

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



**EFFECTO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE
CARGA EN LOS INDICADORES ENERGETICOS DEL
HORNO DE PALANQUILLAS DE LA EMPRESA
SIDERPERU**

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

AUTORES :

Bach. Radas Goicochea Anny Judith
Bach. Urcia Solorzano Eliana Tamara

ASESOR :

Ing. Carlos Macedonio Montañez Montenegro

NUEVO CHIMBOTE, ENERO DEL 2022

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

EFFECTO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE CARGA EN LOS
INDICADORES ENERGETICOS DEL HORNO DE PALANQUILLAS DE LA
EMPRESA SIDERPERU

AUTORES :

Bach. Radas Goicochea Anny Judith
Bach. Urcia Solorzano Eliana Tamara

Ing. Carlos Macedonio Montañez Montenegro
ASESOR

"Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia"

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los veintinueve días del mes de diciembre del año dos mil veintiuno, siendo las siete horas de la noche, se reunieron en forma virtual a través de la aplicación zoom, el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N°473-2021-UNS-CFI, integrado por los siguientes docentes:

- Mg. AMANCIO RAMIRO ROJAS FLORES : PRESIDENTE
- Mg. ROBERT FABIAN GUEVARA CHINCHAYAN : SECRETARIO
- Ing. CARLOS MACEDONIO MONTAÑEZ MONTENEGRO : INTEGRANTE

Para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: "EFECTO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE CARGA EN LOS INDICADORES ENERGETICOS DEL HORNO DE PALANQUILLAS DE LA EMPRESA SIDERPERU", elaborada por la Bachiller de Ingeniería en Energía: ANNY JUDITH RADAS GOICOCHEA con código de matrícula N° 0201511050, teniendo como asesor al docente Ing. Carlos Macedonio Montañez Montenegro, según Resolución Decanal N° 130-2021-UNS-FI, de fecha 15 de marzo del 2021.

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 103° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
ANNY JUDITH RADAS GOICOCHEA	19	SOBRESALIENTE

Siendo las ocho horas del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Mg. Amancio R. Rojas Flores
PRESIDENTE


Mg. Robert F. Guevara Chinchayán
SECRETARIO


Ing. Carlos M. Montañez Montenegro
INTEGRANTE



"Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia"

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los veintinueve días del mes de diciembre del año dos mil veintiuno, siendo las siete horas de la noche, se reunieron en forma virtual a través de la aplicación zoom, el Jurado Evaluador designado mediante Resolución Nº473-2021-UNS-CFI, integrado por los siguientes docentes:

- Mg. AMANCIO RAMIRO ROJAS FLORES : PRESIDENTE
- Mg. ROBERT FABIAN GUEVARA CHINCHAYAN : SECRETARIO
- Ing. CARLOS MACEDONIO MONTAÑEZ MONTENEGRO : INTEGRANTE

Para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: "EFECTO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE CARGA EN LOS INDICADORES ENERGETICOS DEL HORNO DE PALANQUILLAS DE LA EMPRESA SIDERPERU", elaborada por la Bachiller de Ingeniería en Energía: ELIANA TAMARA URCIA SOLORZANO con código de matrícula N° 0201511050, teniendo como asesor al docente Ing. Carlos Macedonio Montañez Montenegro, según Resolución Decanal N° 130-2021-UNS-FI, de fecha 15 de marzo del 2021.

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 103° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
ELIANA TAMARA URCIA SOLORZANO	19	SOBRESALIENTE

Siendo las ocho horas del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Mg. Amancio R. Rojas Flores
PRESIDENTE


Mg. Robert F. Guevara Chinchayán
SECRETARIO


Ing. Carlos M. Montañez Montenegro
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:	Anny Judith Radas Goicochea
Título del ejercicio:	SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE CARGA PARA LA OPTIM..
Título de la entrega:	SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE CARGA PARA LA OPTIM..
Nombre del archivo:	TESIS_RADAS-URCIA_ING_EN_ENERGIA.pdf
Tamaño del archivo:	1.68M
Total páginas:	103
Total de palabras:	23,813
Total de caracteres:	116,826
Fecha de entrega:	22-nov.-2021 11:34a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre...	1710305135



DEDICATORIA

A mis queridos padres
Miguel Radas y Miriam Goicochea
por sus enseñanzas y guiarme por la ruta de vida.
Por su cariño y amor.
Y por su ejemplo de vida.

A.J.R.G

DEDICATORIA

A mis queridos padres

Yessica Solorzano y Elías Urcia Rodríguez

Por su gran amor, cariño y ejemplo.

A la familia Solorzano Ríos y Cuadrao Ahumada

Por hacerme parte de ellos

Desde siempre y darme la motivación

Para continuar mis metas trazadas.

A mis familiares desde el cielo por guiarme y cuidarme:

Mi mamita Olga Ríos Reyes,

Mi padrino Gaspar Cuadrao

Y su esposa Elizabeth Ahumada de Cuadrado

Y a mi madrina Lizbeth Cuadrao Ahumada.

