	+45.491	–79.509
2	+45.491	–34.018
3	+45.491	+11.473
4	+45.491	+56.964
5	+45.491	+102.455

Fuente: Elaboración propia.

Los flujos de caja evidencian que la inversión técnica inicial se recupera dentro del segundo año de operación (flujo acumulado positivo de USD 37.782 al cierre del año 2), mientras que el presupuesto integral del proyecto presenta saldo positivo a partir del tercer año (USD 11.473). Al quinto año, el beneficio neto acumulado bajo la perspectiva integral alcanza USD 102.455, valor que supera el presupuesto total del proyecto.

3.3.2 Retorno sobre la Inversión (ROI)

El ROI fue estimado en dos niveles, con el propósito de diferenciar la rentabilidad directa del sistema técnico y la rentabilidad global del proyecto (Brealey et al., 2020).

ROI de la inversión técnica inicial:

$$\text{ROI técnico} = (45.491 / 53.200) \times 100 = 85,5\%$$

ROI integral del proyecto a cinco años:

$$\text{Beneficio neto acumulado} = (45.491 \times 5) - 125.000 = \text{USD } 102.455$$

$$\text{ROI integral} = (102.455 / 125.000) \times 100 = 81,96\%$$

Tabla 30

Comparación del ROI técnico e integral

Indicador	Inversión técnica inicial	Proyecto integral a 5 años
Base de cálculo	USD 53.200	USD 125.000
Beneficio considerado	Ahorro anual	Beneficio neto acumulado
Valor del beneficio	USD 45.491	USD 102.455
ROI obtenido	85,5% anual	81,96% (5 años)

Fuente: Elaboración propia.

Ambos indicadores confirman una elevada rentabilidad relativa del sistema. El ROI técnico del 85,5% refleja que, en el primer año de operación, el sistema recupera el equivalente al 85,5% de la inversión directa mediante ahorros energéticos. El ROI integral del 81,96% sobre cinco años señala que, incluso asumiendo todos los costos de gestión y sostenibilidad del proyecto, el beneficio neto acumulado equivale a casi el 82% del presupuesto total invertido (Blank y Tarquin, 2018).

3.3.3 Período de Recuperación de la Inversión (Payback)

El período de recuperación fue calculado bajo los mismos dos enfoques aplicados al ROI:

$$\text{Payback técnico} = 53.200 / 45.491 = 1,17 \text{ años} \approx 14 \text{ meses}$$

$$\text{Payback integral} = 125.000 / 45.491 = 2,75 \text{ años} \approx 33 \text{ meses}$$

Tabla 31

Comparación del período de recuperación técnico e integral

Indicador	Inversión técnica inicial	Proyecto integral a 5 años
Base de cálculo	USD 53.200	USD 125.000
Ahorro anual	USD 45.491	USD 45.491
Payback calculado	1,17 años	2,75 años
Equivalente en meses	≈ 14 meses	≈ 33 meses
Interpretación	Recuperación directa del sistema técnico	Recuperación del presupuesto total del proyecto

Fuente: Elaboración propia.

Un Payback técnico de 1,17 años es particularmente favorable para un proyecto industrial de esta naturaleza, pues se ubica muy por debajo de los umbrales habituales de aceptación en proyectos de eficiencia energética, que suelen oscilar entre 3 y 5 años según la práctica sectorial (Thumann y Mehta, 2020). El Payback integral de 2,75 años, que incorpora todos los costos del proyecto, también se sitúa dentro del horizonte de evaluación de cinco años, ratificando la sostenibilidad económica de la propuesta.

3.4 Evaluación de Escenarios

Con el fin de evaluar la robustez financiera del proyecto bajo condiciones de operación variables, se construyeron tres escenarios: base (condiciones esperadas), conservador (reducción del 20% en horas anuales de operación) y optimista (incremento del 15% en el costo de la energía). Esta metodología, ampliamente utilizada en la evaluación de proyectos bajo incertidumbre (Sapag et al., 2014), permite determinar si la viabilidad económica del proyecto depende de condiciones ideales o si se mantiene ante variaciones adversas.

