

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**



**“Impacto del recalentamiento en cascada con hornos de inducción
en la mejora de los indicadores energéticos del proceso de
calentamiento de palanquillas”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA**

AUTORES:

Bach. Guevara Bolaños, Alexandra
Bach. García Llajaruna, Dino Pedro Agustín

ASESOR:

Mg. Robert F. Guevara Chinchayan

Nuevo Chimbote – Perú

Abril 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis para Título ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando en cuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D: N°492-2017-CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN ENERGÍA

Impacto del recalentamiento en cascada con hornos de inducción en la mejora de los indicadores energéticos del proceso de calentamiento de palanquillas

AUTORES : Bach. Guevara Bolaños, Alexandra
Bach. García Llajaruna, Dino Pedro Agustín

Mg. Guevara Chinchayan, Robert Fabián
DNI: 32788460
CÓD. ORCID: 0000-0002-3579-3771

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN
ENERGÍA



CARTA DE CONFORMIDAD DEL JURADO

El presente jurado evaluador da la conformidad del presente informe, desarrollado en el cumplimiento del objetivo propuesto y presentado conforme al Reglamento General para obtener el grado Académico de Bachiller y Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.D. N° 580-2022-CU-R-UNS); titulado:

“Impacto del recalentamiento en cascada con hornos de inducción en la mejora de los indicadores energéticos del proceso de calentamiento de palanquillas”

AUTORES : Bach. Guevara Bolaños, Alexandra
Bach. García Llajaruna, Dino Pedro Agustín

Revisado y evaluado por el siguiente Jurado Evaluador:

Mg. Benites Villegas, Héctor Domingo
PRESIDENTE
DNI: 17821639
CÓD. ORCID 0000-0002-8809-6371

Mg. Guevara Chinchayan, Robert Fabian
SECRETARIO
DNI: 32788460
CÓD. ORCID 0000-0002-3579-3771

M.Sc. Escate Ravello, Julio Hipólito Néstor
INTEGRANTE
DNI: 32850228
CÓD. ORCID 0000-0001-9950-2999



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERIA
Dirección E.P. de Ingeniería en Energía

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

El día jueves 25 del mes de abril del año dos mil veinticuatro, siendo las 11:00 a.m. en el Aula E-3 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, en cumplimiento al Art. 68 del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado con Resolución N°337-2024-CU-R-UNS de fecha 12.04.24, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 042-2024-UNS-CFI** de fecha 10.01.24, integrado por los siguientes docentes:

- Ms. Héctor Domingo Benites Villegas : Presidente
- Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán : Secretario
- M.Sc. Julio Hipólito Néstor Escate Ravello : Integrante

Y según la **Resolución Decanal N°184-2024-UNS-FI** de fecha 17.04.24 se **DECLARA EXPEDITO** a la bachiller para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis, titulada: **“RECALENTAMIENTO EN CASCADA CON HORNO DE INDUCCIÓN EN LA MEJORA DE LOS INDICADORES ENERGÉTICOS DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO DE PALANQUILLAS”**, perteneciente a la bachiller: **GUEVARA BOLAÑOS ALEXANDRA** con código de matrícula N°0201611011, teniendo como asesor al docente **Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán**, según Resolución Decanal N° 431-2023-UNS-FI de fecha 23.06.23.

Terminada la sustentación de la Bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
GUEVARA BOLAÑOS ALEXANDRA	18	BUENO

Siendo las 11:40 a.m. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Ms. Héctor Domingo Benites Villegas
PRESIDENTE


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán
SECRETARIO


M.Sc. Julio Hipólito Néstor Escate Ravello
INTEGRANTE



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

El día jueves 25 del mes de abril del año dos mil veinticuatro, siendo las 11:00 a.m. en el Aula E-3 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, en cumplimiento al Art. 68 del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado con Resolución N°337-2024-CU-R-UNS de fecha 12.04.24, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 042-2024-UNS-CFI** de fecha 10.01.24, integrado por los siguientes docentes:

- Ms. Héctor Domingo Benites Villegas : Presidente
- Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán : Secretario
- M.Sc. Julio Hipólito Néstor Escate Ravello : Integrante

Y según la **Resolución Decanal N°184-2024-UNS-FI** de fecha 17.04.24 se **DECLARA EXPEDITO** al bachiller para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis, titulada: **"RECALENTAMIENTO EN CASCADA CON HORNOS DE INDUCCIÓN EN LA MEJORA DE LOS INDICADORES ENERGÉTICOS DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO DE PALANQUILLAS"**, perteneciente al bachiller: **GARCÍA LLAJARUNA DINO PEDRO AGUSTÍN** con código de matrícula N°0201611023, teniendo como asesor al docente **Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán**, según Resolución Decanal N° 431-2023-UNS-FI de fecha 23.06.23.

Terminada la sustentación del Bachiller, respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
GARCÍA LLAJARUNA DINO PEDRO AGUSTÍN	18	BUENO

Siendo las 11:40 a.m. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Ms. Héctor Domingo Benites Villegas
PRESIDENTE


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán
SECRETARIO


M.Sc. Julio Hipólito Néstor Escate Ravello
INTEGRANTE



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: RS / ASESORES +51 979 997 788
Título del ejercicio: SIN REPOSITORIO
Título de la entrega: INFORME FINAL DE TESIS - GUEVARA - GARCIA.pdf
Nombre del archivo: INFORME_FINAL_DE_TESIS_-_GUEVARA_-_GARCIA.pdf
Tamaño del archivo: 3.71M
Total páginas: 100
Total de palabras: 20,149
Total de caracteres: 107,138
Fecha de entrega: 03-may.-2024 12:06p. m. (UTC+0700)
Identificador de la entrega... 2369579803

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



"IMPACTO DEL RECALENTAMIENTO EN CASCADA CON HORNOS DE
INDUCCIÓN EN LA MEJORA DE LOS INDICADORES ENERGÉTICOS
DEL PROCESO DE CALENTAMIENTO DE PALANQUILLAS"

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA

AUTORES:

BACH. GUEVARA BOLAÑOS ALEXANDRA
BACH. GARCIA LLAJARUNA DINO PEDRO AGUSTIN

ASESOR:

MG. ROBERT F. GUEVARA CHINCHAYAN

NUEVO CHIMBOTE - PERÚ

ABRIL 2024

INFORME FINAL DE TESIS - GUEVARA - GARCIA.pdf

INFORME DE ORIGINALIDAD

21 %	20 %	1 %	2 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	10 %
2	www.researchgate.net Fuente de Internet	1 %
3	www.academia.edu Fuente de Internet	1 %
4	itscv.edu.ec Fuente de Internet	1 %
5	idoc.tips Fuente de Internet	1 %
6	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	1 %
7	www.cepis.ops-oms.org Fuente de Internet	<1 %
8	www.itc.mx Fuente de Internet	<1 %
9	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1 %

DEDICATORIA

A mi mamá y abuela

Elizabeth Bolaños y Zenaida Avalos

quienes me enseñaron el valor del

esfuerzo y la perseverancia, por guiarme

en los buenos caminos de la vida, ser mi ejemplo,

y por ser mi fuente inagotable de motivación.

Por su cariño, amor y comprensión.

A la memoria de Denis Condori

quien siempre creyó en mí

y me inspira desde el cielo.

A.G.B.

DEDICATORIA

A mis queridos padres
Rosa Llajaruna y Tomas Matta
por su apoyo incondicional,
su comprensión y los valores inculcados.

D.P.A.G.LL.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis docentes de la EPIE
cuya sabiduría ha iluminado mi camino académico.

A mis compañeros, por compartir risas,
desafíos y éxitos. Este logro es un reflejo
de nuestro esfuerzo conjunto.

A.G.B.

AGRADECIMIENTO

A nuestro asesor Robert Guevara
por sus conocimientos y orientación.

También agradecer a los ingenieros Marlon Alegre y

Eder Sanchez por sus consejos y
conocimientos para culminar esta Tesis.

D.P.A.G.LL.

INDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	iii
ABSTRACT	xii
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Realidad problemática.....	2
1.2. Antecedentes.	2
1.3. Justificación.....	5
1.4. Hipótesis.....	6
1.5. Objetivos	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Definición y Clasificación de los Hornos Industriales	8
2.1.1. Definición de un Horno.....	8
2.1.2. Elementos que conforman un Horno.....	8
2.1.3. Clasificación de los Hornos Según su Fuente de Energía	8
2.2. Tipos de Hornos para Recalentamiento de Palanquillas	14
2.2.1. Hornos Walking Hearth / Beam	14
2.2.2. Hornos de Empuje	15
2.3. Propiedades del Calentamiento por Inducción.....	16
2.4. Aplicaciones del calentamiento por inducción.....	16
2.5. Balance de energía en hornos de calentamiento de empuje	17
2.5.1. Calores entrantes al horno en el balance de energía.....	17
2.5.2. Calores salientes del horno en el balance de energía	19
2.6. Indicadores de desempeño energético aplicado a hornos:.....	21
2.6.1. Nivel de Producción (NP):	22
2.6.2. Indicador de Desempeño Energético Técnico (IDEs T):.....	22
2.6.3. Indicador de desempeño energético Ambiental (IDEs A):.....	22
2.6.4. Indicador de desempeño energético económico (IDEs E):	22
2.7. Conducción de calor en régimen transitorio.....	22
2.7.1. Número de Biot	23
2.7.2. Número de Fourier	23
2.7.3. Diagramas de Heisler	24
2.8. Parámetros Financieros para el Cálculo de Retorno	24
2.8.1. TIR	24

2.8.2.	VAN	24
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....		25
3.1.	Materiales.....	26
3.1.1.	Horno de Recalentamiento a Gas.....	26
3.1.2.	Hornos de Inducción	26
3.2.	Métodos.....	27
3.2.1.	Métodos de la Investigación.....	27
3.2.2.	Diseño de la Investigación	27
3.2.3.	Población y Muestra.....	27
3.2.4.	Técnicas, Instrumentos o fuentes para la obtención de datos.....	28
3.2.5.	Tratamiento de la Información	28
3.2.6.	Técnicas de Procedimiento y Análisis de los Resultados.....	28
CAPÍTULO IV: CÁLCULOS.....		29
4.1.	Balance de Energía en condiciones actuales del proceso.....	30
4.1.1.	Consideraciones previas.....	30
4.1.2.	Flujo de calor entrante al horno.....	30
4.1.3.	Flujo de calor saliente del horno	32
4.1.4.	Indicadores de Desempeño Energético	36
4.2.	Situación propuesta con Hornos de Inducción	38
4.2.1.	Consideraciones previas.....	38
4.2.2.	Dimensionamiento con 01 módulo inductor	39
4.2.3.	Dimensionamiento con 02 módulos inductores	45
4.2.4.	Dimensionamiento con 03 módulos inductores	49
4.2.5.	Indicadores de Desempeño Energético	54
4.3.	Evaluación Económica y Cuantificación de Beneficios.....	56
4.3.1.	Alternativa A: Horno OFU Existente + Hornos de Inducción	57
4.3.1.1.	Cuantificación de Beneficios – Alternativa A.....	57
4.3.1.2.	Evaluación del VAN, TIR y Tiempo De Retorno de la Inversión	59
4.3.2.	Alternativa B: Horno Nuevo a Gas 60 Ton.....	61
4.3.2.1.	Cuantificación de Beneficios – Alternativa B.....	61
4.3.2.2.	Evaluación del VAN, TIR y Tiempo De Retorno de la Inversión	62
4.3.3.	Comparación Financiera de Alternativas	64
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		65
5.1.	Resultados	66

5.1.1.	Dimensionamiento óptimo	66
5.1.2.	Optimización de Indicadores de Desempeño Energético	66
5.2.	Discusiones	67
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		68
6.1.	Conclusiones	69
6.2.	Recomendaciones.....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		71
ANEXOS		73

INDICE DE FIGURAS

Figura 01. Alto Horno de Sestao	9
Figura 02. Horno de Crisol.....	10
Figura 03. Hornos Rotativos	11
Figura 04. Hornos de Inducción para Recalentamiento de Palanquillas de Acero.....	13
Figura 05. Horno de Arco Eléctrico y Captadora de Humos	14
Figura 06. Horno Walking Hearth – Beam	15
Figura 07. Horno Tipo Empuje	16
Figura 08. Flujo de calor para el balance en horno de palanquillas	21
Figura 9. Diagrama eléctrico esquemático de un Hornos Inductor	27
Figura 10. Calentador de aire con gases de la combustión	34
Figura 11. Diagrama de flujo de la situación actual del proceso.....	39
Figura 12. Diagrama de flujo temperaturas 01 H.I.....	40
Figura 13. Diagrama de flujo proceso con H.I.....	41
Figura 14. Diagrama de flujo del balance de energía con 01 H.I.....	45
Figura 15. Diagrama de flujo temperaturas 02 H.I.....	46
Figura 16. Diagrama de flujo proceso con 02 H.I.....	46
Figura 17. Diagrama de flujo del balance de energía con 02 H.I.....	49
Figura 18. Diagrama de flujo temperaturas 03 H.I.....	49
Figura 19. Diagrama de flujo proceso con 03 H.I.....	50
Figura 20. Diagrama de flujo del balance de energía.....	53
Figura 21. Espacio ocupado por los Hornos Inductores.....	53
Figura 22. Espesor de Oxidación vs tiempo en acero con bajo contenido de carbono a diferentes temperaturas	57
Figura 23. Diagrama de Flujo de Caja – Alternativa A.....	60
Figura 24. Diagrama de Flujo de Caja – Alternativa B.....	63

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Parámetros del proceso de recalentamiento de palanquillas.	30
Tabla 2.	Cálculo flujo de calor por reacción del combustible	31
Tabla 3.	Cálculo flujo de calor sensible por temperatura del combustible	31
Tabla 4.	Cálculo flujo de calor sensible del aire de combustión	31
Tabla 5.	Cálculo flujo de calor por reacciones exotérmicas.....	32
Tabla 6.	Cálculo flujo de calor entrante	32
Tabla 7.	Cálculo flujo de calor útil en el horno.....	32
Tabla 8.	Cálculo del flujo másico de los gases.....	33
Tabla 9.	Cálculo de la temperatura de los gases en la chimenea.....	33
Tabla 10.	Cálculo del flujo de calor perdido por gases de la combustión.....	34
Tabla 11.	Cálculo del flujo de calor perdido por el agua de refrigeración	35
Tabla 12.	Cálculo de pérdidas de calor por unidad de superficie.....	35
Tabla 13.	Cálculo del flujo de calor perdido a través de las paredes	35
Tabla 14.	Cálculo del flujo de calor perdido por puertas abiertas.....	36
Tabla 15.	Cálculo de otras pérdidas de calor.....	36
Tabla 16.	Cálculo del flujo de calor saliente	36
Tabla 17.	Cálculo de la eficiencia del horno	37
Tabla 18.	Cálculo del Nivel de Producción.....	37
Tabla 19.	Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Técnico	37
Tabla 20.	Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Ambiental	38
Tabla 21.	Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Económico	38
Tabla 22.	Parámetros del proceso de recalentamiento y laminación.....	39
Tabla 23.	Parámetros del Horno de Inducción	39
Tabla 24.	Cálculo de la producción propuesta del horno de recalentamiento.....	40
Tabla 25.	Cálculo de la temperatura de palanquilla al ingreso del H.I	40
Tabla 26.	Cálculo del número de Biot y del número de Fourier	41
Tabla 27.	Cálculo de la temperatura mínima de la palanquilla a la salida del H.R.....	42
Tabla 28.	Cálculo de flujo de calor útil necesario en el H.R. con 01 H.I.....	43
Tabla 29.	Cálculo de la temperatura de salida de la palanquilla en el H.R	43
Tabla 30.	Cálculo del tiempo de permanencia de la palanquilla en el H.R.....	44
Tabla 31.	Cálculo de la temperatura de ingreso de la palanquilla al H.I.....	44
Tabla 32.	Cálculo de la temperatura de salida de la palanquilla del Horno Inductor.....	45
Tabla 33.	Margen de calor útil en el H.R. con 01 H.I	45

Tabla 34. Cálculo de la temperatura ideal de ingreso al primer módulo.....	46
Tabla 35. Cálculo de la temperatura mínima de salida de la palanquilla en el H.R.....	47
Tabla 36. Cálculo de flujo de calor útil necesario en el H.R.....	47
Tabla 37. Cálculo de la temperatura de ingreso de la palanquilla al primer módulo	48
Tabla 38. Cálculo de temperaturas de ingreso y salida en los Hornos Inductores	48
Tabla 39. Margen de calor útil en el H.R. con 02 H.I.....	49
Tabla 40. Cálculo de la temperatura ideal de ingreso al primer módulo.....	50
Tabla 41. Cálculo de la temperatura mínima de salida de la palanquilla en el H.R.....	51
Tabla 42. Cálculo de flujo de calor útil necesario en el H.R. con 03 H.I.....	51
Tabla 43. Cálculo de la temperatura de ingreso de la palanquilla al primer módulo	52
Tabla 44. Cálculo de temperaturas de ingreso y salida en los Hornos Inductores	52
Tabla 45. Margen de calor útil en el H.R. con 03 H.I.....	53
Tabla 46. Cálculo de la velocidad y el tiempo expuesto en los H.I	54
Tabla 47. Cálculo de la velocidad y el tiempo expuesto en los H.I	54
Tabla 48. Cálculo de la eficiencia del Horno	55
Tabla 49. Cálculo del Nivel de Producción.....	55
Tabla 50. Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Técnico	55
Tabla 51. Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Ambiental	56
Tabla 52. Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Económico	56
Tabla 53. Parámetros para el Cálculo del Beneficio 01 – Alternativa A	57
Tabla 54. Parámetros para el Cálculo del Beneficio 02 – Alternativa A	58
Tabla 55. Parámetros para el Cálculo del Beneficio por Incremento de Consumo Eléctrico – Alternativa A.....	58
Tabla 56. Inversión Estimada Hornos de Inducción	59
Tabla 57. Flujo de Caja – Alternativa A.	60
Tabla 58. Parámetros Financieros – Alternativa A.	60
Tabla 59. Tasa de Impuestos Considerados – Alternativa A.	61
Tabla 60. Parámetros para el Cálculo del Beneficio 01 – Alternativa B.....	61
Tabla 61. Inversión Estimada de un Horno a Gas 60 Ton.	62
Tabla 62. Flujo de Caja – Alternativa B.....	63
Tabla 62. Parámetros Financieros – Alternativa B.....	63
Tabla 63. Tasa de Impuestos Considerados – Alternativa B.....	63
Tabla 64. Evaluación del dimensionamiento ideal con Hornos Inductores	66
Tabla 65. Resultado de la optimización de los indicadores de desempeño energético	66

RESUMEN

La investigación se orienta a evaluar el efecto de la implementación de hornos de inducción trabajando en cascada con un horno de recalentamiento tradicional para cubrir el crecimiento proyectado de un tren laminador en la industria siderúrgica. El tipo de investigación según el nivel de profundización en el objeto de estudio es descriptivo.

Se realizó un balance de energía en un horno de recalentamiento tradicional en condiciones normales, se diagnosticó los indicadores de desempeño energético y se determinó los beneficios tangibles de la implementación de hornos de inducción, realizando un nuevo balance energético junto con su análisis de factibilidad respectivo.

Para incrementar la capacidad nominal del horno de 42,52 a 57,30 toneladas/hora y se cumplan las condiciones para la laminación de la carga se propuso instalar 3 hornos inductores de 2MW cada uno, ubicados a 2m antes de la 1era caja de laminación. Este dimensionamiento permite que el flujo de calor útil en el horno de recalentamiento tenga un margen de 216,83 KW y que la carga llegue al laminador con una temperatura de 1 141,71 °C que si bien no se encuentra en el margen de los 1 100 – 1 110°C es una temperatura aceptable para su laminación ya que en la práctica la carga mantiene una uniformidad de 40°C.

Con el incremento de la capacidad utilizando hornos de inducción, los indicadores de desempeño en el horno de recalentamiento se optimizaron es un 27%. Se redujo el consumo de gas natural a 10,07 m³ de gas natural por tonelada de acero, las emisiones se redujeron a 0,0222 toneladas de CO₂ por toneladas de acero recalentado y la facturación por consumo de gas natural se redujo a 4,52 US\$ por toneladas de acero recalentado (IDEs E).

La investigación propuesta tuvo como beneficio 2 934 kUS\$/año, con una inversión de 4 285 kUS\$ y un retorno de 3,75 años, considerando dentro del retorno 02 años para las etapas del desarrollo de la ingeniería, ejecución y montaje del proyecto.

Palabras claves: Hornos de Recalentamiento, Hornos de Inducción, balance energético, indicadores de desempeño.

ABSTRACT

The research is aimed at evaluating the effect of the implementation of induction furnaces working in sequence with a traditional reheating furnace to cover the projected growth of a rolling mill in the steel industry. The type of research according to the level of depth in the object of study is descriptive.

An energy balance was carried out in a traditional reheating furnace under normal conditions, the energy performance indicators were diagnosed and the tangible benefits of the implementation of induction furnaces were determined, carrying out a new energy balance with its respective feasibility analysis.

To increase the nominal capacity of the furnace from 42,52 to 57,30 tons/hour and to meet the conditions for the lamination of the load, it was proposed to install 3 inductor furnaces of 2MW each, located 2m before the 1st stand. This dimensioning allows the useful heat flow in the reheating furnace to have a margin of 216,83 KW and for the load to reach the rolling mill with a temperature of 1 141,71 °C, which, although it is not in the range of 1 100-1 110°C, is an acceptable temperature for its lamination, since in practice the load maintains a uniformity of 40°C.

With the increase in capacity using induction furnaces, the key performance indicators in the reheating furnace were optimized by 27%. Natural gas consumption was reduced to 10,07 m³ of natural gas per ton of reheated steel, emissions were reduced to 0,0222 tons of CO₂ per ton of reheated steel, and natural gas consumption billing was reduced to 4,52 US\$ per ton of reheated steel.

The proposed research had a benefit of 2 934 kUS\$/year, with an investment of 4 285 kUS\$ and a return of 3,75 years, considering within the return 02 years for the stages of development of the engineering, execution, and assembly of the project.

Keywords: Reheating Furnaces, Induction Furnaces, Energy Balance, Key Performance Indicators.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Actualmente, las empresas siderúrgicas están aumentando significativamente su producción debido a la creciente demanda de acero y, a medida que las fábricas aumentan la producción, se enfrentan a grandes desafíos en términos de eficiencia energética e impacto ambiental. Las plantas siderúrgicas necesitan abastecerse de energía en cantidades suficientes para sostener la producción a gran escala, mientras buscan formas de minimizar el impacto ambiental asociado con el consumo de fuentes de energía no renovables.

Esta realidad problemática se ve exacerbada por la dependencia de la planta siderúrgica de combustibles fósiles para alimentar sus hornos y generar el calor necesario para el proceso. Estos combustibles fósiles emiten grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y otros contaminantes ambientales, lo que contribuye al calentamiento global y la contaminación del aire.

Para abordar esta problemática, las plantas siderúrgicas deben tomar medidas para mejorar la eficiencia energética y utilizar energía limpia y renovable en sus procesos de producción, lo que aumenta la presión sobre los recursos energéticos disponibles y los costos asociados. Una posible solución puede ser una tecnología más avanzada, como los hornos de recalentamiento eléctricos, que utilizan energía renovable en lugar de combustibles fósiles para generar calor. Estos hornos eléctricos pueden reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire, al tiempo que proporcionan una mayor eficiencia energética mediante un mejor aprovechamiento del calor generado en el proceso.

Teniendo en cuenta todos estos factores, existe la oportunidad de aumentar la capacidad y la producción a través de tecnologías más limpias y eficientes, como el uso de hornos de inducción en acompañamiento de los hornos tradicionales a gas, dentro de una empresa siderúrgica para el recalentamiento de palanquillas.

Formulamos el siguiente problema:

¿Cuál es el impacto del recalentamiento en cascada con hornos de inducción en la mejora de los indicadores energéticos del proceso de calentamiento de palanquillas?

1.2. Antecedentes.

Se presentan los siguientes antecedentes en la tesis:

- ✓ Díaz, Y. (2012) en su investigación titulada “Diseño del Horno de Inducción con vistas a Laminación Continua de la Palanquilla de Acero”, tuvo como objetivo establecer los parámetros principales de un horno de inducción a partir del balance térmico que permita garantizar la laminación continua del acero. Se examinaron los aspectos fundamentales relacionados con los hornos de inducción, el proceso de laminación y el calentamiento por inducción. Se presentaron los cálculos correspondientes a los principales parámetros de un horno de inducción para calentamiento. Además, se llevó a cabo una evaluación medioambiental y económica de estos hornos. Se desarrolló un diseño para un horno de inducción con dimensiones de 6x0,5x0,5 metros. Se determinó que la temperatura máxima de trabajo del horno alcanzaba los 1923°C, y se calculó que se requería una potencia de 2756 kW. La implementación del horno de inducción en el proceso de laminación continua de acero permitió reducir el costo de producción energética en 104,968 CUC por cada tonelada de acero fabricada.

- ✓ González et al. (2013) en su investigación titulada “Diseño y construcción de bobinas de calentamiento para hornos de inducción Electromagnética”, el propósito fue construir y probar una bobina de inducción diseñada para la fundición de volúmenes reducidos de titanio en una atmósfera inerte o en el vacío. Se llevó a cabo una simulación y reproducción del proceso de calentamiento inductivo en una atmósfera inerte, controlando cuidadosamente las variables involucradas en el diseño y los aspectos físicos y químicos del sistema. Como resultado, se desarrolló una bobina tipo solenoide con una sección transversal rectangular, optimizada para lograr una mayor superficie de acoplamiento magnético y refrigerada internamente mediante agua. La cámara de fundición operó de acuerdo con los parámetros de diseño, lo cual se evidenció en las bajas temperaturas registradas en el exterior del tubo de cuarzo y en la superficie de la bobina de inducción. A pesar de las dificultades con la fuente de energía, se logró alcanzar una temperatura de 1105°C utilizando solo el 60% de la potencia máxima disponible.

- ✓ Radas, A. y Urcia, E. (2022) en su tesis titulada “Efecto de un Sistema de Precalentamiento de Carga en los Indicadores Energéticos del Horno de Palanquillas de la Empresa Siderperu”, tuvo como objetivo determinar la influencia del sistema de precalentamiento de carga en los indicadores de desempeño energético del horno de palanquillas. Se realizó un balance de energía del horno sin precalentamiento de carga,

luego se dimensionó el sistema de precalentamiento de carga, se realizó un balance de energía incluyendo el precalentador de carga y un benchmarking entre los indicadores de desempeño energético. El efecto de precalentar la carga hasta 70 °C haciendo uso de 4 180 kg/h de gases de la combustión desde 640 °C a 110 °C permitió un incremento de la eficiencia a 86,51 %, mejorando el indicador de desempeño energético en 3,42 % reduciendo el consumo de mensual de gas natural en 42 939 m³ de gas natural, los costos de facturación de gas natural mensual de 13 431 U\$/mes y las emisiones de CO₂ de 79,13 t/mes.

- ✓ Ortega et al. (2015) en su investigación titulada “Sistema de calentamiento por inducción electromagnética para pruebas experimentales en laboratorios de Físico-Química”, tuvo como objetivo diseñar un sistema que utiliza la inducción electromagnética para calentar un recipiente en donde se encuentra el material o solución en estudio, alcanzando temperaturas de hasta 500 °C en 4 minutos para algunas aplicaciones; el sistema cuenta con un control de temperatura y una interfaz gráfica de usuario para monitorear el tiempo en el que alcanzó la temperatura deseada, el tiempo de calentamiento, tiempo de enfriamiento y el historial de pruebas.
- ✓ Garay et al. (2017) en su investigación titulada “Diseño de un Horno de Inducción Magnética”, tuvo como objetivo investigar sobre el funcionamiento de un horno de inducción magnética y diseñar uno que funcione de forma óptima, para aplicaciones industriales, de modo que este trabajo sirva para futuras investigaciones y diseños. Se optó por diseñar el equipo para una carga de acero inoxidable con un punto de fusión de 1375°C y con una potencia de 80kW. Se mostró un sistema electrónico capaz de calentar una pieza sin contacto, de la forma más eficiente posible y tan rápido como la potencia eléctrica lo permite. En cuanto al transformador se eligió uno de aislamiento.
- ✓ Cerquera, N. y Pastrana, E. (2014) en su investigación titulada “Evaluación de la Eficiencia Energética en los Hornos Tradicionales de Curado de Tabaco”, se realizó una evaluación al intercambiador de calor tradicional tipo hornilla para determinar la eficiencia en el uso del combustible. La investigación reveló la considerable dificultad asociada al sistema de transferencia de calor mediante convección natural para mantener temperaturas estables dentro del horno, generando condiciones ambientales que difieren significativamente de las previstas para el proceso. Estas variaciones

fueron fuertemente influenciadas por la frecuencia con la que se carga la hornilla. Además, se descubrió que la eficiencia en la utilización de la energía suministrada por el carbón es inferior al 10%.

- ✓ Quispe, J. (2021), en su tesis titulada “Análisis de los índices energéticos para optimizar el consumo energético en una empresa procesadora de lácteos en la ciudad de Cajamarca”, se plantearon dos mejoras con el objetivo de impactar positivamente en los indicadores energéticos. La primera consistió en la sustitución de los motores actuales por modelos de mayor eficiencia disponibles en el mercado, lo cual resultó en una disminución del 3.85% y 3.98% en los indicadores energéticos. La segunda propuesta implica reemplazar la iluminación fluorescente por iluminación LED, lo que redujo el consumo de energía respecto a la iluminación a la mitad. Sin embargo, esta modificación solo contribuyó con una reducción marginal del 0.48% y 0.47% en los indicadores energéticos, lo cual se consideró pequeño en comparación con la reducción obtenida mediante el cambio de motores.

- ✓ Ionut, G. (2016), en su tesis titulada “Mejoras Energéticas en un Horno Industrial de una Empresa Petroquímica”, se propuso cambios tecnológicos destinados a mejorar la eficiencia energética, entre ellos la recompresión de vapores en la unidad 433 y la instalación de variadores de frecuencia en las bombas de la planta. En términos teóricos, se estimó que el potencial de ahorro económico superaría los cuatro millones de euros, lo que equivaldría a una disminución cercana al 15% en la facturación total de energía.

1.3. Justificación

Debido al constante crecimiento de la demanda del acero, las siderurgias son obligadas a crecer cada vez más en producción, por lo que, se busca la adquisición de nuevas tecnologías que brinden mayor capacidad, pero a su vez considerando obtener mayor eficiencia energética, reduciendo las emisiones contaminantes y optimizando procesos de calentamiento en dicha industria.

Es por ello, que nuestra investigación, propone evaluar hornos de inducción como tecnología en acompañamiento de los hornos de recalentamiento de palanquillas ya existentes en las siderurgias y poder garantizar un calentamiento uniforme y controlado de las palanquillas.

El cual, es una de las alternativas más viable y económica para el incremento de capacidad de los hornos y así acompañar el crecimiento de producción de los trenes laminadores. Además, pueden contribuir a la reducción de costos operativos, el ahorro de energía y la mejora de la calidad del producto final.

1.4. Hipótesis

El recalentamiento en cascada con hornos de inducción impacta en la mejora de los indicadores de energéticos en un 10% en el proceso de calentamiento de palanquillas.

1.5. Objetivos

Objetivo general

Evaluar el impacto del recalentamiento en cascada con hornos de inducción en los indicadores energéticos en el proceso de calentamiento de palanquillas

Objetivos específicos

1. Realizar un balance de energía en el Horno de recalentamiento OFU.
2. Elaborar la propuesta de implementación del sistema de recalentamiento en cascada con hornos de inducción.
3. Realizar un balance de energía del sistema de recalentamiento en cascada para determinar la mejora de los indicadores energéticos.
4. Realizar el análisis de factibilidad del estudio.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Definición y Clasificación de los Hornos Industriales

2.1.1. Definición de un Horno

A lo largo del tiempo, se han realizado numerosos avances tecnológicos con relación a los hornos, hasta llegar a la sofisticación y nivel de complejidad que posee en la actualidad. La descripción de un horno varía según su aplicación, y es fundamental destacar que, para utilizar los términos de manera efectiva, es necesario especificar la industria a la que estará dirigido el horno con el fin de gestionarlo de manera eficiente.

Un horno es una cámara sellada en el cual se somete una carga a un proceso térmico específico para endurecerlos, fortalecerlos e impermeabilizarlos, así como también para fundición. A su vez, tanto la temperatura como la composición del aire en el interior del horno pueden ajustarse y controlarse. (Díaz & Sánchez, 2011)

2.1.2. Elementos que conforman un Horno

- Carga térmica. - Se utiliza este término para referirse al producto que recibe una cantidad específica de calor durante el proceso realizado por el horno.
- Régimen térmico. - En este caso, se examina la manera en que se produce la transferencia de calor durante el proceso llevado a cabo por el equipo.
- Calefacción. - Este componente se refiere a la forma en que se genera el calor necesario para el proceso, también conocido como la fuente de calor.
- Cámara de calentamiento. - Se trata del espacio o recinto donde tiene lugar la transferencia de calor desde la fuente de calefacción hacia la carga térmica.

(Sanchez, 2000)

2.1.3. Clasificación de los Hornos Según su Fuente de Energía

a. Hornos de Combustión

Estos hornos utilizan diferentes tipos de combustibles: sólidos (como carbón vegetal, madera, coque, antracita, etc.), líquidos (como butano, gasolina, gasóleo, fuel-oil, etc.) o gaseosos (como gas natural, gas de agua, gas de aire, etc.).

El calor necesario se genera a partir de la energía liberada en la reacción con el oxígeno (comburente) de los elementos combustibles, como carbono, hidrógeno y azufre. En general, el calor liberado en la última de estas reacciones no se considera tan relevante en comparación con las otras dos. Existe una clasificación ampliamente utilizada para distinguir los diversos tipos de hornos de combustión basada en el tipo de combustible empleado para el calentamiento. Sin embargo, parece más lógico realizar una subdivisión

de los hornos según las modalidades de generación de calor y su transferencia a las sustancias que reaccionan. (Sanchez, 2000)

- **Alto Horno**

El alto horno es un tipo de horno utilizado en la metalurgia que se emplea para fundir metales industriales, principalmente hierro, aunque también puede utilizarse para otros metales como plomo o cobre.

En el proceso del alto horno, de forma continua, se introducen el combustible, el mineral y el fundente (caliza) desde la parte superior del horno. Al mismo tiempo, se inyecta una corriente de aire caliente, a veces enriquecido con oxígeno, desde la parte inferior del horno mediante toberas. Estas reacciones químicas ocurren en todo el horno mientras el material se desplaza hacia abajo. Como resultado, se obtienen metales fundidos, escoria y gases de escape.

El término "alto horno" se utiliza principalmente para hacer referencia a aquellos utilizados para fundir mineral de hierro y producir arrabio, un material intermedio que se emplea en la fabricación de hierro comercial y acero. (García, 2017)



Figura 1. Alto Horno de Sestao.

Fuente: Empresa Altos Hornos de Vizcaya (2017)

- **Hornos de Crisol**

Los hornos de crisol son ampliamente empleados en la fundición por lotes de metales no ferrosos, tales como aluminio, cobre, zinc y magnesio. En este tipo de horno, el metal fundido se mantiene en forma de marmita llamada crisol.

La fundición en crisol es un método de larga tradición y sencillo en su aplicación. A pesar de contar con tecnologías más sofisticadas disponibles, este proceso sigue siendo ampliamente utilizado en fundiciones modernas debido a su bajo costo inicial y a la ventaja de que el metal se funde sin tener contacto directo con el combustible. (Calvo, 2015)

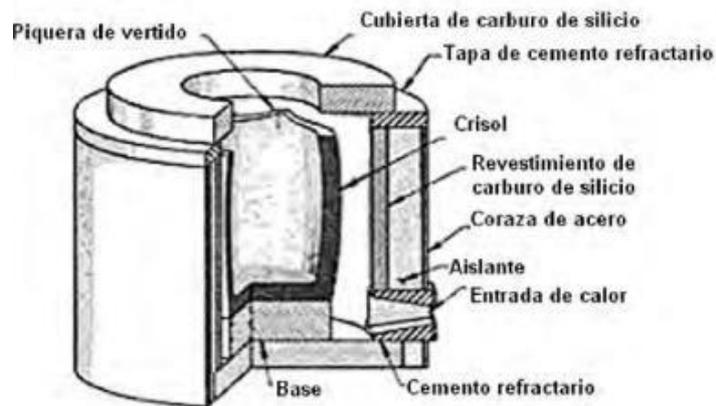


Figura 2. Horno de Crisol.

Fuente: Calvo (2015)

- **Hornos Rotativos**

Un horno de rotación consta de un cilindro de acero cubierto con un material refractario y tiene la capacidad de girar u oscilar de forma lenta en torno a su eje principal. Por lo general, los extremos del horno tienen una forma cónica similar a un tronco, con un quemador ubicado en uno de ellos y una salida para los gases quemados en el otro. Los gases se aprovechan frecuentemente para precalentar el aire antes de la combustión.

En los hornos de menor tamaño, es posible realizar la rotación de manera manual, pero la mayoría de ellos están equipados con rodillos y se hacen girar mediante un mecanismo de cadena o fricción. La intensa temperatura de la llama provoca la fusión y el sobrecalentamiento de la carga, transfiriendo calor a la superficie inferior del metal a medida que el horno gira. Esto acelera el proceso de fusión y contribuye a evitar el efecto aislante causado por la capa de escoria. Dependiendo de las necesidades, el horno puede operar en condiciones neutras, oxidantes o reductoras.

La capacidad de un horno de rotación puede abarcar un amplio rango. En el caso de la fundición de latón y bronce, puede variar entre 50 kg y 5 toneladas, normalmente oscilando entre 50 kg y 2 toneladas. Sin embargo, en la fundición de hierro, y en algunos casos de acero, las capacidades pueden ser considerablemente mayores.

El metal puede ser extraído a través de un único orificio de colada en la pared del cilindro, el cual permanece tapado con material refractario mientras el horno gira. En las unidades más grandes, se implementa un control para lograr un flujo uniforme durante la colada. Algunas instalaciones también permiten inclinar el horno hacia adelante o hacia atrás para facilitar la carga, la colada y la eliminación de escoria. (Calvo, 2015)



Figura 3. Hornos Rotativos.

Fuente: Empresa Metso (2023)

b. Hornos Eléctricos

La electricidad se considera el método óptimo para calentar distintas cargas, ya que permite un control preciso de la temperatura, no requiere ventilación ni chimeneas y tiene un costo inicial bajo.

Existen dos tipos básicos de hornos eléctricos, los de elementos metálicos y los no metálicos. Los elementos metálicos se presentan en forma de alambres o cintas y se fabrican con aleaciones que ofrecen una alta resistencia eléctrica. Por otro lado, los elementos no metálicos son de naturaleza cerámica y se elaboran con carburo de silicio

fundido en forma de varillas con diversos diámetros llamados electrodos, los cuales son sumergidos en el crisol. (Sanchez, 2000).

- **Hornos de Inducción**

Un horno de inducción es un tipo de horno eléctrico que utiliza la inducción eléctrica para generar calor en un medio conductor, como un metal, dentro de un crisol, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas.

Una de las ventajas del horno de inducción es que es un método limpio y energéticamente eficiente para la fundición y el tratamiento de metales. También ofrece un mayor control en comparación con otros métodos de calentamiento. Otra de sus ventajas radica en su capacidad para generar rápidamente una gran cantidad de calor. Los elementos principales de un sistema de calentamiento por inducción incluyen el cuerpo de las bobinas, que comprende bobinas de fuerza (donde se produce la mayor agitación del metal líquido) y bobinas de refrigeración, la fuente de alimentación, la etapa de acoplamiento de la carga, una estación de enfriamiento, el material refractario que protege las bobinas del metal líquido y la pieza que se va a tratar. (Díaz Y., 2012)

Los hornos de inducción funcionan según el principio físico que establece que los objetos metálicos expuestos a un campo magnético de corriente alterna, se calientan más intensamente a medida que aumenta la intensidad del campo magnético y la frecuencia. Los hornos de inducción de alta frecuencia presentan diversas ventajas significativas: ofrecen una producción de alta calidad con una oxidación mínima y un control constante. No obstante, los costos de instalación son elevados. (Calvo, 2015)



Figura 4. Hornos de Inducción para Recalentamiento de Palanquillas de Acero.