3.4.1 Escenario Base

El escenario base reproduce las condiciones operativas esperadas del proyecto: 2.000 h/año de operación, costo energético de USD 0,019/MJ y ahorro anual de USD 45.491. Los indicadores financieros resultantes son: ROI técnico del 85,5%, Payback técnico de 1,17 años y Payback integral de 2,75 años.

3.4.2 Escenario Conservador

El escenario conservador asume una reducción del 20% en las horas anuales de operación —como resultado de paradas de mantenimiento, menor demanda de producción o variaciones en la disponibilidad operativa de la línea—, lo que reduce el ahorro anual de forma proporcional:

$$\text{Ahorro conservador} = 45.491 \times 0,80 = \text{USD } 36.392,80/\text{año}$$

Bajo este supuesto, el ROI técnico desciende a 68,4% y los períodos de recuperación se extienden a 1,46 años (técnico) y 3,43 años (integral). Aunque los indicadores son menos favorables que en el escenario base, la recuperación del presupuesto integral sigue produciéndose dentro del horizonte de evaluación de cinco años, lo que confirma la viabilidad económica del proyecto incluso ante condiciones operativas desfavorables.

3.4.3 Escenario Optimista

El escenario optimista considera un incremento del 15% en el costo de la energía, manteniendo estables las horas de operación. Esta situación, que puede derivar de alzas en el precio de los combustibles o cambios en la tarifa energética, aumenta el valor económico de cada MJ recuperado:

$$\text{Ahorro optimista} = 45.491 \times 1,15 = \text{USD } 52.314,65/\text{año}$$

En este escenario, el ROI técnico alcanza el 98,3% y los períodos de recuperación se reducen a 1,02 años (técnico) y 2,39 años (integral), mejorando sustancialmente la rentabilidad del proyecto.

3.4.4 Síntesis Comparativa de Escenarios

Tabla 32

Comparación de escenarios financieros del proyecto

Escenario	Ahorro (USD)	anual	ROI técnico	Payback técnico	Payback integral
Base (esperado)	45.491,00		85,50%	1,17 años	2,75 años
Conservador (-20% horas)	36.392,80		68,40%	1,46 años	3,43 años
Optimista (+15% costo energía)	52.314,65		98,30%	1,02 años	2,39 años

Fuente: Elaboración propia.

La comparación entre escenarios muestra que el proyecto mantiene viabilidad económica en todos los casos analizados. Incluso bajo el escenario más desfavorable reducción del 20% en la utilización del sistema, el presupuesto integral se recupera en 3,43 años, manteniéndose dentro del horizonte de evaluación. Esta resiliencia financiera refuerza la conveniencia de la inversión, pues la viabilidad no depende de condiciones ideales de operación (Sapag et al., 2014). El escenario optimista, por su parte, anticipa que incrementos en el costo de la energía tendencia observable a nivel global (IEA, 2023) actuarían como un factor adicional que mejoraría los rendimientos del proyecto.

3.5 Discusión de Resultados

Los resultados del análisis integrado permiten formular una evaluación crítica de la viabilidad técnica, energética y económica del sistema de recuperación de calor residual propuesto.

Desde la perspectiva técnica, el sistema demuestra ser factible bajo las condiciones operativas identificadas. La existencia de un condensado caliente con las condiciones iniciales mencionadas, constituye un recurso energético residual de magnitud suficiente para justificar la implementación de equipos de recuperación. La solución propuesta, representa una configuración estándar ampliamente validada en la industria de procesos con sistemas de vapor (Klemeš, 2013). La integración al proceso existente puede realizarse sin intervenciones críticas en la línea de producción, lo que minimiza el riesgo de afectación a la continuidad operativa.