Fuente: Empresa Danieli (2017).

- **Hornos de Arco Eléctrico**

Principalmente utilizados en fundiciones y plantas siderúrgicas de gran escala, estos hornos emplean un arco eléctrico generado a partir de tres electrodos de carbón o grafito para proporcionar calor. El horno está recubierto con materiales refractarios que se desgastan durante el proceso de fusión, dando lugar a la formación de escoria. Con el objetivo de crear una capa protectora de escoria en el horno, se incorpora intencionalmente sílice y cal. También se pueden agregar fundentes como el fluoruro de calcio para hacer que la escoria sea más fluida y fácil de eliminar. La escoria protege al metal fundido del contacto con el aire y ayuda a eliminar ciertas impurezas.

La carga del horno incluye residuos metálicos, chatarra y materiales sobrantes de producciones anteriores, así como cal o piedra caliza. Un sistema de recolección de polvo y humos controla las emisiones al aire generadas por el horno de arco eléctrico.

El arco eléctrico que se forma entre los electrodos y el material fundido puede alcanzar temperaturas de hasta 3500 °C. Esto permite que la chatarra de acero agregada al acero refinado previamente se funda, liberando la carga del horno de

impurezas como azufre, fósforo y carbono que se queman en el proceso. El oxígeno necesario para la combustión se obtiene tanto del aire en contacto con el baño como de adiciones específicas. Para alcanzar la composición deseada, se realizan adiciones al acero.

Ajustar la posición de los electrodos permite controlar la longitud del arco y la potencia del horno. Por ejemplo, bajar los electrodos acorta el arco y aumenta la potencia, mientras que subirlos tiene el efecto contrario. Este control se realiza de forma automática. La mayoría de los hornos utilizados para la fusión son del tipo basculante. En los hornos grandes, la carga se realiza desde arriba levantando la bóveda (una estructura de ladrillos refractarios), y el desplazamiento de la carga puede ser lateral, mediante el uso de un puente grúa, o mediante un giro alrededor de un pivote. (Calvo, 2015).



Figura 05. Horno de Arco Eléctrico y Captadora de Humos.

Fuente: Empresa SIDERPERU (2021)

2.2. Tipos de Hornos para Recalentamiento de Palanquillas

2.2.1. Hornos Walking Hearth / Beam

Los hornos Walking Hearth/Beam, en español conocidos como hornos de solera/viga galopante, son hornos de recalentamiento de productos largos, como palanquillas, barras, blooms, slabs, etc., es comúnmente utilizado como horno principal en los laminadores en caliente.

El horno Walking Hearth/Beam se distingue por tener un sistema de vigas refractarias o tubulares que están apoyadas en bastidores móviles. Esto permite un movimiento progresivo

para desplazar los productos desde la carga hasta la descarga. Cuentan con una capacidad de hasta 120ton/h, una longitud de 30m y una temperatura máxima de 1350°C. (Ingener, Horno walking hearth - beam, 2023)



Figura 06. Horno Walking Hearth – Beam.

Fuente: Ingener (2023)

2.2.2. Hornos de Empuje

Los hornos de empuje, también conocidos como hornos pusher, son hornos de recalentamiento de productos largos (palanquillas), y también se utiliza comúnmente como horno principal en los laminadores en caliente.

El horno de empuje se distingue por contar con un sistema hidráulico/eléctrico en la entrada del horno que empuja un producto contra otro a lo largo de toda la longitud del horno, permitiendo que el producto avance desde la entrada hasta la salida. Cuenta con una capacidad de hasta 150 ton/h, con una longitud máxima de 30m y una temperatura máxima de 1350°C. (Ingener, 2023)



Figura 07. Horno Tipo Empuje.

Fuente: Ingenier (2023)

2.3. Propiedades del Calentamiento por Inducción

El calentamiento es controlado mediante un generador electrónico de corrientes alternas, lo que permite un control preciso de la cantidad de calor entregado a la pieza. Esto facilita establecer la temperatura final deseada o incluso la curva de evolución de la temperatura en función del tiempo.

En el caso del calentamiento por inducción, es posible alcanzar temperaturas mucho más altas en el cuerpo a calentar que con métodos de calentamiento convencionales. Esto permite lograr densidades de potencia significativas en el material a calentar sin limitaciones prácticamente. Por lo tanto, el calentamiento por inducción se considera un método confiable, versátil, eficiente y seguro para calentar materiales conductores en diversas industrias y campos de aplicación.

Es confiable debido a que es un proceso técnicamente controlable. Es versátil, ya que se puede lograr el calentamiento requerido sin esperas prolongadas para alcanzar y cambiar la temperatura. Es eficiente, ya que el rendimiento del proceso es alto. Es seguro, ya que el calentamiento se realiza sin emisiones de gases, radiaciones electromagnéticas peligrosas u otros elementos que puedan comprometer la seguridad de las personas. (Díaz Y. , 2012).

2.4. Aplicaciones del calentamiento por inducción

Las aplicaciones usuales del calentamiento se encuentran principalmente en la industria de procesamiento de metales. A continuación, se presenta una lista de las más importantes.

- ✓ **Fusión:** Los materiales se calientan hasta alcanzar su punto de fusión dentro de un recipiente.
- ✓ **Forja:** Se logra un calentamiento uniforme del material para su posterior conformado mecánico.
- ✓ **Tratamientos térmicos:** Los más comunes son el templeado y el revenido de piezas de acero. El revenido y los calentamientos controlados de las piezas ayudan a reducir tensiones mecánicas y movimientos posteriores.
- ✓ **Soldadura:** Mediante el calentamiento a temperaturas medias o altas de partes de una misma pieza o de diferentes piezas, se obtienen soldaduras de alta calidad con la adición de material. Un caso especial de soldadura que requiere el uso casi obligatorio del calentamiento por inducción es la soldadura de tubos, donde los bordes de una cinta de acero previamente conformada se sueldan longitudinalmente para producir tubos de alta calidad de manera continua.

(Díaz Y., 2012)

2.5. Balance de energía en hornos de calentamiento de empuje

Un Balance de Energía nos permite cuantificar como se reparte como energía de salida, la energía entrante. En este caso la energía entrante es función del calor de reacción y calor sensible del combustible. (Guevara. 2020)

Una de las principales características de un proceso en un horno industrial, en este caso horno de calentamiento continuo de palanquillas es el consumo de combustible, el cual tiene un costo, así mismo el balance de energía nos permite conocer que porcentaje es el calor útil en relación con el calor suministrado o entrante al horno. En todo balance de energía es fundamental que las condiciones al final del periodo en que se realizan las mediciones sean las mismas que al comienzo. (Guevara. 2020)

2.5.1. Calores entrantes al horno en el balance de energía

- **Calor suministrado por reacción del combustible (\dot{Q}_1):** Es el calor suministrado al horno al reaccionar el combustible y está en función a su poder calorífico inferior, se tiene la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_c * P_{ci} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

Q_1 = Calor entrante con el calor de reacción del combustible

\dot{m}_{GN} = Flujo masico del combustible Gas Natural (kg/seg)

P_{ciGN} = Poder calorífico inferior del combustible (kcal/kg)

- **Calor sensible por precalentamiento del combustible (\dot{Q}_2):** Es el calor entrante debido a que el gas natural antes de ingresar a los quemadores del horno es precalentado, para reducir su flujo de entrada.

$$Q_2 = m_c * C_{p_c} * (T_{fc} - T_{ic}) \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

Q_2 = Flujo de calor entrante por calor sensible del combustible

\dot{m}_c = Flujo masico del combustible Gas natural (kg/seg)

T_{fc} = Temperatura final del combustible luego del precalentamiento (°C)

T_{ic} = Temperatura inicial del medio ambiente (°C)

C_{pc} = Calor especifico a presión constante del combustible (kcal/kg°C)

- **Calor sensible del aire de combustión (\dot{Q}_3):** Es el calor entrante debido a la temperatura del aire de la combustión antes de ingresar a los quemadores del horno es precalentado, para reducir su flujo de entrada.

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}_a * C_{p_a} * (T_{fa} - T_{ia}) \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

Q_3 = Flujo de calor entrante por calor sensible del aire

\dot{m}_c = Flujo masico del aire (kg/seg)

T_{fc} = Temperatura final del aire entrante al horno (°C)

T_{ic} = Temperatura inicial del medio ambiente (°C)

C_{pc} = Calor especifico a presión constante del aire (kcal/kg°C)

- **Calor por reacciones exotérmicas (\dot{Q}_4):** En el contexto del acero, la cascarilla se genera a partir del calor resultante de la oxidación de la carga, siendo este calor específico de 1,350 kcal/kg. (Trinks, W. y Mawhinney, M., 1975)

$$\dot{Q}_4 = 1,350 * \dot{m}_{pl} * a \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

Q_4 = Flujo de calor por reacciones exotérmicas

\dot{m}_{pl} = Flujo masico de palanquillas (kg acero/seg)

a = Pérdida metálica (kg cascarilla/kg acero)

f = 1,350 (kcal/kg cascarilla)

- **Calor entrante al horno (\dot{Q}_e):** Es la sumatoria de Q_1 , Q_2 y Q_3 .

$$\dot{Q}_e = \sum_{i=1}^n Q_i = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 \dots \dots \dots (5)$$

2.5.2. Calores salientes del horno en el balance de energía

- **Calor útil en el horno (\dot{Q}_5):** También llamado calor sensible de la carga, la cual está compuesta por los calores sensibles del acero (material de fabricación de los tubos) y del zinc (material de recubrimiento). Se evalúa en función de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_5 = \dot{m}_{pl} * C_{ppl} * (T_{fpl} - T_{ipl}) \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

\dot{Q}_5 = Calor útil para el calentamiento de las palanquillas

\dot{m}_{pl} = Flujo masico de palanquillas a calentar (kg/seg)

C_{ppl} = Calor específico a presión del acero (palanquillas) (kcal/kg°C)

T_{fpl} = Temperatura final de las palanquillas luego del calentamiento (°C)

T_{ipl} = Temperatura inicial de las palanquillas antes del calentamiento (°C)

- **Calor perdido por gases de la combustión (\dot{Q}_6):** Es el calor o energía perdida, debido a que los gases de la combustión se expulsan a la atmosfera, y es función de la temperatura con el cual los gases de la combustión abandonan el horno a través de la chimenea. Se evalúa según la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_6 = \dot{m}_g * C_{pg} * (T_g - T_{amb}) \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

\dot{Q}_6 = Calor perdido por los gases de la combustión en la chimenea.

\dot{m}_g = Flujo masico de los gases de la combustión (kg/seg)

C_{pg} = Calor específico a presión constante de los gases de la combustión (kcal/kg°C)

T_g = Temperatura de los gases de la combustión en la chimenea (°C)

- **Calor extraído por el agua de refrigeración (\dot{Q}_7):** Es el calor extraído por el agua al refrigerar las paredes laterales del horno. Se evalúa según la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_7 = \dot{m}_w * C_{pw} * (T_{fw} - T_{iw}) \dots \dots \dots (8)$$

Donde:

\dot{Q}_7 = Calor extraído por el agua de refrigeración

\dot{m}_w = Flujo másico del agua de refrigeración (kg/seg)

C_{pw} = Calor específico a presión constante del agua de refrigeración (kcal/kg°C)

T_{fw} = Temperatura final del agua de refrigeración (°C)

T_{iw} = Temperatura inicial del agua de refrigeración (°C)

- **Calor perdido a través de las paredes (\dot{Q}_8):** Estas pérdidas de calor dependen de las características del material empleados para el aislamiento y la transferencia de calor se realiza por conducción en función a la ecuación de Fishenden y Sainders recomendada por la comisión de Ahorro de Energía (CONAE) de México para la evaluación de pérdidas de calor por paredes exteriores para hornos de crisol.

$$P_c = 5.67 * e * \left[\left(\frac{T_p + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \dots \dots (9)$$

Con la ecuación anterior se cuantifica el valor de las pérdidas a través de las paredes:

$$\dot{Q}_8 = \frac{P_c * A}{4.18 * 1000} \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

P_c = Perdidas de calor por unidad de superficie (W/m2)

k = Factor de pérdidas de calor por unidad de superficie

T_p = Temperatura de la pared exterior del horno (°C)

e = Emisividad del material de la pared del horno

A = Área superficial del horno (m²)

- **Calor perdido por puertas abiertas (\dot{Q}_9):** Se tienen dos puertas de acceso al Horno (entrada y salida de la carga las cuales están abiertas al momento de ingresar y salir las palanquillas, representando una alta tasa de calor radiativo.

$$\dot{Q}_9 = (0.00567 * e * \left[\left(\frac{T_H + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] * A_p * \left(\frac{3600}{4.18} \right) \dots \dots (11)$$

Donde:

A_p = Área de las puertas abiertas (m2)

T_H = Temperatura en la puerta del Horno (°C)

- **Otras pérdidas (\dot{Q}_{10}):** Son aquellas perdidas sumadas las de eficiencia de la combustión, fugas de calor, perdidas por presencia de inquemados sólidos e inquemados gaseosos.

$$\dot{Q}_{10} = \text{Otras pérdidas}$$

- **Calor saliente total del horno (\dot{Q}_s):** El calor total saliente en el horno es igual a la sumatoria de los siguientes calores:

$$\dot{Q}_s = \sum_{i=1}^n Q_i = \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5 + \dot{Q}_6 + \dot{Q}_7 + \dot{Q}_8 + \dot{Q}_9 \dots \dots \dots (12)$$

- **Eficiencia del horno:** Teniendo en cuenta la primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados, sin generación de trabajo se debe cumplir la siguiente igualdad:

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_s \dots \dots \dots (13)$$

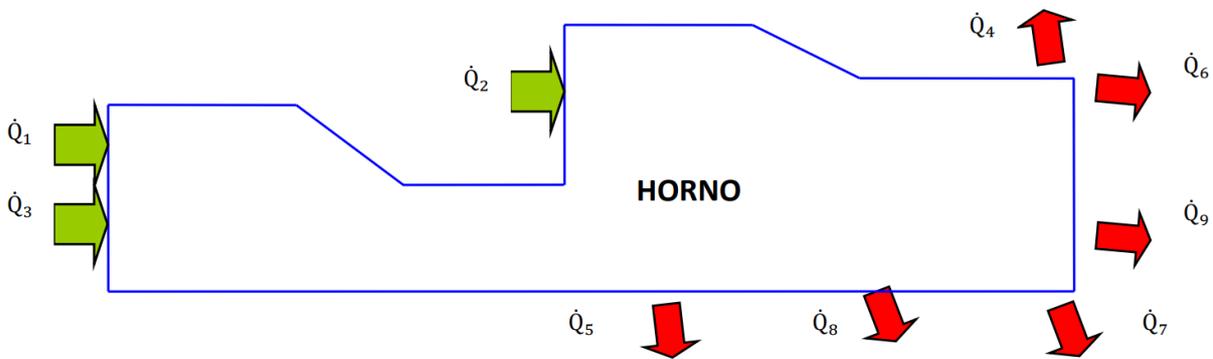


Figura 08. Flujo de calor para el balance en horno de palanquillas.

Fuente: Guevara (2019)

La eficiencia del horno se evalúa en función a la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_5}{\dot{Q}_e} * 100\% \dots \dots \dots (14)$$

2.6. Indicadores de desempeño energético aplicado a hornos:

Conocidos también como consumos específicos energéticos, es la relación o cociente entre el consumo de energía (en galones de combustible, energía eléctrica activa) y un parámetro de producción o de servicio propio de un Centro de Consumo de Energía. Estos indicadores son característicos y específicos de cada centro de consumo de energía y representan factores de normalización que posibilitan la comparación intersectorial e internacional. (Guevara, 2020)

El cálculo de estos parámetros que indican la intensidad de los consumos de energía por unidad de referencia y permite determinar el nivel de eficiencia de energética del consumo de energía, su control permanente y posibilita la realización de los benchmarking energéticos entre indicadores de diversos centros de consumo de energía. (Guevara, 2020)

Tenemos los siguientes Indicadores a evaluar.

2.6.1. Nivel de Producción (NP):

Determina la cantidad de carga procesada en el horno por hora, turno, mes, según la necesidad en estudio:

$$NP = \frac{\text{Toneladas de acero procesado (Ton)}}{\text{tiempo (h)}} \dots \dots \dots (15)$$

2.6.2. Indicador de Desempeño Energético Técnico (IDEs T):

Compara la unidad de energía consumida con el nivel de producción

$$IE = \frac{\text{m3 de gas natural (m}^3\text{)}}{\text{Toneladas de acero procesado (Ton)}} \dots \dots \dots (16)$$

2.6.3. Indicador de desempeño energético Ambiental (IEDs A):

Compara las toneladas de dióxido de carbono emitidas a la atmosfera por unidad de producción.

$$IEA = \frac{\text{Ton.de CO2 emitidas a la atmosfera}}{\text{Toneladas de acero procesado (Ton)}} \dots \dots \dots (17)$$

2.6.4. Indicador de desempeño energético económico (IDEs E):

Compara la facturación que se incurre por el consumo de gas natural por unidad de producción.

$$IEE = \frac{\text{U\$ por consumo de gas natural (USD)}}{\text{Toneladas de acero procesado (Ton)}} \dots \dots \dots (18)$$

2.7. Conducción de calor en régimen transitorio

En general, la temperatura de un cuerpo varía con el tiempo, así como con la posición. En coordenadas rectangulares, esta variación se expresa como T(x, y, z, t), en donde (x, y, z) indica la variación en las direcciones x-, y- y z-, y t indica la variación con el tiempo. Se considera la variación de la temperatura con el tiempo, así como con la posición, en sistemas unidimensionales y multidimensionales.

2.7.1. Número de Biot

El número de Biot es la razón entre la convección en la superficie con respecto a la conducción dentro del cuerpo.

En el análisis de sistemas concentrados se supone una distribución uniforme de temperatura en todo el cuerpo, el cual es el caso sólo cuando la resistencia térmica de éste a la conducción de calor (la resistencia a la conducción) sea cero. Por consiguiente, el análisis de sistemas concentrados es exacto cuando $Bi=0$ y aproximado cuando $Bi>0$. (Cengel, 2011)

Un 15% de incertidumbre en el coeficiente de transferencia de calor por convección h se considera “normal” y “esperado”. Suponer que h es constante y uniforme también es una aproximación de validez cuestionable, en especial para configuraciones geométricas irregulares. Por lo tanto, en ausencia de suficientes datos experimentales para la configuración geométrica considerada, no se puede afirmar que los resultados sean mejores que $\pm 15\%$, incluso cuando $Bi=0$. (Cengel, 2011)

En general se acepta que el análisis de sistemas concentrados es aplicable si $Bi < 0.1$

$$Bi = \frac{h * L_c}{k} \dots \dots (19)$$

Donde:

Bi: Número de Biot

h: Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²K)

Lc: Longitud característica (m)

K: Coeficiente de transferencia de calor por conducción (W/mK)

2.7.2. Número de Fourier

El número de Fourier (Fo) o módulo de Fourier, es un número adimensional que caracteriza la conducción térmica. Junto con el número de Biots, caracteriza los problemas de conducción transitoria. Conceptualmente es la relación entre la velocidad de la conducción de calor y la velocidad del almacenamiento de energía

$$Fo = \tau = \frac{\alpha * t}{L^2} \dots \dots \dots (20)$$

Donde:

Fo: Tiempo adimensional (número de Fourier)

t: tiempo (segundos)

L: Longitud característica (m^2)

α : Difusividad térmica (m^2/s)

2.7.3. Diagramas de Heisler

Las gráficas de temperaturas transitorias de los anexos 5, 6 y 7, para una pared plana grande, un cilindro largo y una esfera, fueron presentadas por M. P. Heisler, en 1947, y se conocen como gráficas de Heisler. E 1961, fueron complementadas por H. Gröber con gráficas de transferencia transitoria de calor. Éstas son tres gráficas asociadas con cada configuración geométrica: la primera es para determinar la temperatura T_0 en el centro de la configuración, en un instante dado t. La segunda permite determinar la temperatura en otros lugares, en el mismo instante, en términos de T_0 . La tercera sirve para determinar la cantidad total de transferencia de calor hasta el instante t. Estas gráficas son válidas para $Fo > 0.2$ (Cengel, 2011)

2.8. Parámetros Financieros para el Cálculo de Retorno

2.8.1. TIR

La Tasa Interna de Retorno (TIR) se describe como la tasa de descuento que hace que el valor actual de los ingresos de un proyecto sea igual al valor actual de los egresos. Este indicador evalúa la rentabilidad de un proyecto al determinar la tasa máxima de retorno que podría generar beneficios, facilitando así la decisión de aceptar o rechazar el proyecto. (Mete, M. R., 2014).

2.8.2. VAN

El Valor Actual Neto (VAN) representa el valor actual de los flujos de efectivo netos de una propuesta, donde estos flujos netos son la disparidad entre los ingresos y los egresos en intervalos periódicos. Este indicador sirve como medida de la rentabilidad mínima requerida por el proyecto para recuperar la inversión, cubrir los costos y generar beneficios. (Mete, M. R., 2014)

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

3.1.1. Horno de Recalentamiento a Gas

A continuación, se presenta las características del Horno de Palanquillas a evaluar:

- Producción actual del tren: 21 013 tpm
- Rendimiento Metálico: 0,945
- Utilización efectiva del tren: 0,696
- Capacidad actual del horno de recalentamiento: 42,52 tph
- Horas de laminación disponibles por año: 6 800
- Temperatura de laminación entrada caja 1 primer pase: 1 100 a 1 110°C
- Temperatura de laminación salida caja 1 primer pase: 1 090°C (cabeza)
- Temperatura de laminación salida caja 1 primer pase: 1 110 °C (cola)
- Material a procesar: 100x100x5300 mm
- Costo de la energía eléctrica: 72,7 US\$/MWh (2023)
- Costo del combustible horno: 0,425 US\$/Sm³ (2023)
- Consumo de combustible horno: 22 Nm³/t
- Cascarilla generada en el horno a gas: 1%
- Tensión eléctrica disponible de media tensión: 13,2 KV

3.1.2. Hornos de Inducción

Para elevar la temperatura de los 863°C hasta los 1 110°C, o sea un $\Delta T = 247^\circ\text{C}$, y mantener una productividad de 52,37 tph necesita un horno de inducción de:

- 3 módulos de 2MW cada uno, por un total de 6MW
- Velocidad del material: 0,15m/s
- Espacio necesario para los hornos: 8m
- Agua necesaria para resfriamiento de los inductores y convertidores: 200m³/h

El dimensionamiento está optimizado para una palanquilla de 100x100mm. Se aconseja utilizar una sección solamente o adquirir un segundo set de bobinas de inductores si se utilizan secciones distintas.

A continuación, se presenta un diagrama eléctrico esquemático del circuito de alimentación de los hornos inductores propuestos, que necesitan de un transformador de 6MVA (2 secundarios de 3MVA de 13.2kV a 720V)

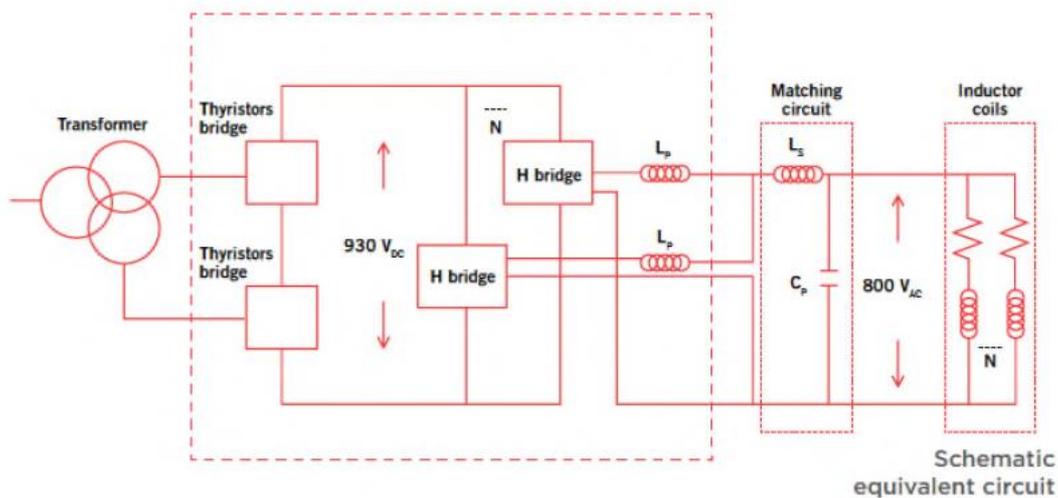


Figura 13. Diagrama eléctrico esquemático de un Hornos Inductor

Fuente: Danieli, 2017.

3.2. Métodos

3.2.1. Métodos de la Investigación

En la presente investigación se utilizará el método descriptivo

3.2.2. Diseño de la Investigación

El diseño de en la presente investigación es preexperimental, su propósito es establecer una relación causa y efecto para una condición. Este es un diseño de investigación en el que se observa el efecto de una variable independiente sobre una variable dependiente.

Las características de la investigación serán:



O1: Indicadores energéticos sin recalentamiento de palanquillas en cascada con hornos de inducción.

O2: Indicadores energéticos con recalentamiento de palanquillas en cascada con hornos de inducción.

X: Sistema de recalentamiento de palanquillas

G: Horno tradicional a gas de recalentamiento de palanquillas

3.2.3. Población y Muestra

La unidad de observación es el horno continuo de recalentamiento de palanquillas.

Para la presente investigación la población y la muestra es única, en este caso serán los reportes de consumo y facturación de energéticos, reportes de producción continua, información de operación a plena carga del horno.

3.2.4. Técnicas, Instrumentos o fuentes para la obtención de datos

Técnica documental: Es una técnica cuantitativa encargada de recopilar y seleccionar información a través de documentos, tesis de investigación, libros, revistas científicas, etc.

Registro de Información: Es una herramienta de recopilación de datos. También se emplea la Ficha Técnica como herramienta.

3.2.5. Tratamiento de la Información

El tratamiento de la información es un análisis estadístico descriptivo.

3.2.6. Técnicas de Procedimiento y Análisis de los Resultados

Para el procesamiento de la información se utilizará un computador Core i5, así como el empleo del software Microsoft Word y Microsoft Excel.

CAPÍTULO IV: CÁLCULOS

4.1. Balance de Energía en condiciones actuales del proceso.

4.1.1. Consideraciones previas

Tabla 1. Parámetros del proceso de recalentamiento de palanquillas.

Parámetros Generales	Valores	unidades
Temperatura del aire que ingresa	20	°C
Temperatura del aire precalentado	325	°C
Temperatura de palanquilla a la salida del Horno	1 185 – 1 200	°C
Temperatura de palanquilla entrante al horno para balance	20	°C
Temperatura de las paredes exteriores del horno	180	°C
Temperatura puertas abiertas del horno	150	°C
Temperatura del Combustible	20	°C
Temperatura de los gases de la combustión	640	°C
Capacidad actual del horno de recalentamiento	42,52	t/h
Flujo de combustible	554	m ³ /h
Flujo de Aire enriquecido con 6% de O ₂	6 325	m ³ /h
Flujo másico de agua de refrigeración	1 582,5	kg/h
Área de paredes exteriores del horno	520,09	m ²
Área de puertas abiertas del horno	1,75	m ²
Tiempo de residencia en el horno de las palanquillas	117	min
Pérdidas por escamillas	1,2	%
Quemadores	Ultra NOX	Bloom

Fuente: SIDERPERÚ

4.1.2. Flujo de calor entrante al horno

Los valores de consumo, poder calorífico superior y poder calorífico inferior del gas natural, así como el consumo de oxígeno serán extraídos del anexo 1.

Los valores de las propiedades físicas de la palanquilla serán extraídos de la Tablas A-3 propiedades de metales sólidos de Yunus A. Cengel, anexo 2.

Los valores de las propiedades físicas del aire serán extraídos de la Tablas A-15 propiedades del aire a la presión de 1 atm de Yunus A. Cengel, anexo 3.

Según SIDERPERÚ la capacidad promedio actual del horno es de 42,52 toneladas/horas.

- **Calor suministrado por reacción del combustible (\dot{Q}_1):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 1.

Tabla 2. Cálculo flujo de calor por reacción del combustible

Parámetros	Valores	Unidades
\dot{m}_c (A)	554	m ³ /h
P _{ci} (B)	9 370	kcal/m ³
Q1 (A*B)	6 034,03	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Calor sensible por precalentamiento del combustible (\dot{Q}_2):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 2. Para este cálculo hay que tener en cuenta que no se precalienta el combustible.

Tabla 3. Cálculo flujo de calor sensible por temperatura del combustible.

Parámetros	Valores	Unidades
\dot{m}_c (A)	554	m ³ /h
T _{fc} (B)	20	°C
T _{ic} (C)	20	°C
C _{pc} (D)	0,406	kcal/kg °C
Densidad (E)	0,743	kg/m ³
Q2 [A*D*E*(B-C)]	0.00	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Calor sensible del aire de combustión (\dot{Q}_3):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 3.

Tabla 4. Cálculo flujo de calor sensible del aire de combustión.

Parámetros	Valores	unidades
\dot{m}_a (A)	6,325	m ³ /h
T _{fa} (B)	325	°C
T _{ia} (C)	20	°C
C _{pa} (D)	0.251	kcal/kg °C
Densidad (E)	0.591	kg/m ³
Q3 [A*D*E*(B-C)]	562,72	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Calor por reacciones exotérmicas (\dot{Q}_4):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 4.

Tabla 5. Cálculo flujo de calor por reacciones exotérmicas.

Parámetros	Valores	unidades
Factor	1 350	Kcal/kg cascarilla
Pérdida metálica	0,012	kg cascarilla/kg acero
\dot{m}_{pl}	40 185	Kg acero/h
Q4	757,11	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Calor entrante al horno (\dot{Q}_e):** Es la sumatoria de Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4 . Haremos uso de la ecuación 5.

Tabla 6. Cálculo flujo de calor entrante.

Flujo de Calor Entrante	KW	%
Q1	6 034,03	82%
Q2	0	0%
Q3	562,72	8%
Q4	757,11	10%
\dot{Q}_e	7 353,86	100%

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Flujo de calor saliente del horno

- **Calor útil en el horno (\dot{Q}_5):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 6.

Tabla 7. Cálculo flujo de calor útil en el horno.

Parámetros	Valores	Unidades
\dot{m}_{pl}	40 185	kg/h
T_{fpl}	1 200	°C
T_{ipl}	20	°C
C_{ppl}	0,104	kcal/kg °C
Q5	5 720,37	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Calor perdido por gases de la combustión (\dot{Q}_6):** Para el siguiente cálculo se requiere hallar en primer lugar el flujo másico de los gases que viene dada por la siguiente ecuación: $\dot{m}_g = \dot{m}_c + \dot{m}_a$

Tabla 8. Cálculo del flujo másico de los gases.

Parámetros	Valores	Unidades
\dot{m}_a	6 325	m ³ /h
\dot{m}_c	554	m ³ /h
Densidad mc	0,743	kg/m ³
Densidad ma	0,591	kg/m ³
\dot{m}_g	4 150	kg/h

Fuente: Elaboración propia

Para hallar la temperatura de los gases de la combustión en la chimenea se realizará un balance en el calentador de aire. Se cumple la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_g * C_{p_g} * (T_g - T_{sg}) = \dot{m}_a * C_{p_a} * (T_{fa} - T_{ia})$$

Despejamos T_{sg} y calculamos.

Tabla 9. Cálculo de la temperatura de los gases en la chimenea.

Parámetros	Valores	unidades
mg	4 150	kg/h
ma	6 325	m ³ /h
Densidad ma	0,591	kg/m ³
C _{pg}	0,25	kcal/kg °C
C _{pa}	0,251	kcal/kg °C
T _g	640	°C
T _{fa}	325	°C
T _{ia}	20	°C
T_{sg}	364	°C

Fuente: Elaboración propia

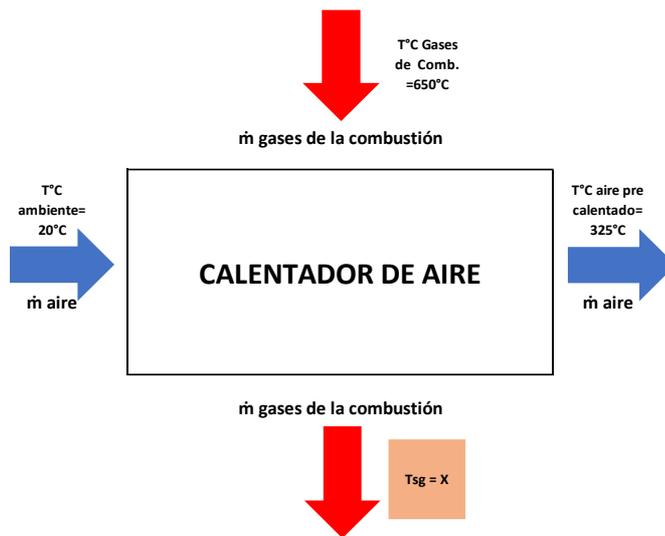


Figura 10. Calentador de aire con gases de la combustión.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para el cálculo del flujo de calor perdido por gases de la combustión haremos uso de la ecuación 7.

Tabla 10. Cálculo del flujo de calor perdido por gases de la combustión.

Parámetros	Valores	Unidades
\dot{m}_g	4 150	kg/h
T_{srg}	364	$^{\circ}\text{C}$
T_{amb}	20	$^{\circ}\text{C}$
C_{pg}	0,25	kcal/kg $^{\circ}\text{C}$
Q6	415,53	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Calor extraído por el agua de refrigeración (\dot{Q}_7):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 8. Se debe considerar que el horno evaluado no utiliza agua para su refrigeración.

Tabla 11. Cálculo del flujo de calor perdido por el agua de refrigeración.

Parámetros	Valores	Unidades
mw	0	kg/h
Q7	0	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Calor perdido a través de las paredes (\dot{Q}_8):** En primer lugar, se realizará el cálculo de las pérdidas de calor por unidad de superficie y haremos uso de la ecuación 9.

Tabla 12. Cálculo de pérdidas de calor por unidad de superficie.

Parámetros	Valores	Unidades
k	5,67	
e	0,95	W/m ² k ⁴
Tp	180	°C
Ta	20	°C
Pc	1 871	W/m²

Fuente: Elaboración propia

Teniendo el Pc se cuantifica el valor de las pérdidas a través de las paredes utilizando la ecuación 10.

Tabla 13. Cálculo del flujo de calor perdido a través de las paredes.

Parámetros	Valores	Unidades
Pc	1 871,31	W/m ²
A	520,10	m ²
Q8	974,84	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Calor perdido por puertas abiertas (\dot{Q}_9):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 11.

Tabla 14. Cálculo del flujo de calor perdido por puertas abiertas.

Parámetros	Valores	Unidades
k	0,01	
e	0,95	W/m ² k ⁴
TH	150	°C
Ta	20	°C
Ap	1,75	m ²
Q9	0,0023	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Otras pérdidas (Q₁₀):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 13.

Tabla 15. Cálculo de otras pérdidas de calor.

Parámetros	Valores	Unidades
Qe	7 353,86	KW
Q5	5 720,37	KW
Q6	415,53	KW
Q7	0	KW
Q8	974,84	KW
Q9	0,0023	KW
Q10	243.11	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Calor saliente total del horno (Q_s):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 12.

Tabla 16. Cálculo del flujo de calor saliente.

Flujo de Calor Saliente	KW	%
Q5	5 720,37	78%
Q6	415,53	6%
Q7	0	0%
Q8	974,84	13%
Q9	0,0023	0.00003%
Q10	243.11	3%
Qs	7 353,85	100%

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Indicadores de Desempeño Energético

- **Eficiencia del Horno:** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 14.

Tabla 17. Cálculo de la eficiencia del horno.

Parámetros	Valores	Unidades
Q5	5 720,37	KW
Qe	7 353,86	KW
n	0.78	%

Fuente: Elaboración propia

- **Nivel de Producción (NP):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 15.

Tabla 18. Cálculo del Nivel de Producción.

Parámetros	Valores	Unidades
Producción	40,185	Ton
Tiempo	1	h
NP	40,185	Ton/h

Fuente: Elaboración propia

- **Indicador de Desempeño Energético Técnico (IDEs T):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 16.

Tabla 19. Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Técnico.

Parámetros	Valores	Unidades
mc	554	m ³ /h
Producción	40,185	Ton/h
IDEs T	13,78	m³/Ton

Fuente: Elaboración propia

- **Indicador de desempeño energético Ambiental (IEDs A):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 17. El Factor de Emisiones de CO₂ del Gas Natural se tomó del Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero del sector Energía del año 2016, anexo 4.

Tabla 20. Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Ambiental.

Parámetros	Valores	Unidades
mc	554	m3/h
Pci	9 370	kcal/m3
Densidad	0,743	kg/m3
Factor de Emisión	56,1	tonCO2/TJ
Producción	40,185	Ton/h
IDEs A	0,03	TonCO2/Ton

Fuente: Elaboración propia

- **Indicador de desempeño energético económico (IDEs E):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 18.

Tabla 21. Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Económico.

Parámetros	Valores	Unidades
mc	56	m3/h
Precio	0,425	US\$/Sm3
Producción	40,185	Ton/h
IDEs E	6,19	US\$/Ton

Fuente: Elaboración propia

4.2. Situación propuesta con Hornos de Inducción

4.2.1. Consideraciones previas

Los tiempos y velocidades del recorrido de la palanquilla y del ciclo completo serán extraídos del anexo 9.

Tabla 22. Parámetros del proceso de recalentamiento y laminación.

Parámetros Generales	Valores	Unidades
Dimensiones de la palanquilla	100x100x5500	mm
Masa de la palanquilla	423	Kg
Flujo másico del HR	40 185	kg/h
Producción del HR	95	palanquillas/h
Longitud del HR	18,4	m
Tiempo de permanencia de la palanquilla	1,94	h
Temperatura de palanquilla entrante al horno para balance	20	°C
Temperatura de salida de la palanquilla en el HR	1 185-1 200	°C
Temperatura de la palanquilla al ingreso del laminador	1 100-1 110	°C
Tiempo de recorrido de la palanquilla hasta el laminador	49,5	seg

Fuente: SIDERPERÚ

Tabla 23. Parámetros del Horno de Inducción.

Parámetros Generales	Valores	unidades
Potencia por módulo (horno inductor)	2	MW
Espacio longitudinal por módulo	2	m
Eficiencia del Horno Inductor	83,52	%

Fuente: DANIELI

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de la situación actual del proceso de recalentamiento de palanquillas y su recorrido hasta llegar al laminador T500.

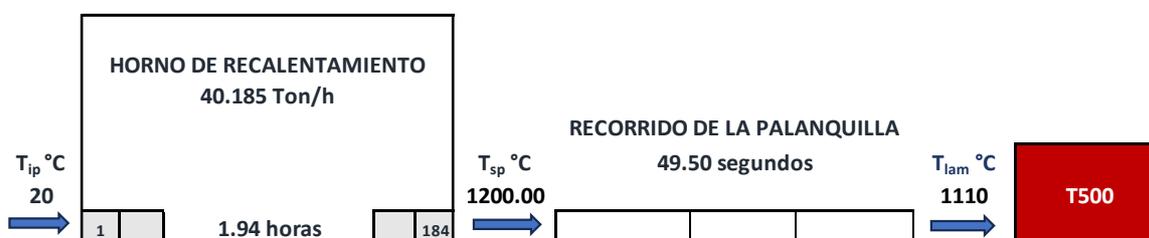


Figura 11. Diagrama de flujo de la situación actual del proceso.

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Dimensionamiento con 01 módulo inductor

- **Capacidad del Horno de Recalentamiento**

Actualmente la capacidad nominal del horno es de 42,52 tph que equivalen a 95 palanquillas/hora, nuestra propuesta es elevarla a 128 palanquillas/hora que equivalen a 57,3 tph.