Desde la perspectiva energética, la recuperación térmica representa una reducción sustancial en la demanda de energía primaria del proceso. Esta cifra debe contextualizarse dentro del marco de la eficiencia energética industrial: la norma ISO 50001 (2018) establece que la gestión sistemática del uso de la energía no solo reduce costos operativos, sino que contribuye a la mejora continua del desempeño energético de las organizaciones. En este sentido, el sistema propuesto no es únicamente una solución de ahorro puntual, sino un componente de una estrategia de gestión energética de mayor alcance.

Desde la perspectiva económica, los indicadores calculados ROI técnico del 85,5%, Payback técnico de 1,17 años y beneficio neto acumulado de USD 102.455 al quinto año posicionan al proyecto como una inversión altamente rentable dentro de su categoría. La literatura referente a proyectos de recuperación de calor residual en procesos industriales reporta períodos de recuperación típicos de entre 2 y 7 años en función de la escala del proceso, el diferencial de temperatura disponible y el costo local de la energía (Thumann y Mehta, 2020). El Payback técnico de 1,17 años obtenido en el presente estudio se ubica en el extremo favorable de este rango, lo que refuerza la solidez económica de la propuesta.

No obstante, los resultados deben interpretarse con cautela respecto a las siguientes limitaciones. En primer lugar, el análisis financiero no incorpora la tasa de descuento del dinero en el tiempo, por lo que los valores de ahorro proyectados no han sido actualizados mediante el Valor Actual Neto (VAN) ni la Tasa Interna de Retorno (TIR), indicadores que aportarían una visión más rigurosa de la rentabilidad bajo el principio del valor temporal del dinero (Brealey et al., 2020). En segundo lugar, los supuestos de flujo constante y ausencia de efectos inflacionarios simplifican la realidad operativa de largo plazo. En tercer lugar, la recuperación energética estimada de 1.197,13 MJ/h es un valor calculado bajo condiciones nominales; las variaciones de carga del proceso, los períodos de mantenimiento y la degradación de los equipos a lo largo del tiempo podrían afectar el desempeño real del sistema (Shapiro, 2015).

En términos de gestión de riesgos, los riesgos más relevantes identificados son: el retraso en la entrega de equipos (impacto alto, probabilidad media), la variación de costos de materiales (impacto medio, probabilidad alta), la interrupción operativa durante la instalación (impacto alto, probabilidad media), y la posibilidad de una recuperación térmica real inferior a la estimada (impacto alto, probabilidad baja). Este último riesgo es mitigable mediante la ejecución de pruebas funcionales de comisionamiento y la instrumentación adecuada del sistema antes de la puesta en marcha definitiva (PMI, 2021). La reserva presupuestaria de USD 10.000 contemplada en el presupuesto del proyecto provee un colchón financiero frente a desviaciones operativas.

La evaluación de escenarios, finalmente, aporta evidencia adicional sobre la robustez del proyecto. El hecho de que, incluso bajo el escenario conservador —reducción del 20% en las horas de operación—, el Payback integral permanezca dentro del horizonte de cinco años (3,43 años), indica que la viabilidad del proyecto no es frágil ante perturbaciones moderadas en las condiciones de operación. Esta característica es especialmente relevante en contextos industriales donde la disponibilidad operativa de las líneas de producción puede verse afectada por factores externos como variaciones en la demanda del mercado o requerimientos de mantenimiento no planificados.

En síntesis, los resultados integrados del análisis técnico, energético, económico y de riesgos sustentan la viabilidad global del sistema de recuperación de calor residual para la línea de extrusión de alimento balanceado estudiada. La propuesta satisface los criterios técnicos de factibilidad, genera ahorros energéticos cuantificables y produce indicadores financieros favorables bajo distintos supuestos de operación, configurándose como una inversión estratégicamente justificada dentro de una política de eficiencia energética industrial (ISO 50001, 2018; IEA, 2023).

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y APLICACIONES

4.1. Conclusiones generales

El análisis energético realizado en la línea de extrusión de alimento balanceado permitió identificar que el condensado generado por el sistema de vapor posee un importante potencial de recuperación térmica, debido a sus condiciones operativas. Estas condiciones evidencian la existencia de energía residual actualmente desaprovechada dentro del proceso industrial.