Tabla 24. Cálculo de la producción propuesta del horno de recalentamiento.

Parámetros	Valores	Unidades	Parámetros	Valores	Unidades
Masa	423	Kg/palanquilla	Masa	423	Kg/palanquilla
Capacidad Actual	95	palanquillas/h	Capacidad Propuesta	128	palanquillas/h
Producción Actual	40,185	Ton/hora	Producción Propyectada	54,144	Ton/hora

Fuente: Elaboración propia

- **Balance de Energía del proceso ideal**

El módulo inductor será instalado a 2 metros del laminador T500. Se utilizará el mismo recorrido que en la situación actual, no se modificará la ubicación del laminador. La temperatura ideal para laminación es de 1 100 - 1 110°C, entonces la palanquilla tendrá que salir a esta temperatura del H.I.



Figura 12. Diagrama de flujo temperaturas 01 H.I .

Fuente: Elaboración propia

Haremos uso de la ecuación 6 aplicándolo al H.I. y despejamos T_{ih} .

Tabla 25. Cálculo de la temperatura de palanquilla al ingreso del H.I.

Parámetros	Valores	Unidades
Temperatura de Salida	1 110	°C
Número de Módulos	1	módulo
Potencia	2	MW
cp	1 169	J/KgK
producción	54,14	ton/h
Eficiencia por módulo	0,8352	%
T'_{ih}	1 015	°C

Fuente: Elaboración propia

Como resultado tenemos que la temperatura de la palanquilla al ingreso del H.I. tiene que ser como mínimo 1 015°C. El tiempo que se tomará la palanquilla en llegar al H.I. es de 47,7 segundos desde la salida del H.R. En este tiempo la palanquilla pierde temperatura. Para hallar la temperatura de la palanquilla a la que debe salir del H.R. aplicaremos conducción de calor en régimen transitorio.



Figura 13. Diagrama de flujo proceso con H.I.

Fuente: Elaboración propia

Asumiremos el coeficiente de transferencia de calor por convección $h=25\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, anexo 8. Haremos uso de la ecuación 19 y 20 para calcular el número de Biot y el número de Fourier.

Tabla 26. Cálculo del número de Biot y del número de Fourier.

Parámetros	Valores	unidades
Coeficiente conductivo	30	W/mk
Lc	0,05	m
Coeficiente convectivo	25	W/m ² *K
Bi	0,04	< 0,1
1/Bi	24	
Tiempo	47,70	segundos
Lc	0,05	m
α	0,000018	m ² /s
Fo	0,34	> 0,2

Fuente: Elaboración propia

Se puede determinar la temperatura en un lugar específico, en un instante dado, a partir de los diagramas de Heisler.

$$\frac{1}{Bi} = \frac{k}{h * L_c} = 24$$

$$\tau = \frac{\alpha * t}{L^2} = 0,34$$

$$\frac{x}{L} = \frac{L}{L} = 1$$

Utilizando la gráfica de temperatura del plano medio del anexo 5 y con los números adimensionales Bi^{-1} y Fo hallamos:

$$\theta_0 = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = 0,9973$$

Utilizando la gráfica de distribución de temperatura del anexo 5 y con los números adimensionales Bi^{-1} y x/L hallamos:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = 0,9577$$

Por lo tanto, hallaremos la temperatura superficial de la palanquilla. Considerar a T_∞ la temperatura ambiente, T_0 la temperatura central del cuerpo y T como la temperatura final superficial del cuerpo.

$$\theta_0 * \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} * \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty}$$

$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = 0,9973 * 0,9577 = 0,9552$$

$$T_i = \frac{T - T_\infty + 0,9552 * T_\infty}{0,9552}$$

$$T'_{sp} = T_i = 1\ 061,64\ ^\circ C$$

Tabla 27. Cálculo de la temperatura mínima de la palanquilla a la salida del H.R.

Parámetros	Valores	unidades
θ_0	0,9973	-
θ/θ_0	0,9578	-
T'_{sp}	1 061,64	°C

Fuente: Elaboración propia

Siendo la temperatura de ingreso de la palanquilla al H.R. 20°C, el flujo de calor útil en el horno sería de:

Tabla 28. Cálculo de flujo de calor útil necesario en el H.R. con 01 H.I.

Parámetros	Valores	unidades
mpl	54,144	kg/h
T'fpl	1 062	°C
Tipl	20	°C
Cppl	0,104	kcal/kg °C
Q 1M	6 803,71	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Balance de Energía del proceso real**

Al incrementar la capacidad, el tiempo de permanencia de la palanquilla en el HR se redujo a 1,44 horas, por lo tanto, la temperatura de salida de la palanquilla será menor a los 1 200°C que en la condición actual. Haremos uso de la ecuación 6 y despejaremos la temperatura final de la palanquilla.

Tabla 29. Cálculo de la temperatura de salida de la palanquilla en el H.R.

Parámetros	Valores	Unidades	Parámetros	Valores	Unidades
m	40,185	Ton/hora	m	54,144	Ton/hora
Tfpl	1 200	°C	Flujo de Calor Útil (Q5)	5 720,37	KW
Tipl	20	°C	Tipl	20	°C
Cppl	0,104	kcal/kg °C	Cppl	0.104	kcal/kg °C
Flujo de Calor Útil (Q5)	5 720,37	KW	Tsp	896	°C

Fuente: Elaboración propia

La temperatura final de la palanquilla a la salida del HR será de 896°C.

Para hallar el nuevo tiempo de permanencia con la producción incrementada a 54,144tph, haremos uso de la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = A * v * \rho$$

$$\dot{m} = A * \frac{d}{t} * \rho$$

$$tiempo = \frac{A * d * \rho}{\dot{m}}$$

Donde:

\dot{m} = flujo másico (kg/h)

A= Área (m²)

v = Velocidad (m/s)

ρ = Densidad de la palanquilla (kg/m³)

Tabla 30. Cálculo del tiempo de permanencia de la palanquilla en el H.R.

Parámetros	Valores	Unidades
\dot{m}	54 144	Kg/h
Área	0,55	m ²
Longitud del horno	18,4	m
Densidad	7 691	kg/m ³
Tiempo de permanencia	1,44	hora

Fuente: Elaboración propia

La palanquilla demorará 47.7 segundos hasta el ingreso al Horno Inductor. Aplicaremos transferencia de calor en régimen transitorio y los diagramas de Heisler para hallar la temperatura de la palanquilla al ingreso del H.I.

Tabla 31. Cálculo de la temperatura de ingreso de la palanquilla al H.I.

Parámetros	Valores	Unidades
Coefficiente conductivo	30	W/mk
L_c	0,05	m
Coefficiente convectivo	25	W/m ² *K
1/Bi	24	
Tiempo	47,70	segundos
L_c	0,05	m
α	0,000018	m ² /s
Fo	0,34	> 0,2
θ_0	0,9973	-
θ/θ_0	0,9578	-
T_{ih}	856,56	°C

Fuente: Elaboración propia

Teniendo la temperatura de ingreso de 856,56°C, haremos uso de la ecuación 6 aplicada al H.I. para calcular la temperatura de salida de la palanquilla y evaluaremos si está en condiciones para su laminación.

Tabla 32. Cálculo de la temperatura de salida de la palanquilla del Horno Inductor.

Parámetros	Valores	unidades
Temperatura de Ingreso	856,56	°C
Número de Módulos	1	módulo
Potencia	2	MW
cp	1 169	J/KgK
producción	54,144	ton/h
Eficiencia por módulo	0,8352	%
T_{sh}	952	°C

Fuente: Elaboración propia

La temperatura de 952°C de la palanquilla es muy fría para su laminación, el rango de laminación es de 1100-1110°C.

- **Consolidado del balance de energía**

Utilizar un horno de inducción de 2MW no satisface las condiciones para elevar nuestra producción a 54,144tph. Un solo horno de inducción condiciona que la palanquilla deba salir del H.R. a 1 061,64 °C como mínimo El flujo de calor útil del H.R. garantiza que la palanquilla saldrá a 896°C si aumentamos nuestra producción a 54,144tph.



Figura 14. Diagrama de flujo del balance de energía con 01 H.I.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Margen de calor útil en el H.R. con 01 H.I.

Parámetros	Valores	unidades
Q útil del H.R.	5 720,37	KW
Q útil con H.I.	6 803,71	KW
Margen Q Útil	-1 083,34	KW

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Dimensionamiento con 02 módulos inductores

- **Balance de Energía del proceso ideal**

Teniendo como condición la temperatura de salida de la palanquilla en el último horno inductor, haremos uso de la ecuación 6 aplicado a los H.I. y calcularemos las temperaturas ideales para esta segunda situación.

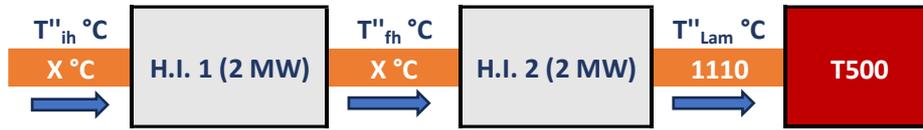


Figura 15. Diagrama de flujo temperaturas 02 H.I.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Cálculo de la temperatura ideal de ingreso al primer módulo.

Balance H.I 2			Balance H.I 1		
Parámetros	Valores	unidades	Parámetros	Valores	unidades
T''Lam °C	1 110	°C	T''fh °C	1 015	°C
# de módulo de 2MW	1	módulos	# de módulo de 2MW	1	módulo
Potencia	2	MW	Potencia	2	MW
cp	1 169	J/KgK	cp	1 169	J/KgK
producción	54,14	ton/h	producción	54,14	ton/h
Eficiencia por módulo	0,8352	%	Eficiencia por módulo	0,8352	%
T''fh °C	1 015	°C	T''ih °C	920	°C

Fuente: Elaboración propia

El tiempo que se tomará la palanquilla en llegar al primer módulo inductor es de 46,3 segundos desde la salida del H.R. En este tiempo la palanquilla pierde temperatura. Para hallar la temperatura de la palanquilla a la que debe salir del H.R. aplicaremos la conducción de calor en régimen transitorio.



Figura 16. Diagrama de flujo proceso con 02 H.I.

Fuente: Elaboración propia

Haremos uso de la ecuación 19 y 20 para calcular el número de Biot y Fourier. Con los gráficos de Heisler calcularemos la temperatura mínima de la palanquilla a la salida del H.R.

Tabla 35. Cálculo de la temperatura mínima de salida de la palanquilla en el H.R.

Parámetros	Valores	Unidades
Coficiente conductivo	30	W/mk
Lc	0,05	m
Coficiente convectivo	25	W/m ² *K
1/Bi	24	
Tiempo	46,30	segundos
Lc	0,05	m
α	0,0000177	m ² /s
Fo	0,3278	> 0,2
θ ₀	0,9974	-
θ/θ ₀	0,9578	-
T''_{sp}	962,10	°C

Fuente: Elaboración propia

Siendo la temperatura de ingreso de la palanquilla al H.R. de 20°C, el flujo de calor útil en el horno para elevarlo a 962,10°C sería de:

Tabla 36. Cálculo de flujo de calor útil necesario en el H.R.

Parámetros	Valores	Unidades
mpl	54,144	kg/h
T''fpl	962,10	°C
Tipl	20	°C
Cppl	0,104	kcal/kg °C
Q 2M	6 153,57	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Balance de Energía del proceso real**

De la tabla 29 sabemos que con la producción de 54,144tph, la temperatura de salida de la palanquilla en el H.R. es de 896°C con un tiempo de permanencia de 1,44 horas. La palanquilla demorará 46,30 segundos hasta el ingreso al Horno Inductor. Aplicaremos transferencia de calor en régimen transitorio y los diagramas de Heisler para hallar la temperatura de la palanquilla al ingreso del H.I.

Tabla 37. Cálculo de la temperatura de ingreso de la palanquilla al primer módulo.

Parámetros	Valores	unidades
Coficiente conductivo	30	W/mk
Lc	0,05	m
Coficiente convectivo	25	W/m ² *K
1/Bi	24	
Tiempo	46,30	segundos
Lc	0,05	m
α	0,0000177	m ² /s
Fo	0,3278	> 0,2
Θ_0	0,9974	-
Θ/Θ_0	0,9578	-
T_{ih}	856,63	°C

Fuente: Elaboración propia

Teniendo la temperatura de ingreso de 856,63°C en el primer módulo, haremos uso de la ecuación 6 aplicada al H.I. para calcular las temperaturas de ingreso y salida del segundo módulo.

Tabla 38. Cálculo de temperaturas de ingreso y salida en los Hornos Inductores.

Balance H.I 1			Balance H.I 2		
Parámetros	Valores	unidades	Parámetros	Valores	unidades
T _{ih} °C	856,63	°C	T _{fh} °C	951,63	°C
# de módulo de 2MW	1	módulos	# de módulo de 2MW	1	módulo
Potencia	2	MW	Potencia	2	MW
cp	1 169	J/KgK	cp	1 169	J/KgK
producción	54,14	ton/h	producción	54,14	ton/h
Eficiencia por módulo	0,8352	%	Eficiencia por módulo	0,8352	%
T_{fh} °C	951,60	°C	TLam °C	1 046,60	°C

Fuente: Elaboración propia

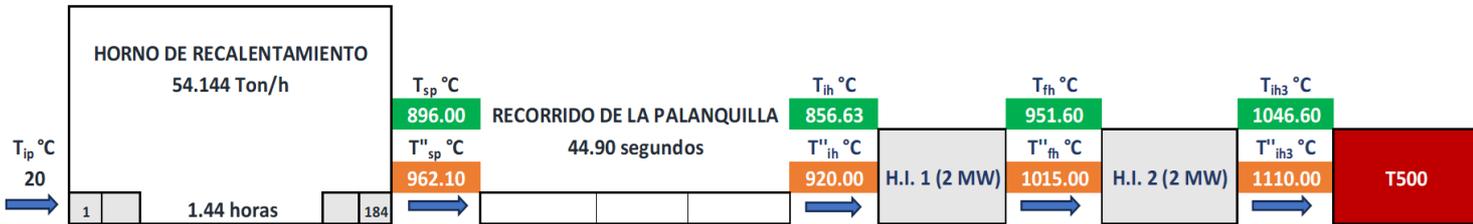
La temperatura de 1 047°C de la palanquilla es muy fría para su laminación, el rango de laminación es de 1 100 - 1110°C.

- **Consolidado del balance de energía**

Utilizar dos hornos de inducción de 2MW cada uno no satisface las condiciones para elevar nuestra producción a 54,144tph. Dos hornos de inducción en serie condicionan que la palanquilla deba salir del H.R. a 962,10 °C como mínimo. El flujo de calor

útil del H.R. garantiza que la palanquilla saldrá a 896°C si aumentamos nuestra producción a 54,144tph.

Figura 17. Diagrama de flujo del balance de energía con 02 H.I.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Margen de calor útil en el H.R. con 02 H.I.

Parámetros	Valores	unidades
Q útil del H.R.	5 720,37	KW
Q útil con H.I.	6 153,57	KW
Margen Q Útil	-433,2	KW

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Dimensionamiento con 03 módulos inductores

- **Balance de Energía del proceso ideal**

Teniendo como condición la temperatura de salida de la palanquilla en el último horno inductor, haremos uso de la ecuación 6 aplicado al H.I. y calcularemos las temperaturas ideales para esta tercera situación.



Figura 18. Diagrama de flujo temperaturas 03 H.I.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. Cálculo de la temperatura ideal de ingreso al primer módulo.

Balance H.I 3			Balance H.I 2			Balance H.I 1		
Parámetros	Valores	unidades	Parámetros	Valores	unidades	Parámetros	Valores	unidades
T ^{''} Lam °C	1 110	°C	T ^{'''} ih3 °C	1 014,99	°C	T ^{'''} fh °C	920	°C
# de módulos	1	módulos	# de módulo	1	módulo	# de módulo	1	módulo
Potencia	2	MW	Potencia	2	MW	Potencia	2	MW
cp	1 169	J/KgK	cp	1 169	J/KgK	cp	1 169	J/KgK
producción	54,14	ton/h	producción	54,14	ton/h	producción	54,14	ton/h
Eficiencia	0,8352	%	Eficiencia	0,8352	%	Eficiencia	0,8352	%
T^{'''}ih3 °C	1 015	°C	T^{'''}fh °C	920	°C	T^{'''}ih °C	825	°C

Fuente: Elaboración propia

El tiempo que se tomará la palanquilla en llegar al H.I. 1 es de 44,9 segundos desde la salida del H.R. En este tiempo la palanquilla pierde temperatura. Para hallar la temperatura de la palanquilla a la que debe salir del H.R. aplicaremos conducción de calor en régimen transitorio.

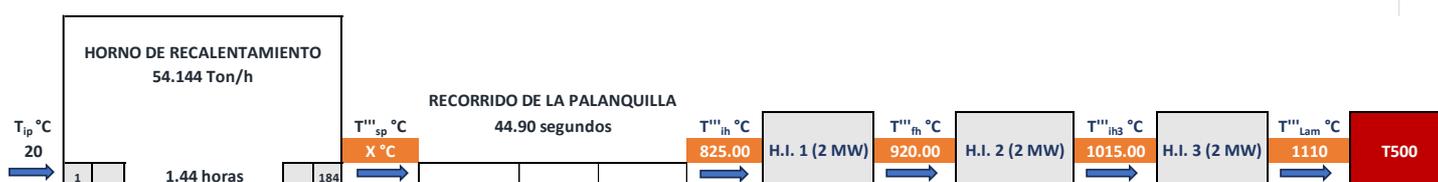


Figura 19. Diagrama de flujo proceso con 03 H.I.

Fuente: Elaboración propia

Haremos uso de la ecuación 19 y 20 para calcular el número de Biot y Fourier. Con los gráficos de Heisler calcularemos la temperatura mínima de la palanquilla a la salida del H.R.

Tabla 41. Cálculo de la temperatura mínima de salida de la palanquilla en el H.R.

Parámetros	Valores	Unidades
Coficiente conductivo	30	W/mk
Lc	0,05	m
Coficiente convectivo	25	W/m ² *K
1/Bi	24	
Tiempo	44,90	segundos
Lc	0,05	m
α	0,0000177	m ² /s
Fo	0,3278	> 0,2
Θ_0	0,9975	-
Θ/Θ_0	0,9578	-
T'''_{sp}	863	°C

Fuente: Elaboración propia

Siendo la temperatura de ingreso de la palanquilla al H.R. de 20°C, el flujo de calor útil en el horno para elevarlo a 863°C sería de:

Tabla 42. Cálculo de flujo de calor útil necesario en el H.R. con 03 H.I.

Parámetros	Valores	Unidades
mpl	54,144	kg/h
T'''fpl	863	°C
Tipl	20	°C
Cppl	0,104	kcal/kg °C
Q 3M	5 503,54	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Balance de Energía del proceso real**

De la tabla 29 sabemos que con la producción de 54,144tph, la temperatura de salida de la palanquilla en el H.R. es de 896°C con un tiempo de permanencia de 1,44 horas. La palanquilla demorará 44,90 segundos hasta ingresar al primer Horno Inductor. Aplicaremos transferencia de calor en régimen transitorio y los diagramas de Heisler para hallar la temperatura de la palanquilla al ingreso del H.I.

Tabla 43. Cálculo de la temperatura de ingreso de la palanquilla al primer módulo.

Parámetros	Valores	unidades
Coefficiente conductivo	30	W/mk
Lc	0,05	m
Coefficiente convectivo	25	W/m2*K
1/Bi	24	
Tiempo	46,30	segundos
Lc	0,05	m
α	0,0000177	m ² /s
Fo	0,3278	> 0,2
θ_0	0,9975	-
θ/θ_0	0,9578	-
T_{ih}	856,69	°C

Fuente: Elaboración propia

Teniendo la temperatura de ingreso de 856,69°C en el primer módulo, haremos uso de la ecuación 6 aplicada a los H.I. para calcular las temperaturas de ingreso y salida del segundo módulo y tercer módulo.

Tabla 44. Cálculo de temperaturas de ingreso y salida en los Hornos Inductores.

Balance H.I 1			Balance H.I 2			Balance H.I 3		
Parámetros	Valores	unidades	Parámetros	Valores	unidades	Parámetros	Valores	unidades
T _{ih} °C	856,69	°C	T _{fh} °C	951,70	°C	T _{ih3} °C	1 046,71	°C
# de módulos	1	módulos	# de módulo	1	módulo	# de módulo	1	módulo
Potencia	2	MW	Potencia	2	MW	Potencia	2	MW
cp	1 169	J/KgK	cp	1 169	J/KgK	cp	1 169	J/KgK
producción	54,14	ton/h	producción	54,14	ton/h	producción	54,14	ton/h
Eficiencia	0,8352	%	Eficiencia	0,8352	%	Eficiencia	0,8352	%
T_{fh} °C	951,70	°C	T_{ih3} °C	1 046,71	°C	T_{Lam} °C	1 141,71	°C

Fuente: Elaboración propia

La temperatura de 1 141,71°C de la palanquilla es ideal para su laminación, si bien el rango de laminación es de 1 100 – 1 110°C, en la práctica la temperatura de 1 141,71°C es aceptable.

- **Consolidado del balance de energía**

Utilizar tres hornos de inducción de 2MW cada uno sí satisface las condiciones para elevar nuestra producción a 54,144tph. Tres hornos de inducción en serie condicionan que la palanquilla deba salir del H.R. a 863°C como mínimo. El flujo de calor útil del H.R. garantiza que la palanquilla saldrá a 896°C si aumentamos nuestra producción a 54,144tph.

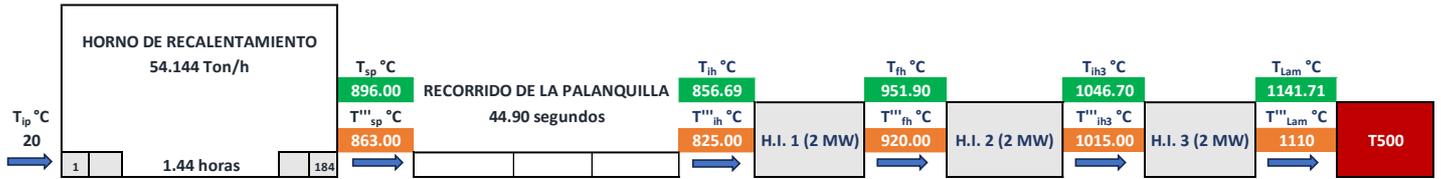


Figura 20. Diagrama de flujo del balance de energía.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Margen de calor útil en el H.R. con 03 H.I.

Parámetros	Valores	Unidades
Q útil del H.R.	5 720,37	KW
Q útil con H.I.	5 503,54	KW
Margen Q Útil	216,83	KW

Fuente: Elaboración propia

- **Tiempo del ciclo completo del proceso**

Del anexo 13 podemos determinar el espacio que ocuparán los hornos inductores y a que distancia se ubicarán cada uno.

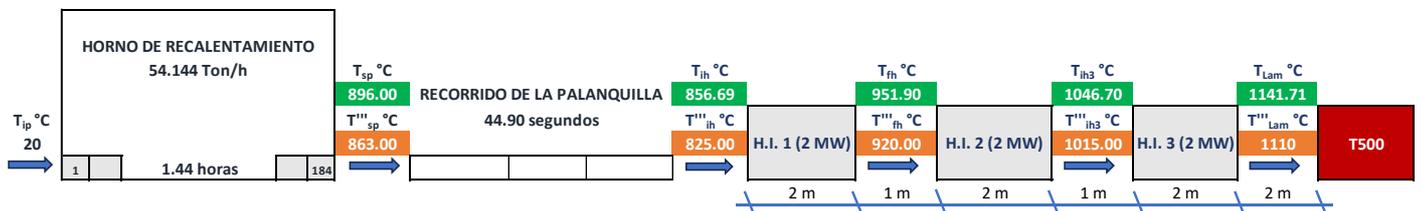


Figura 21. Espacio ocupado por los Hornos Inductores.

Fuente: Elaboración propia

El espacio ocupado total por los hornos inductores será de 8 metros y estarán a 2 metros del laminador T500. Haremos uso de la siguiente ecuación para calcular la velocidad en el H.I.

$$\dot{m} = A * v * \rho$$

Donde:

\dot{m} = flujo másico (kg/h)

A= Área (m²)

v= Velocidad (m/s)

ρ = Densidad de la palanquilla (kg/m³)

Tabla 46. Cálculo de la velocidad y el tiempo expuesto en los H.I.

Parámetros	Valores	Unidades
Área (100x100mm)	0,01	m ²
producción	54,144	ton/h
densidad	7 691	kg/m ³
Velocidad del Horno Inductor	0,20	m/s
Longitud	10	m
Permanencia en los H.I.	51,14	s

Fuente: Elaboración propia

Procedemos a sumar los tiempos del recorrido de la palanquilla y determinar el ciclo completo del proceso.

Tabla 47. Cálculo de la velocidad y el tiempo expuesto en los H.I.

Parámetros	Valores	Unidades
H.R. -----> 1er módulo	44,9	s
1er módulo -----> T500	50,9	s
Ciclo Completo	95,8	s

Elaboración propia

4.2.5. Indicadores de Desempeño Energético

- **Eficiencia del Horno:** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 14.

Tabla 48. Cálculo de la eficiencia del Horno.

Parámetros	Valores	Unidades
Q5	5 720,37	KW
Qe	7 353,85	KW
n	0.78	%

Fuente: Elaboración propia

- **Nivel de Producción (NP):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 15.

Tabla 49. Cálculo del Nivel de Producción.

Parámetros	Valores	Unidades
Producción	54,144	Ton
Tiempo	1	h
NP	54,144	Ton/h

Fuente: Elaboración propia

- **Indicador de Desempeño Energético Técnico (IDEs T):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 16.

Tabla 50. Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Técnico.

Parámetros	Valores	Unidades
mc	554	m3/h
Producción	54,144	Ton/h
IDEs T	10,07	m3/Ton

Fuente: Elaboración propia

- **Indicador de desempeño energético Ambiental (IEDs A):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 17. El Factor de Emisiones de CO₂ del Gas Natural se tomó del Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero del sector Energía del año 2016, anexo 4.

Tabla 51. Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Ambiental.

Parámetros	Valores	Unidades
mc	554	m3/h
Pci	9 370	kcal/m3
Densidad	0,743	kg/m3
Factor de Emisión	56,1	tonCO2/TJ
Producción	54,144	Ton/h
IDEs A	0,022	TonCO2/Ton

Fuente: Elaboración propia

- **Indicador de desempeño energético económico (IDEs E):** Para el siguiente cálculo haremos uso de la ecuación 18.

Tabla 52. Cálculo del Indicador de Desempeño Energético Económico.

Parámetros	Valores	Unidades
mc	56	m3/h
Precio	0,425	US\$/Sm3
Producción	54,144	Ton/h
IDEs E	4,52	US\$/Ton

Fuente: Elaboración propia

4.3. Evaluación Económica y Cuantificación de Beneficios

Este cálculo ha sido realizado bajo las siguientes premisas:

- Rendimiento metálico: 0,945
- Utilización efectiva: 0,696
- Costos de Operación y Mantenimiento del Horno a Gas (OFU): 0,5 US\$/Ton
- Costos de Operación y Mantenimiento de Hornos de Inducción + OFU: 1,0 US\$/Ton
- Costo operativo del tren laminador: 60 US\$/Ton
- Cero cargas calientes
- En base al mercado siderúrgico, se consideró como margen de ganancia neto (barra de construcción nacional) 76 US\$/Ton.

4.3.1. Alternativa A: Horno OFU Existente + Hornos de Inducción

La implementación de esta investigación tendría los siguientes beneficios:

4.3.1.1. Cuantificación de Beneficios – Alternativa A

- **Beneficio por Diferencia de Precio Barra Nacional vs Importación**

Se elabora el análisis marginal, al aumentar la producción en 83 942 Ton por año.

Tabla 53. Parámetros para el Cálculo del Beneficio 01 – Alternativa A.

Aumento de Producción Mensual	6 995,13	Ton/mes
Aumento de Producción Proyectada	83 942	Ton/año
Diferencia Nacional vs Importada	13	US\$/Ton
Beneficio Anual 01	1 128	k US\$/año

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Beneficio Anual 01} = 83\,942 * 13 = 1\,128 \text{ k US\$/año}$$

El beneficio obtenido es de **1 128 k US\$/año**. El desglose de este cálculo de beneficio se puede visualizar en el Anexo 10.

- **Beneficio por Mejora en el Rendimiento Metálico**

Los hornos de inducción traen consigo un beneficio de mejora en el rendimiento metálico. Esto se debe a que trabajar con horno a gas con temperatura a la salida más baja, significa una reducción de la pérdida metálica por cascarilla en hasta un 0.5%.

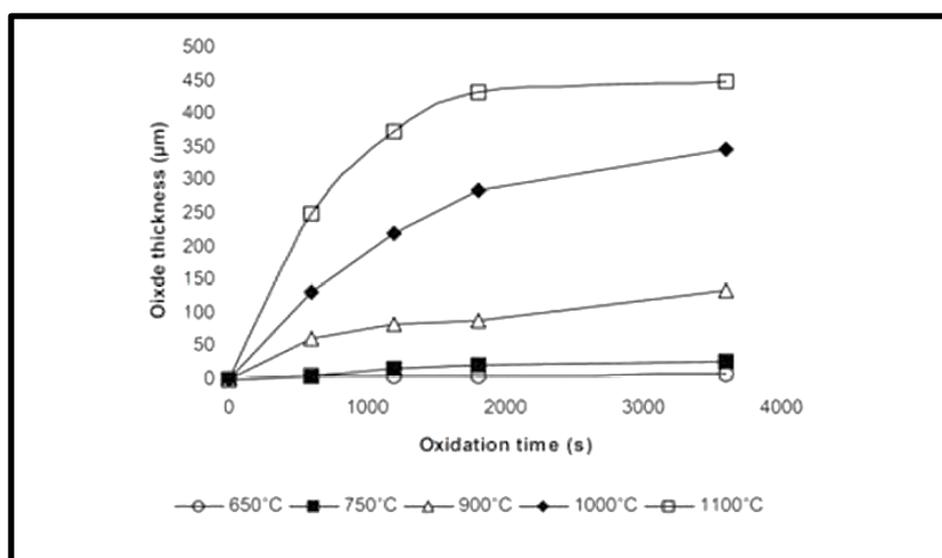


Figura 22. Espesor de Oxidación vs tiempo en acero con bajo contenido de carbono a diferentes temperaturas.

Fuente: Danieli, 2017.

Para este caso, se estará aplicando una reducción del 0,35%.

Tabla 54. Parámetros para el Cálculo del Beneficio 02 – Alternativa A.

Rendimiento metálico Base	94,05	%
	1,0582	kg/Ton
Rendimiento metálico Proyectada al 2026	96,05	%
	1,0411	kg/Ton
Producción Actual	238,31	kTon
(-) Retorno chatarra Base	-0,0457	kg/Ton
(-) Retorno chatarra Proyectada	-0,0286	kg/Ton
Materia Prima (Pql Importada)	790	US\$/Ton
Precio chatarra local	197,02	US\$/Ton
Beneficio Anual 02	2 413	k US\$/año

Fuente: Elaboración Propia

Entonces:

$$\text{Ben. Anual 02} = ((1,0582 - 1,0411) * 790 * 238,31) + ((-0,0457 - -0,0286) * 197,02 * 238,31)$$

$$\text{Beneficio Anual 02} = 2\,413 \text{ k US\$/año}$$

El beneficio obtenido es de **2 413 k US\$/año**. El desglose de este cálculo de beneficio se puede visualizar en el Anexo 11.

- **Beneficio por Reducción de Gastos**

Se tiene un siguiente beneficio por reducción de gastos, en este caso se obtiene un gasto por incremento de consumo eléctrico, por lo tanto, se realiza la siguiente cuantificación:

Tabla 55. Parámetros para el Cálculo del Beneficio por Incremento de Consumo Eléctrico – Alternativa A.

Potencia Total de Módulos	6 000	kW
Consumo específico de Energía	92,8	kWh/Ton
Producción promedio del mes con Hornos de Inducción	28 312	Ton/mes
Producción promedio del mes Actual	21 013	Ton/mes
Consumo Total del mes	2 627	MWh
Costo de la energía eléctrica (PEX 2023-2024)	72,7	US\$/MWh
	191 063	US\$
Costo Unitario de la Energía	6,748	US\$/Ton
Beneficio por Incremento del Consumo Eléctrico	-49 259	US\$/mes

Fuente: Elaboración Propia

Entonces:

$$\text{Beneficio anual por Incremento del C.E.} = (28\,312 - 21\,013) * 6,748 * 12$$

$$\text{Beneficio anual por Incremento del C.E.} = -49\,259 * 12$$

$$\text{Beneficio anual por Incremento del C.E.} = -591\,102 \text{ US\$/año}$$

Asimismo, tendremos una pérdida de producción de acero por el tiempo de parada para el montaje del equipo, se estimó 30 días.

$$\text{Gasto Montaje} = \text{Producción Proyectada Mensual} * \text{Dif. Nacional vs Importada}$$

$$\text{Gasto Montaje} = \left(\frac{322\,250}{11,5 * 30 * 24} \right) * 30 * -13$$

$$\text{Gasto Montaje} = -15\,686 \text{ US\$/año}$$

Entonces:

$$\text{Beneficio anual 03} = -591\,102 - 15\,686 = -607 \text{ k US\$/año}$$

El beneficio obtenido es de **-607 k US\$/año**. Dado que existirá un incremento alto en el consumo y costo de energía eléctrica, dicho beneficio es negativo.

Por lo tanto, el beneficio total es de **2 934 k US\$**. Se estima que los beneficios se obtendrán después de haber considerado 02 años para las etapas del desarrollo de la ingeniería, ejecución y montaje del proyecto. El desglose de este cálculo de beneficio se puede visualizar en el Anexo 11 y Anexo 12.

$$\text{Beneficio Total} = \text{Beneficio anual 01} + \text{Beneficio anual 02} + \text{Beneficio anual 03}$$

$$\text{Beneficio Total} = 1\,128 + 2\,413 - 607 = 2\,934 \text{ k US\$/año}$$

4.3.1.2. Evaluación del VAN, TIR y Tiempo De Retorno de la Inversión

Para una inversión de 03 módulos inductores se tiene el siguiente desglose:

Tabla 56. Inversión Estimada Hornos de Inducción.

03 Módulos Inductores	3 000 000	US\$
Piping	200 000	US\$
Civil	300 000	US\$
Eléctrica	735 667	US\$
Montaje	50 000	US\$
Inversión Total	4 285 667	US\$

Fuente: Elaboración Propia

Según Danieli (2017) el costo de un módulo inductor de 2MW es de 1 MUS\$, a esto se ha estimado un costo para las distintas disciplinas que se requieren para el montaje y funcionamiento del equipo.

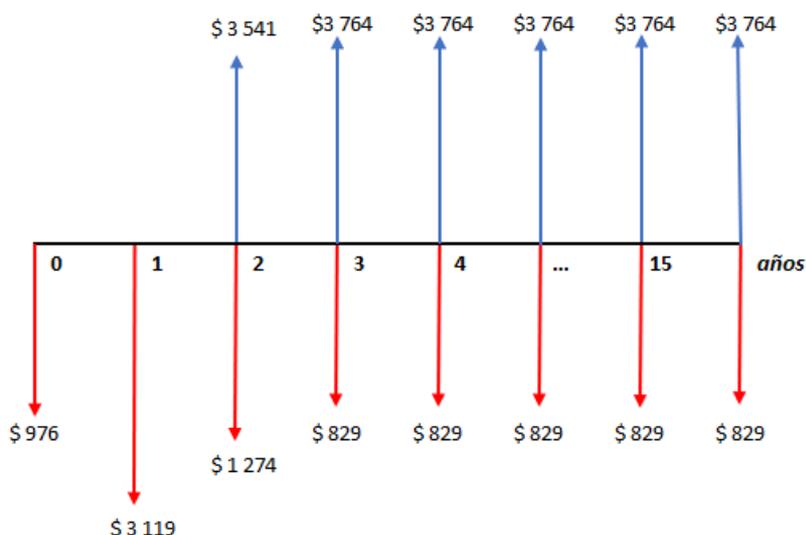
A continuación, tenemos el flujo de caja para el cálculo de los parámetros financieros:

Tabla 57. Flujo de Caja – Alternativa A.

		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
CAJA Laminadores 1y2				20%		10%												
Desembolso CAPEX	KUS\$	-857	-3000	-429														
Costo de Operación y Mntto.	KUS\$	-119	-119	-238	-238	-238	-238	-238	-238	-238	-238	-238	-238	-238	-238	-238	-238	-238
Reducción de gastos	KUS\$	0	0	-591	-591	-591	-591	-591	-591	-591	-591	-591	-591	-591	-591	-591	-591	-591
Beneficio Marginal	KUS\$	0	0	1128	1199	1199	1199	1199	1199	1199	1199	1199	1199	1199	1199	1199	1199	1199
Rendimiento Metálico	KUS\$	0	0	2413	2565	2565	2565	2565	2565	2565	2565	2565	2565	2565	2565	2565	2565	2565
Impacto por paradas	KUS\$	0	0	-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EBITDA	KUS\$	0	0	2696	2935	2935	2935	2935	2935	2935	2935	2935	2935	2935	2935	2935	2935	2935
FLUJO DE CAJA OPERATIVO	KUS\$	-976	-3,119	2,029	2,696													

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 23. Diagrama de Flujo de Caja – Alternativa A.



Fuente: Elaboración Propia.

✓ VAN, TIR y Tiempo de Retorno:

Tabla 58. Parámetros Financieros – Alternativa A.

Ítem	Valor	Unidad
Tiempo de Retorno	45	meses
TIR	59,05	% año
VAN	17 111 153	US\$

Retorno en: 3,75 años

Tabla 59. Tasa de Impuestos Considerados – Alternativa A.

Parámetros	Impuesto	Unidad
Tasa de Rentabilidad	10,25	% año
Impuesto a la renta	29,5	%

4.3.2. Alternativa B: Horno Nuevo a Gas 60 Ton

La implementación de esta investigación tendría los siguientes beneficios:

4.3.2.1. Cuantificación de Beneficios – Alternativa B

- **Beneficio por Diferencia de Precio Barra Nacional vs Importación**

Se elabora el análisis marginal, al aumentar la producción en 83 942 Ton por año.

Tabla 60. Parámetros para el Cálculo del Beneficio 01 – Alternativa B.

Aumento de Producción Mensual	8 276	Ton/mes
Aumento de Producción Proyectada	99 312	Ton/año
Diferencia Nacional vs Importada	10	US\$/Ton
Beneficio Anual 01	1 037	k US\$/año

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Beneficio Anual 01} = 99\,312 * 10 = 1\,037 \text{ k US\$/año}$$

El beneficio obtenido es de **1 037 k US\$/año**. El desglose de este cálculo de beneficio se puede visualizar en el Anexo 13.

- **Beneficio por Reducción de Gastos**

Se tiene un siguiente beneficio por reducción de gastos, en este caso tendremos una pérdida de producción de acero por el tiempo de parada para el montaje del equipo, se estimó 60 días.

$$\text{Gasto Montaje} = \text{Producción Proyectada Mensual} * \text{Dif. Nacional vs Importada}$$

$$\text{Gasto Montaje} = \left(\frac{322\,250}{11,5 * 30 * 24} \right) * 60 * -10$$

$$\text{Gasto Montaje} = -25\,556 \text{ US\$/año}$$

Entonces:

$$\text{Beneficio anual 02} = -25 \text{ K US\$/año}$$

El beneficio obtenido es de **-25 k US\$/año**. Dado que no habrá producción por parada anual, dicho beneficio es negativo.

Por lo tanto, el beneficio total es de **1 012 k US\$**. Se estima que los beneficios se obtendrán después de haber considerado 02 años para las etapas del desarrollo de la ingeniería, ejecución y montaje del proyecto. El desglose de este cálculo de beneficio se puede visualizar en el Anexo 13.

$$\mathbf{Beneficio\ Total} = \mathbf{Beneficio\ anual\ 01} + \mathbf{Beneficio\ anual\ 02}$$

$$\mathbf{Beneficio\ Total} = 1\ 037 - 25 = 1\ 012\ k\ US\$/año$$

4.3.2.2. Evaluación del VAN, TIR y Tiempo De Retorno de la Inversión

Para una inversión de 03 módulos inductores se tiene el siguiente desglose:

Tabla 61. Inversión Estimada de un Horno a Gas 60 Ton.