El diagnóstico técnico demostró que el envío directo del condensado caliente hacia el sistema general de retorno representa una ineficiencia energética significativa, ya que incrementa la demanda de vapor de reposición y el consumo específico de combustible, afectando directamente los costos operativos y el desempeño térmico global del sistema.

La propuesta de integración de un tanque de vaporización flash junto con un intercambiador de calor constituye una alternativa técnicamente viable para el aprovechamiento del calor residual del condensado. El sistema permite transferir energía térmica hacia el agua de proceso.

El balance energético desarrollado permitió estimar una recuperación térmica aproximada de 333,6 kW térmicos, demostrando que el sistema propuesto puede mejorar significativamente la eficiencia energética de la línea de extrusión mediante la reutilización de energía actualmente desperdiciada.

Desde el punto de vista económico, la evaluación financiera evidenció que la recuperación energética genera ahorros operativos estimados en aproximadamente USD 45.000 anuales bajo una operación de 2.000 horas por año, lo que respalda la factibilidad financiera del proyecto y su potencial para reducir costos asociados a la generación de vapor y consumo energético.

El estudio permitió concluir que la gestión de estrategias de recuperación de calor residual en procesos de extrusión industrial no solo mejora el rendimiento térmico y el desempeño operativo, sino que también contribuye a una gestión más sostenible de los recursos térmicos, reduciendo indirectamente la demanda de combustible y el impacto ambiental asociado al uso intensivo de energía térmica.

La investigación demostró que la aplicación de metodologías de análisis técnico, energético, económico y de gestión de riesgos proporciona una base sólida para la toma de decisiones relacionadas con proyectos de optimización térmica industrial, estableciendo un modelo de evaluación aplicable a otros sistemas productivos que operan con vapor y generación de condensados calientes.

4.2. Conclusiones específicas

4.2.1. Análisis del cumplimiento de los objetivos de la investigación

Con el desarrollo de la presente investigación se logró cumplir el objetivo general planteado, enfocado en evaluar la viabilidad técnica, económica y de riesgos de un sistema de

aprovechamiento de calor residual dentro del proceso de extrusión de alimento balanceado. A través del análisis realizado, fue posible demostrar que el condensado generado durante el proceso representa una fuente importante de energía térmica que actualmente no está siendo aprovechada de manera eficiente.

En relación con el primer objetivo específico, se logró identificar las condiciones energéticas y parámetros termodinámicos del sistema de extrusión, permitiendo determinar que el condensado generado posee características adecuadas para su aprovechamiento térmico. El análisis desarrollado permitió evidenciar que parte de la energía suministrada al proceso se pierde al retornar el condensado directamente al sistema sin una recuperación previa de su calor residual.

Respecto al segundo objetivo específico, se consiguió determinar el potencial de recuperación energética del sistema mediante el análisis del flujo de condensado y del vapor flash generado en el proceso. Los resultados obtenidos permitieron comprobar que existe una oportunidad real de reutilizar esta energía dentro de la línea de producción, contribuyendo a disminuir el consumo de vapor y mejorar la eficiencia térmica del sistema.

En cuanto al tercer objetivo específico, se planteó una solución técnica basada en la incorporación de un tanque de vaporización instantánea y un intercambiador de calor, con el objetivo de aprovechar el calor residual del condensado para elevar la temperatura del agua de proceso antes de su ingreso al extrusor. Esta propuesta permitió demostrar técnicamente que es posible optimizar el desempeño energético del sistema mediante la recuperación térmica.

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

De igual manera, en relación con el cuarto objetivo específico, el análisis financiero desarrollado permitió determinar que la implementación del sistema presenta viabilidad económica debido a los ahorros energéticos proyectados y a la reducción de costos operativos asociados al consumo de energía térmica. Los resultados obtenidos evidenciaron que el proyecto puede representar beneficios económicos sostenibles para el proceso productivo.

Finalmente, respecto al análisis de riesgos, se identificaron factores técnicos, operativos y económicos que podrían influir durante la implementación y operación del sistema; sin embargo, el estudio permitió determinar que estos riesgos pueden ser gestionados mediante una adecuada planificación y control operativo. En este sentido, se concluye que la propuesta desarrollada presenta condiciones favorables para su implementación desde una perspectiva técnica, económica y operativa.

4.2.2. Contribución a la gestión empresarial

La presente investigación favorece significativamente al gerenciamiento de recursos al demostrar que la implementación de sistemas de recuperación de calor residual en procesos industriales de extrusión permite optimizar el uso de los recursos energéticos, reducir costos operativos y fortalecer la sostenibilidad organizacional. El estudio evidencia que el aprovechamiento del condensado caliente generado en el proceso de extrusión constituye una oportunidad estratégica para incrementar la eficiencia térmica y mejorar el desempeño operativo de la planta industrial.

Desde la perspectiva de la gestión empresarial, el proyecto aporta herramientas

técnicas y financieras que facilitan la toma de decisiones orientadas a la eficiencia energética

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

y a la competitividad industrial. La propuesta de incorporar un tanque de vaporización instantánea y un intercambiador de calor especializado permite reutilizar energía residual que anteriormente era desaprovechada, logrando disminuir el consumo de vapor de reposición y reduciendo la dependencia de fuentes energéticas externas. Esto representa una mejora directa en la administración de costos de producción y en la optimización de los flujos de trabajo.

El estudio demuestra que la recuperación térmica genera beneficios económicos sostenibles, considerando que el sistema propuesto permitirá recuperar aproximadamente 1.197,13 MJ/h, generando ahorros operativos estimados en USD 45.910 anuales. Estos resultados fortalecen la viabilidad financiera del proyecto y evidencian que las inversiones en eficiencia energética pueden convertirse en mecanismos estratégicos para mejorar la rentabilidad empresarial y la recuperación del capital invertido.

La investigación también aporta a la gestión empresarial mediante la incorporación de criterios de administración de riesgos, evaluación financiera y sostenibilidad operativa, alineados con enfoques modernos de dirección de proyectos y eficiencia energética industrial.

La integración de análisis técnicos, económicos y operativos permite establecer una visión integral para la toma de decisiones gerenciales, facilitando la planificación de inversiones industriales con menor incertidumbre y mayor control sobre el desempeño organizacional.

Este trabajo contribuye al fortalecimiento de modelos empresariales sostenibles,

promoviendo prácticas industriales responsables con el medio ambiente y orientadas a la reducción del consumo energético. La propuesta desarrollada no solo mejora la eficiencia del proceso productivo, sino que también impulsa una cultura organizacional enfocada en la innovación, la optimización continua y la sostenibilidad, elementos fundamentales para incrementar la competitividad de las empresas industriales en entornos cada vez más exigentes y orientados a la eficiencia de recursos.

4.2.3. Contribución a nivel académico

El desarrollo del presente trabajo de titulación representó una experiencia académica y profesional enriquecedora para todos los integrantes del grupo, ya que permitió integrar y aplicar conocimientos adquiridos durante la formación de maestría en un contexto industrial real, orientado a la eficiencia energética y la optimización de procesos.

A lo largo de la investigación y elaboración del proyecto, se fortalecieron competencias relacionadas con el análisis técnico, la evaluación de alternativas de mejora, la interpretación de información operativa y la gestión de proyectos aplicada al entorno industrial. Asimismo, el trabajo realizado permitió comprender de manera más integral la importancia del aprovechamiento eficiente de los recursos energéticos y su impacto tanto operativo como económico dentro de los procesos productivos.

4.2.4. Contribución a nivel personal

La realización de este proyecto impulsó el desarrollo de habilidades de trabajo

colaborativo, coordinación y comunicación entre los integrantes del equipo, permitiendo una adecuada distribución de responsabilidades y el cumplimiento de los objetivos planteados dentro de los tiempos establecidos.