Equipo	2 485 200	US\$
Estructuras Metálicas	1 111 800	US\$
Refractario	768 000	US\$
Mecánica	525 000	US\$
Eléctrica	120 000	US\$
Civil	540 000	US\$
Montaje	1 594 000	US\$
Inversión Total	4 285 667	US\$

Fuente: Elaboración Propia

Dentro del montaje se incluye Equipo, Refractario, Sistema Hidráulico, Mesa de carga palanquillas, Camino de rodillos y Sistemas Auxiliares.

Según Ingener (2023) el costo de un nuevo Horno Walking Beam a gas es de 2,5 MUS\$, a esto se ha estimado un costo para las distintas disciplinas que se requieren para el montaje y funcionamiento del equipo, se debe tener en cuenta que dicho horno requiere mayor inversión debido al tamaño del equipo y sus sistemas auxiliares respectivos en comparación a los hornos de inducción pequeños.

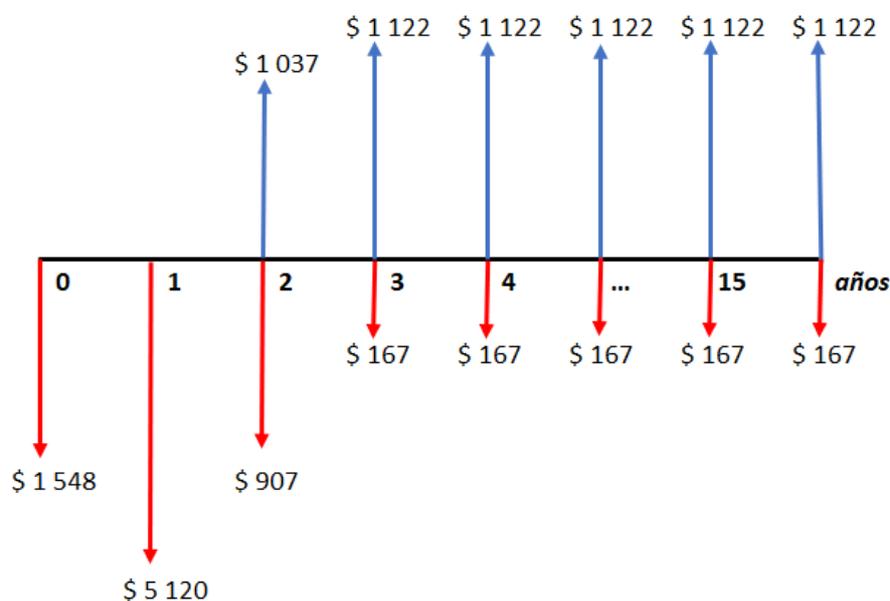
A continuación, tenemos el flujo de caja para el cálculo de los parámetros financieros:

Tabla 62. Flujo de Caja – Alternativa B.

		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
CAJA Laminadores 1y2			20%	10%														
Desembolso CAPEX	KUS\$	-1429	-5001	-714														
Costo de Operación y Mnnto.	KUS\$	-119	-119	-167	-167	-167	-167	-167	-167	-167	-167	-167	-167	-167	-167	-167	-167	-167
Reduccion de gastos	KUS\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Beneficio Marginal	KUS\$	0	0	1037	1122	1122	1122	1122	1122	1122	1122	1122	1122	1122	1122	1122	1122	1122
Impacto por paradas	KUS\$	0	0	-26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EBITDA	KUS\$	0	0	845	955	955	955	955	955	955	955	955	955	955	955	955	955	955
FLUJO DE CAJA OPERATIVO	KUS\$	-1,548	-5,120	-36	789													

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 24. Diagrama de Flujo de Caja – Alternativa B.



Fuente: Elaboración Propia.

✓ **VAN, TIR y Tiempo de Retorno:**

Tabla 62. Parámetros Financieros – Alternativa B.

Ítem	Valor	Unidad
Tiempo de Retorno	139	meses
TIR	18,44	% año
VAN	3 337 014	US\$

Retorno en: 11,58 años

Tabla 63. Tasa de Impuestos Considerados – Alternativa B.

Parámetros	Impuesto	Unidad
Tasa de Rentabilidad	10,25	% año
Impuesto a la renta	29,5	%

4.3.3. Comparación Financiera de Alternativas

Comparando ambas alternativas, se concluye lo siguiente:

	<u>ALTERNATIVA A</u>		<u>ALTERNATIVA B</u>
VAN	17 111 153	>	3 337 014
TIR	59,05 %	>	18,44%
Retorno	3,75 años	<	11,58 años

Por lo tanto, la alternativa A de mantener el horno OFU existente junto con los hornos de inducción, para incrementar la producción requerida, son más viables económicamente respecto a la alternativa B de un nuevo horno de 60 Ton.

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Resultados

5.1.1. Dimensionamiento óptimo

La situación ideal establece las condiciones mínimas para que la palanquilla llegue a una temperatura ideal de laminación y sea factible elevar nuestra producción de 40,185 tph a 54,144 tph

Tabla 64. Evaluación del dimensionamiento ideal con Hornos Inductores.

01 HORNO INDUCTOR POTENCIA 2 MW	Situación Actual 40,185 tph			Situación Proyectada 54,144 tph - Ideal			Situación Proyectada 54,144 tph - Real			NO ES FACTIBLE
	Parámetros	Valores	und	Parámetros	Valores	und	Parámetros	Valores	und	
	T ingreso al H.R.	20	°C	T ingreso al H.R.	20	°C	T ingreso al H.R.	20	°C	Implementar 1 módulo inductor no satisface las condiciones de laminación para incrementar nuestra producción. Margen Calor Útil -1 083,34 KW
	T salida del H.R.	1 200	°C	T salida del H.R.	1 061	°C	T salida del H.R.	896	°C	
	T de laminación	1 100 – 1 110	°C	T de laminación	1 100-1 110	°C	T de laminación	952	°C	
	Calor útil	5 720,37	KW	Calor útil Ideal	6 803,71	KW	Calor útil Real	5 720,37	KW	
02 HORNOS INDUCTORES POTENCIA 4 MW	Situación Actual 40,185 tph			Situación Proyectada 54,144 tph - Ideal			Situación Proyectada 54,144 tph - Real			NO ES FACTIBLE
	Parámetros	Valores	und	Parámetros	Valores	und	Parámetros	Valores	und	
	T ingreso al H.R.	20	°C	T ingreso al H.R.	20	°C	T ingreso al H.R.	20	°C	Implementar 2 módulos inductores no satisface las condiciones de laminación para incrementar nuestra producción. Margen Calor Útil -433,2 KW
	T salida del H.R.	1 200	°C	T salida del H.R.	962,10	°C	T salida del H.R.	896	°C	
	T de laminación	1 100 – 1 110	°C	T de laminación	1 100-1 110	°C	T de laminación	1 046,60	°C	
	Calor útil	5 720,37	KW	Calor útil Ideal	6 153,57	KW	Calor útil Real	5 720,37	KW	
03 HORNOS INDUCTORES POTENCIA 6 MW	Situación Actual 40,185 tph			Situación Proyectada 54,144 tph - Ideal			Situación Proyectada 54,144 tph - Real			SI ES FACTIBLE
	Parámetros	Valores	und	Parámetros	Valores	und	Parámetros	Valores	und	
	T ingreso al H.R.	20	°C	T ingreso al H.R.	20	°C	T ingreso al H.R.	20	°C	Implementar 3 módulos inductores sí satisface las condiciones de laminación para incrementar nuestra producción. Margen Calor Útil 216,83 KW
	T salida del H.R.	1 200	°C	T salida del H.R.	863	°C	T salida del H.R.	896	°C	
	T de laminación	1 100 – 1 110	°C	T de laminación	1 100-1 110	°C	T de laminación	1 141,71	°C	
	Calor útil	5 720,37	KW	Calor útil Real	5 503,54	KW	Calor útil Real	5 720,37	KW	

Fuente: Elaboración propia

5.1.2. Optimización de Indicadores de Desempeño Energético

Tabla 65. Resultado de la optimización de los indicadores de desempeño energético.

03 HORNOS INDUCTORES POTENCIA 6 MW	Situación Actual 40,185 tph			Situación Proyectada 54,144 tph			Optimización
	KPI's	Valores	und	KPI's	Valores	und	
	IDEs T	13,78	m3/Ton	IDEs T	10,07	m3/Ton	27%
	IDEs A	0,03	TonCO2/Ton	IDEs A	0,022	TonCO2/Ton	27%
	IDEs E	6,19	US\$/Ton	IDEs E	4,52	US\$/Ton	27%

Fuente: Elaboración propia

5.2. Discusiones

- Para incrementar el flujo másico del horno de recalentamiento de 40,185tph a 54,144tph se hizo un balance energético considerando módulos de hornos inductores de 2MW cada uno con una eficiencia de 83,52%. La configuración ideal para que la carga cumpla con las condiciones de laminación de 1 100 1 110°C es utilizando 3 módulos inductores en serie ubicados a dos metros del laminador T500, esta configuración nos da un margen de 216,83 KW de flujo de calor útil en el horno de recalentamiento. Utilizar una configuración con 2 módulos inductores en serie condiciona que el horno de recalentamiento deba entregar más flujo de calor útil que la de su capacidad. Utilizar una configuración de 4 módulos inductores sobredimensiona el sistema.
- El ciclo completo del proceso se eleva a 95,8 segundos debido a la baja velocidad de 0,20 m/s que la carga se expone a los hornos inductores hasta llegar al laminador.
- Los beneficios se consideran en el flujo de caja por 15 años, considerando una depreciación de 10 años, un WACC de 10,25% y un Impuesto sobre la renta de 29,5%.
- Para el cálculo de retorno de la inversión se ha considerado 02 años para las etapas del desarrollo de la ingeniería, ejecución y montaje del proyecto.
- La inversión total se ha distribuido en 03 años, un desembolso del 20% para el primer año, 70% para el segundo y el restante para el tercer año donde se estima ejecutar el proyecto.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- ✓ El balance energético del proceso actual establece una eficiencia del 78% del horno de recalentamiento con su producción actual de 40,185 toneladas/hora, utilizando el gas natural como combustible y con la carga ingresando a 20°C.
- ✓ Se definieron los indicadores de desempeño energético en la situación actual, teniendo un consumo de 13,78 m³ de gas natural por tonelada de acero recalentado (IDEs T), se emite 0,03 toneladas de CO₂ por tonelada de acero recalentado (IDEs A) y 6,19 US\$ facturados por consumo de gas natural por toneladas de acero recalentado (IDEs E).
- ✓ Para incrementar la capacidad nominal a 57,3 toneladas/hora y se cumplan las condiciones para la laminación de la carga se instalarán 3 hornos inductores de 2MW c/u, ubicados a 2m antes de la 1era caja de laminación. Este dimensionamiento permite que el flujo de calor útil en el horno de recalentamiento tenga un margen de 216,83 KW y que la carga llegue al laminador con una temperatura de 1 141,71 °C que si bien no se encuentra en el margen de los 1 100-1 110°C es una temperatura aceptable para su laminación ya que en la práctica la carga mantiene una uniformidad de 40°C.
- ✓ Con el incremento de la capacidad utilizando hornos de inducción, los indicadores de desempeño energético en el horno de recalentamiento se optimizaron es un 27%. Se redujo el consumo de gas natural a 10,07 m³ de gas natural por tonelada de acero recalentado (IDEs T), las emisiones se redujeron a 0,022 toneladas de CO₂ por toneladas de acero recalentado (IDEs A) y la facturación por consumo de gas natural se redujo a 4,52 US\$ por toneladas de acero recalentado (IDEs E).
- ✓ La investigación propuesta (Alternativa A) tuvo como beneficio 2 934 kUS\$/año, con una inversión de 4 285 kUS\$ y un retorno de 3,75 años, considerando dentro del retorno 2 años para las etapas del desarrollo de la ingeniería, ejecución y montaje del proyecto, por lo que se concluye que el estudio es factible, trae ventajas económicas y minimiza el impacto ambiental al utilizar energía eléctrica en vez de un combustible fósil como el gas natural.

- ✓ Se realizó una comparación de alternativas, siendo la alternativa A, propuesta en la investigación, la más viable.

6.2. Recomendaciones

- ✓ Se recomienda que el sistema deba contar con un control automático de temperatura y detectores de metal caliente a la entrada y salida de los módulos inductores.
- ✓ Realizar una simulación detallada del perfil de temperaturas, esto permitirá evaluar de manera exhaustiva las variaciones térmicas a lo largo de la barra durante diferentes condiciones de operación y visualizar su comportamiento dentro de los módulos inductores.
- ✓ Realizar las siguientes etapas para la ingeniería de detalle del estudio propuesto y posteriormente la implementación del equipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ Calvo, C. (2015). Hornos Utilizados en la Fabricación de Aleaciones Ferrosas y No Ferrosas. doi:<https://doi.org/10.31381/scientia.v17i17.388>
- ✓ Cengel, Y. (2011). Transferencia de Calor y Masa (4ª ed.).
- ✓ Cerquera, N. y Pastrana, E. (2014). Evaluación de la Eficiencia Energética en los Hornos Tradicionales de Curado de Tabaco.
- ✓ Danieli. (2017). Estudio Para La Instalación De Un Horno De Inducción En El Tren Laminador N.2. Italia.
- ✓ Díaz, J., & Sánchez, J. (2011). Introducción a los Hornos utilizados en la industria cerámica tradicional. Bucaramanga: Universidad Francisco De Paula Santander.
- ✓ Díaz, Y. (2012). Diseño del Horno de Inducción con vista a Laminación Continua de la Palanquilla de Acero. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría.
- ✓ Garay, L. (2017). Diseño de un horno de inducción magnética. Concepción: Universidad del Bío-Bío.
- ✓ García, P. (2017). Funcionamiento y simulación de un horno alto. Oviedo: Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo.
- ✓ González, W., Aller, J., Lászlo, S., & Horvart, J. (2013). Diseño y construcción de bobinas de calentamiento para hornos de inducción electromagnética. Universidad, Ciencia y Tecnología. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212013000100004.
- ✓ Guevara, R. (2020). Diagnósticos y Racionalización de la Energía. Perú: Universidad Nacional del Santa.
- ✓ Ingenier. (2023). Horno de Empuje. Obtenido de <https://www.ingenierfurnaces.com/es/hornos-industriales/hornos-de-recalentamiento/horno-de-empuje/>

- ✓ Ingener. (2023). Horno walking hearth - beam. Obtenido de <https://www.ingenerfurnaces.com/es/hornos-industriales/hornos-de-recalentamiento/horno-walking-hearth-beam/>
- ✓ Ionut, G. (2016). Mejoras Energéticas en un Horno Industrial de una Empresa Petroquímica.
- ✓ Mete, M. R. (2014). Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. *Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 7(7), 67-85
- ✓ Ortega, J., Estrada, L., Fuentes, C., Rodríguez, E., Álvarez, I., Arizaga, J., & Díaz, D. (2015). Sistema de calentamiento por inducción electromagnética para pruebas experimentales en laboratorios de Físico-Química. México: Instituto Tecnológico de Celaya.
- ✓ Quispe, J. (2021). Análisis de los índices energéticos para optimizar el consumo energético en una empresa procesadora de lácteos en la ciudad de Cajamarca.
- ✓ Radas, A., & Urcia, E. (2022). Efecto de un sistema de precalentamiento de carga en los indicadores energéticos del horno de palanquillas de la empresa Siderperu. Nuevo Chimbote: Universidad Nacional del Santa.
- ✓ Sanchez, J. (2000). Diseño, Construcción y Análisis de 4 Hornos de Alimentación Manual para el Relevado de Esfuerzos en Resortes. Queretaro: Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
- ✓ Trinks, W. y Mawhinney, M. (1975). Hornos Industriales. Urmo S.A. de Ediciones.

ANEXOS

Anexo 1. Consumo de Gas Natural y Oxígeno.

PARÁMETROS	UNIDADES	2022					2023						
		AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
Consumo de Gas Natural	Nm3/t	26.57	26.51	25.04	24.00	24.30	29.84	29.82	29.14	26.33	26.88	24.58	29.79
	Sm3/mes	580,546	566,094	577,207	508,373	442,558	636,854	444,831	419,795	464,375	509,860	542,296	344,814
PCS Gas Natural	MJ/Nm3	42.38	42.73	42.50	42.50	42.27	42.64	42.91	42.97	42.96	42.97	42.72	42.90
	BTU/Sm3	38,020	38,336	38,123	38,123	37,922	38,252	38,492	38,547	38,537	38,549	38,327	38,484
PCI Gas Natural	MJ/Nm3	38.99	39.32	39.10	39.10	38.89	39.23	39.48	39.53	39.52	39.53	39.31	39.47
Consumo de oxígeno	Nm3/t	19.13	16.33	15.62	14.97	15.11	11.76	17.82	17.87	14.37	16.31	14.13	17.55
	Nm3/mes	395,480	329,942	340,695	300,155	260,432	237,544	251,577	243,608	239,791	292,741	294,855	192,221

Fuente: SIDERPERÚ

Anexo 2. Propiedades de los metales sólidos

868
APÉNDICE 1

TABLA A-3

Propiedades de metales sólidos

Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), $k(\text{W/m} \cdot \text{K})/c_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$					
		ρ kg/m ³	c_p J/kg · K	k W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m ² /s	100	200	400	600	800	1 000
Aluminio:											
Puro	933	2 702	903	237	97.1	302	237	240	231	218	
Aleación 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2 770	875	177	73.0	482	798	949	1 033	1 146	
Aleación 195, fundido (4.5% Cu)		2 790	883	168	68.2	473	787	925	1 042		
Berilio	1 550	1 850	1 825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8
						203	1 114	2 191	2 604	2 823	3 018
Bismuto	545	9 780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04			
						112	120	127			
Boro	2 573	2 500	1 107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	9.60	9.85
						128	600	1 463	1 892	2 160	2 338
Cadmio	594	8 650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7			
						198	222	242			
Cromo	2 118	7 160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4
						192	384	484	542	581	616
Cobalto	1 769	8 862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1
						236	379	450	503	550	628
Cobre:											
Puro	1 358	8 933	385	401	117	482	413	393	379	366	352
						252	356	397	417	433	451
Bronce comercial (90% Cu, 10% Al)	1 293	8 800	420	52	14		42	52	59		
							785	160	545		
Bronce al fósforo para engranes (89% Cu, 11% Sn)	1 104	8 780	355	54	17		41	65	74		
							—	—	—		
Latón para cartuchos (70% Cu, 30% Zn)	1 188	8 530	380	110	33.9	75	95	137	149		
							360	395	425		
Constantán (55% Cu, 45% Ni)	1 493	8 920	384	23	6.71	17	19				
						237	362				
Germanio	1 211	5 360	322	59.9	34.7	232	96.8	43.2	27.3	19.8	17.4
						190	290	337	348	357	375
Oro	1 336	19 300	129	317	127	327	323	311	298	284	270
						109	124	131	135	140	145
Iridio	2 720	22 500	130	147	50.3	172	153	144	138	132	126
						90	122	133	138	144	153
Hierro:											
Puro	1 810	7 870	447	80.2	23.1	134	94.0	69.5	54.7	43.3	32.8
						216	384	490	574	680	975
Armco (99.75% puro)		7 870	447	72.7	20.7	95.6	80.6	65.7	53.1	42.2	32.3
						215	384	490	574	680	975
Aceros al carbono:											
Simple al carbono (Mn ≤ 1%, Si ≤ 0.1%)		7 854	434	60.5	17.7			56.7	48.0	39.2	30.0
								487	559	685	1 169
AISI 1010		7 832	434	63.9	18.8			58.7	48.8	39.2	31.3
								487	559	685	1 168
Al carbono-silicio (Mn ≤ 1%, 0.1% < Si ≤ 0.6%)		7 817	446	51.9	14.9			49.8	44.0	37.4	29.3
								501	582	699	971

Fuente: Yunus A. Cengel

Anexo 3. Propiedades de los metales sólidos

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

Fuente: Yunus A. Cengel

RAGEI 2016

6.1.3. Factores de emisión y de conversión

Los factores de emisión aquí presentados son obtenidos casi todos de las Directrices del IPCC de 2006 con excepción del factor de emisión para estimar las emisiones de CO₂ por la quema del gas natural. La metodología seguida para obtener este factor de emisión nacional se describe en el Anexo 3.

a) 1A1 Industrias de Energía

Para todas las fuentes incluidas dentro de las industrias de la energía (1A1) se han utilizado los siguientes factores de emisión.