Esta experiencia contribuyó al crecimiento profesional y personal de cada integrante, fortaleciendo capacidades de análisis, organización, criterio técnico y resolución de problemas. También permitió reforzar valores como la responsabilidad, el compromiso y la importancia del aprendizaje continuo para enfrentar desafíos dentro del ámbito profesional e industrial.

Finalmente, este trabajo no solo representó la culminación de una etapa académica, sino también una oportunidad para desarrollar una visión más práctica y estratégica sobre la gestión de proyectos de eficiencia energética y su aplicación en la industria.

4.3. Limitaciones a la Investigación

El análisis energético realizado se basó en registros técnicos proporcionados por la operación industrial, por lo que la validez obtenida está asociada directamente con el desempeño de los dispositivos de medición y de la calidad de los datos históricos disponibles. Posibles desviaciones en sensores de presión, temperatura o caudal podrían influir en los balances térmicos desarrollados (Sons, 2016).

Asimismo, el análisis económico fue desarrollado bajo supuestos financieros específicos relacionados con costos energéticos, horas de operación y condiciones de mercado vigentes durante el periodo de estudio. Cualquier escenario futuro de costos o tarifas

Nota sobre derechos de autor: Este trabajo y lo que a continuación se expone solo tiene una validez académica, quedando copia de éste en la biblioteca digital de UIDE y EIG. La distribución y uso de este trabajo por parte de alguno de sus autores con otros fines deberá ser informada a ambas Instituciones, a los directores del Máster y resto de autores, siendo responsable aquel que se atribuya dicha distribución.

energéticas podría alterar los indicadores financieros proyectados, tales como el ROI y Payback del proyecto (Yunus A. Cengel, 2019).

Finalmente, la investigación se delimitó exclusivamente al análisis de recuperación de calor residual en una línea de extrusión de alimento balanceado, sin incluir otras áreas térmicas de la planta que también podrían representar oportunidades adicionales de recuperación energética.

A pesar de estas limitaciones, el proyecto tiene una base técnica y metodológica sólida para futuras etapas de ingeniería conceptual, validación experimental e integración de recuperación de energía térmica en procesos industriales.

5. BIBLIOGRAFÍA

Blank, L., & Tarquin, A. (2018). *Ingeniería económica* (8.^a ed.). McGraw-Hill Education.

Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2020). *Principles of corporate finance* (13th ed.). McGraw-Hill Education.

CORDIS. (2021). *Waste heat recovery systems in industrial processes*. Comisión Europea.

International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. IEA Publications.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 50001:2018. Energy management systems—Requirements with guidance for use*. ISO.

Klemeš, J. J. (Ed.). (2013). *Handbook of process integration (PI): Minimisation of energy and water use, waste and emissions*. Woodhead Publishing.

Laire, J., Fiallos, M., & Aguilera, P. (2018). *Evaluación energética de sistemas de recuperación térmica en procesos industriales*.

Marquez, J., et al. (2020). *Optimización energética en procesos térmicos industriales*.

Ministerio para la Transición Ecológica. (2021). *Estrategias de eficiencia energética y aprovechamiento de calor residual en la industria*. Gobierno de España.

- Osorio, J. (2020). *Análisis de recuperación de calor en sistemas de vapor industriales*.
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)* (7th ed.). Project Management Institute.
- Riaz, M. N. (2000). *Extruders in food applications*. Technomic Publishing Company.
- Ruiz, R. (2003). *Procesos de extrusión en alimentos balanceados*.
- Sapag, N., Sapag, R., & Sapag, J. M. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Shapiro, H. N. (2015). *Engineering thermodynamics* (9th ed.). Wiley.
- Sons, J. W. (2016). *Advanced engineering thermodynamics*. Wiley.
- Spirax Sarco Limited. (2008). *Steam engineering tutorials: Flash steam recovery*. Spirax Sarco.
- Thumann, A., & Mehta, D. P. (2020). *Handbook of energy audits* (9th ed.). Fairmont Press.
- Villacorta, R. (2021). *Evaluación financiera de proyectos industriales*.
- Yunus A. Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.