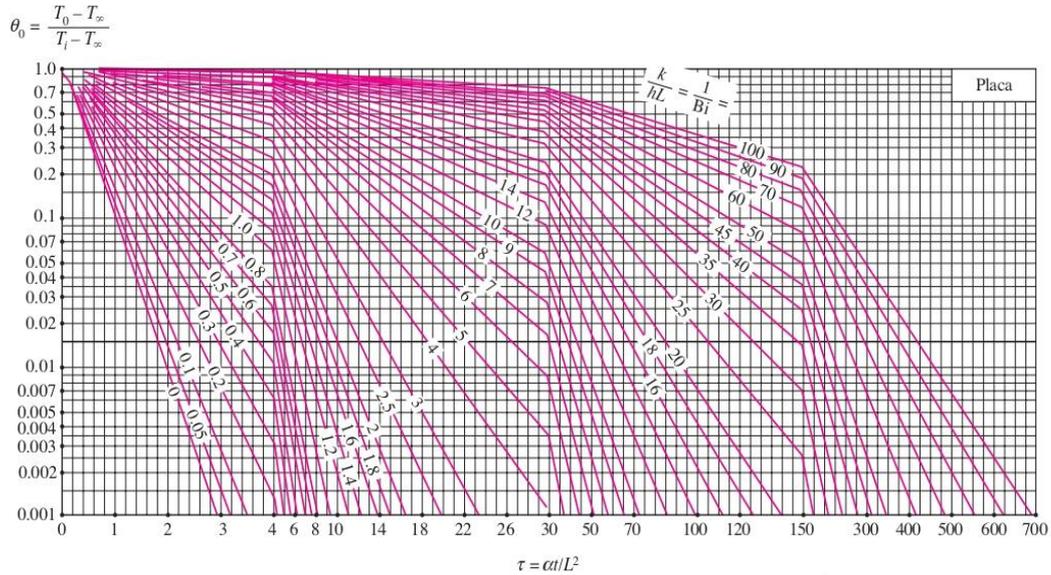
Tabla 30. Factores de emisión por defecto para la combustión estacionaria en las industrias energéticas

Combustible		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
		FE por defecto (kgCO ₂ /TJ)	FE por defecto (kgCH ₄ /TJ)	FE por defecto (kgN ₂ O/TJ)
Petróleo crudo		73,300.00	3.00	0.60
Gas Natural Licuado		64,200.00	3.00	0.60
Gasolina para motores		69,300.00	3.00	0.60
Gas/Diésel Oil		74,100.00	3.00	0.60
Fuelóleo residual		77,400.00	3.00	0.60
Gases licuados de petróleo		63,100.00	1.00	0.10
Antracita		98,300.00	1.00	1.50
Carbón de coque		94,600.00	1.00	1.50
Gas natural		56,126.26 ^B	1.00	0.10
Biocombustibles líquidos	Biogasolina	70,800.00	3.00	0.60
	Biodiésel	70,800.00	3.00	0.60
	Otros biocombustibles líquidos	79,600.00	3.00	0.60
Biomasa sólida	Otra biomasa sólida primaria	100,000.00	30.00	4.00
	Madera/Desechos de madera	112,000.00	300.00	4.00
	Carbón vegetal	112,000.00	200.00	4.00
Biomasa gaseosa	Gas de vertedero	54,600.00	1.00	0.10
Kerosene		71,900.00	3.00	0.60

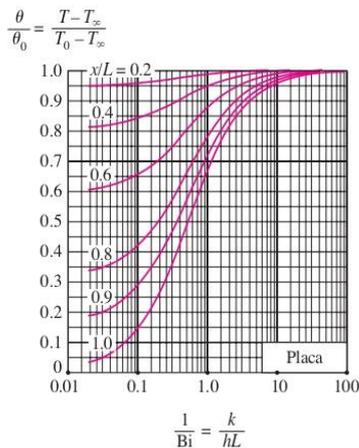
Fuente: Directrices del IPCC de 2006, Volumen 2, pág. 2.16 - 2.17

Fuente: RAGEI 2016

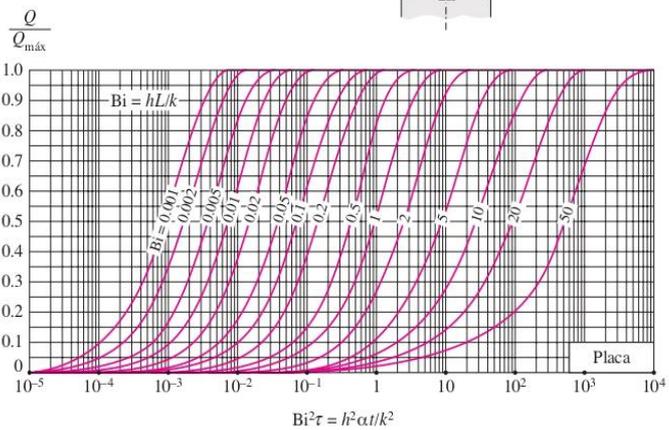
Anexo 5. Diagramas de temperatura transitoria y de transferencia de calor para una pared plana de espesor $2L$, inicialmente a una temperatura uniforme T_i , sujeta a convección desde ambos lados hacia un medio ambiente a la temperatura T_∞ , con un coeficiente de convección de h .



a) Temperatura del plano medio (tomada de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating", *Trans. ASME* 69, 1947, pp. 227-236. Reimpreso con autorización de ASME International).



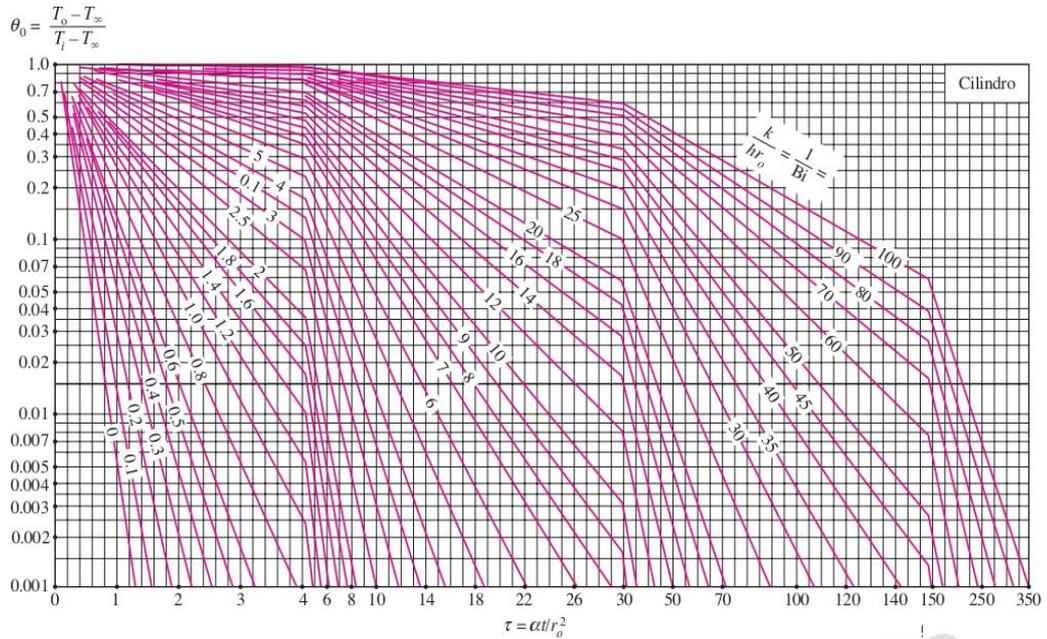
b) Distribución de temperatura (tomada de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating", *Trans. ASME* 69, 1947, pp. 227-236. Reimpreso con autorización de ASME International).



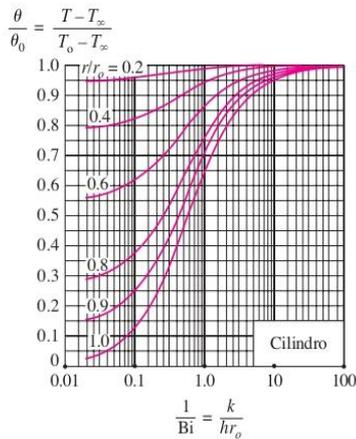
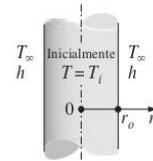
c) Transferencia de calor (tomada de H. Gröber *et al.*).

Fuente: Yunus A. Cengel

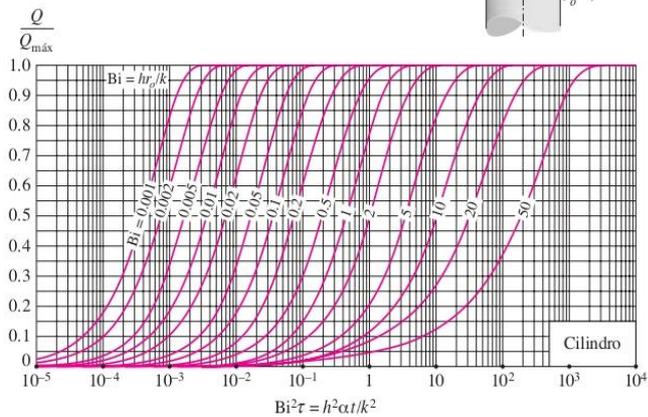
Anexo 6. Diagramas de temperatura transitoria y de transferencia de calor para un cilindro largo de radio r_o , inicialmente a una temperatura uniforme T_i , sujeto a convección desde todos lados hacia un medio ambiente a la temperatura T_∞ , con un coeficiente de convección de h .



a) Temperatura de la línea central (tomada de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating", *Trans. ASME 69*, 1947, pp. 227-236. Reimpreso con autorización de ASME International).



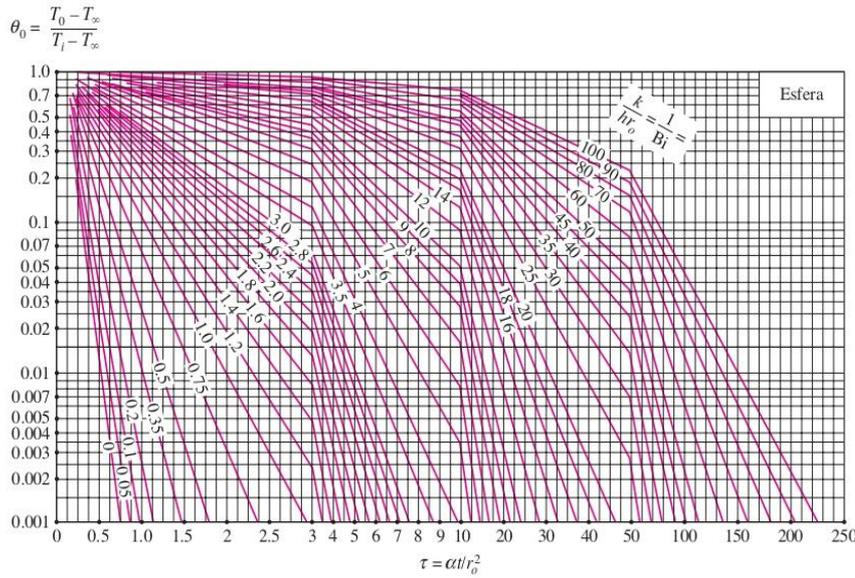
b) Distribución de temperaturas (tomada de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating", *Trans. ASME 69*, 1947, pp. 227-236. Reimpreso con autorización de ASME International).



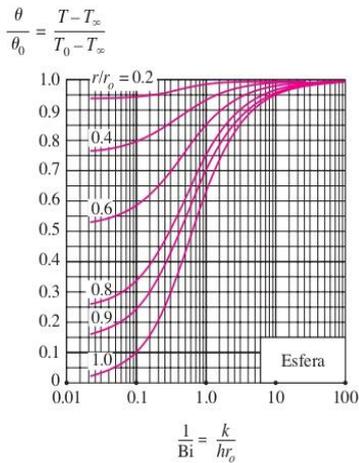
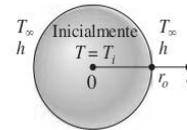
c) Transferencia de calor (tomada de H. Gröber *et al.*).

Fuente: Yunus A. Cengel

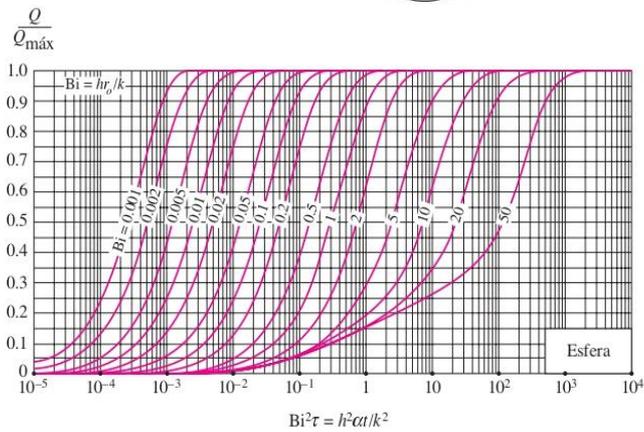
Anexo 7. Diagramas de temperatura transitoria y de transferencia de calor para una esfera de radio r_0 , inicialmente a una temperatura uniforme T_i , sujeta a convección desde todos lados hacia un medio ambiente a la temperatura T_∞ , con un coeficiente de convección de h .



a) Temperatura en el centro (tomada de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating", *Trans. ASME* 69, 1947, pp. 227-236. Reimpreso con autorización de ASME International).



b) Distribución de temperaturas (tomada de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating", *Trans. ASME* 69, 1947, pp. 227-236. Reimpreso con autorización de ASME International).



c) Transferencia de calor (tomada de H. Gröber *et al.*).

Fuente: Yunus A. Cengel

Anexo 8. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección

Fluido	Coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m ² K)	
Convección libre de gases	2	25
Convección libre de líquidos	10	1 000
Convección forzada de gases	25	250
Convección forzada de líquidos	50	20 000
Ebullición y condensación	2 500	100 000

Fuente: Yunus A. Cengel

Anexo 9. Tiempos del recorrido de la palanquilla en el proceso

1) Tornamesa					
Distancia	m	12			
tiempo	s	12			
2) Camino de Rodillos					
Diámetro de rodillo	m	0.219			
Velocidad angular	rpm	261			
Velocidad	m/s	2.99			
distancia	m	80			
tiempo	s	26.73			
3) Transferidor					
Diámetro de rodillo	m	0.32			
Velocidad angular	rpm	261			
Velocidad	m/s	4.37			
distancia	m	12.5			
tiempo	s	2.86			
4) Salida Transferidor					
Diámetro de rodillo	m	0.32			
Velocidad angular	rpm	135			
Velocidad	m/s	2.26			
distancia	m	6			
tiempo	s	2.65			
5) Rodillo entrada T500			1 módulo inductor	2 módulos inductore	3 módulos inductore
Diámetro de rodillo	m	0.31	0.31	0.31	0.31
Velocidad angular	rpm	135	135	135	135
Velocidad	m/s	2.19	2.19	2.19	2.19
distancia	m	11.5	1.5	4.5	7.5
tiempo	s	5.25	0.68	2.05	3.42
Recorridos de la palanquilla hasta el primer módulo inductor					
tiempo situación actual			49.5		s
tiempo sit propuesto 1 módulo			47.7		s
tiempo sit propuesto 2 módulos			46.3		s
tiempo sit propuesto 3 módulos			44.9		s

Fuente: Elaboración propia

Anexo 10. Beneficio Marginal Producir vs Importar – Alternativa A

Laminador 2	Unid.	Base	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Capacidad Total	kt	238	188	142	199	222	232	238	238	238	238	238	238
Δ Capacidad vs 2021	t									84	84	84	84
Costo Marginal de Producir	USD/t									853	852	852	852
Costo Empleo (Palanquilla import)	USD/t									816	816	816	816
Materia Prima (PqI Importada)	USD/t									790	790	790	790
Ratios	Kg/t									1.041	1.040	1.040	1.040
retorno chatarra	USD/t									-6	-6	-6	-6
Costos Variables	USD/t									36	36	36	36
Costo Variable	USD/t									36	36	36	36
Costo Importaciones	USD/t									866	866	866	866
Costo Importación CFR	USD/t									848	848	848	848
Otros gastos Importación	USD/t									8	8	8	8
Estandarizado	USD/t									10	10	10	10
Beneficio Marginal Producir vs Importar	USD/t									-13	-14	-14	-14
1. Beneficio Total Producir vs Importar	KUSD									1,128	1,199	1,199	1,199

Fuente: Elaboración propia

Anexo 11. Beneficio por Rendimiento Metálico y por Reducción de Gastos – Alternativa A

Laminador 2	Unid.	Base	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Mejora en Rendimiento Metálico	%	94.5%						94.5%		96.0%	96.1%	96.1%	96.1%
Mejora en Rendimiento Metálico	Kg/t	1.058						1.058		1.041	1.040	1.040	1.040
Producción Actual	kt									238	238	238	238
(-) Retorno chatarra	Kg/t	(0.046)						-0.046		-0.029	-0.028	-0.028	-0.028
Precio chatarra local	USUSD/t									197	197	197	197
2. Mejora Rendimiento Metálico	KUSD									2,413	2,565	2,565	2,565
3. Reducción de Gastos	KUSD									-608	-591	-591	-591

Fuente: Elaboración propia

Anexo 12. Cálculo de Beneficio por Reducción de Gastos – Alternativa A

DATA: ENERO - DICIEMBRE 2022			70%		
SITUACION ACTUAL LAM 2			SITUACION PROPUESTA - HORNOS DE INDUCCIÓN (LAM 2)		
Costos del consumo de la energía eléctrica			Beneficio 1. Costos del consumo de la energía eléctrica		
-	kW		Potencia módulos - 3 de 2MW c/u		
-	kW		kW		
Consumo total del mes	MWH/mes	0	Consumo específico de energía		
Costo de la energía eléctrica (2022)	USD/MWH	60.86	kWh/t		
Producción Promedio del mes con Hornos a Gas	tpm	21,013.1	Producción promedio del mes con Hornos de Inducción		
			tpm		
			Consumo total del mes (HI)		
			MWH		
			USD/MWH		
			Costo de la energía eléctrica (PEX 2023-2024)		
			USD		
			Costo Unitario de la Energía		
			USD/ton		
Sub-total	USD/mes	0	Sub-total		
			USD/mes		
Costo total actual del Laminador 1	USD/mes	0	Costo propuesto total del Laminador 2		
			USD/mes		

Fuente: Elaboración propia

Anexo 13. Beneficio Marginal Producir vs Importar – Alternativa B

Laminador 2	Unid.	Base	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Capacidad Total	kt	238	188	142	199	222	232	238	238	238	238	238	238
Δ Capacidad vs 2021	t									99	99	99	99
Costo Marginal de Producir	USD/t									856	855	855	855
Costo Empleo (Palanquilla import)	USD/t									819	819	819	819
Materia Prima (Pq) Importada)	USD/t									790	790	790	790
Ratios	Kg/t									1.045	1.044	1.044	1.044
retorno chatarra	USD/t									-6	-6	-6	-6
Costos Variables	USD/t									36	36	36	36
Costo Variable	USD/t									36	36	36	36
Costo Importaciones	USD/t									866	866	866	866
Costo Importación CFR	USD/t									848	848	848	848
Otros gastos Importación	USD/t									8	8	8	8
Estandarizado	USD/t									10	10	10	10
Beneficio Marginal Producir vs Importar	USD/t									-10	-11	-11	-11
1. Beneficio Total Producir vs Importar	KUSD									1,037	1,122	1,122	1,122

Anexo 14. Vista de planta Laminador 2.