E.T.U.S

RECONOCIMIENTO

A mis docentes de la
Escuela Profesional de Ingeniería en Energía
Por sus enseñanzas
Para mis compañeros de la
Promoción 2015
Por su compañía, amistad
Y la lucha de esos 5 años inolvidables
De un excelente compartir.

Atentamente,

A.J.R.G

RECONOCIMIENTO

A mis profesores de la
E.P de Ingeniería en Energía
por invaluable enseñanza y consejos
durante mi permanencia en la universidad.

Para mis compañeros de trabajo
Y mis colegas de la promoción 2015 de la
Escuela de Ingeniería en Energía
Por su amistad de siempre.
Va para Uds.

Atentamente,

E.T.U.S

INDICE GENERAL

INDICE

RESUMEN

I.	Introducción.	1
1.1	Realidad Problemática	1
1.2	Antecedentes	2
1.3	Justificación	6
1.4	Hipótesis	7
1.5	Objetivos	7
II.	Marco Teórico.	8
2.1	Hornos Industriales	8
2.2	Sistema de precalentamiento de carga	25
2.3	Balance de energía en horno	27
2.4	Indicadores de desempeño energético	40
III.	Materiales y métodos	42
3.1	Material	42
3.2	Método	45
IV.	Resultados y discusión	50
4.1	Condiciones actuales de desempeño del horno	50
4.2	Dimensionamiento del sistema de precalentamiento de carga	56
4.3	Balance de energía en sistema de precalentamiento de carga	61
4.4	Benchmarking entre indicadores de desempeño energético	67
4.5	Discusión de resultados	70
V.	Conclusiones y recomendaciones.	
	Conclusiones	72
	Recomendaciones	73
VI.	Referencias bibliográficas y virtuales	74
VII.	Anexos	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 01 Horno de Reverbero	12
Figura 02 Alto Horno	13
Figura 03 Hornos rotativos de cal	14
Figura 04 Horno de Resistencia	15
Figura 05 Horno de arco eléctrico	16
Figura 06 Descarga de palanquillas en horno continuo	17
Figura 07 Perfil de Horno de calentamiento	18
Figura 08 Tipos de perfiles de Horno de calentamiento	19
Figura 09 Sistema de precalentamiento de aire en un horno continuo	22
Figura 10 Sistema de precalentamiento de carga en un horno por lotes	23
Figura 11 Sistema de precalentamiento de carga para un horno de crisol	26
Figura 12 Flujo de calor para el balance en horno de palanquillas	35
Figura 14 Flujo de pérdidas de calor	37
Figura 15 Perfil de horno de palanquillas con precalentamiento de carga	39
Figura 16 Patio de palanquillas de acero	42
Figura 17 Esquemmatización del Balance de Energía inicial en horno de Palanquillas	45
Figura 18 Esquemmatización del Balance de Energía en precalentador de aire de horno de palanquillas	46
Figura 19 Esquemmatización para el Balance de Energía con precalentador de carga de horno de palanquillas	47
Figura 20 Distribución de flujos en el precalentador de aire del horno	51
Figura 21 Temperaturas en el sistema de recuperación de horno de palanquillas	54
Figura 22 Distribución real de temperaturas con sistema de precalentamiento continuo de carga de horno de palanquillas	63
Figura 23 Diagrama de sankey para sistema de precalentamiento continuo de carga de horno de palanquillas	64

INDICE DE TABLAS

Tabla 01 Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiometrica de algunos combustibles	29
Tabla 02 Información de operación a plena carga de horno de palanquillas	44
Tabla 03 Balance de Energía en el Horno	53
Tabla 04 Balance de Energía en el Horno con precalentamiento de la carga	62

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1 Benchmarking entre eficiencia de horno	66
Gráfico 2 Benchmarking entre IDEs T de horno	67
Gráfico 3 Benchmarking entre IDEs A del horno	68
Gráfico 4 Benchmarking entre IDEs E del horno	89

RESUMEN

El horno de calentamiento continuo de palanquillas de 55 TM es un equipo que permite calentar la carga hasta una temperatura de 1 240 °C con la finalidad de que esta última se derive a un proceso posterior de laminación, cuenta con un sistema de precalentamiento de aire de la combustión, calentando el aire a una temperatura de 300 °C con el cual la eficiencia de lo horno es de 83,55 % , la carga ingresa al horno a una temperatura de 20 °C. El trabajo de investigación es del tipo pre -experimental, de naturaleza descriptiva. Se realizó un balance de energía del horno sin precalentamiento de carga, luego se dimensiono 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 permite 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 Toneladas/mes.

Palabras claves: Hornos, precalentamiento de carga, indicadores de desempeño.

ABSTRACT

The 55 TM continuous heating furnace for billets is an equipment that allows the load to be heated up to a temperature of 1 240 ° C so that the latter is derived to a subsequent rolling process, it has an air preheating system of combustion, heating the air to a temperature of 300 ° C with which the efficiency of the furnace is 83.55%, the charge enters the furnace at a temperature of 20 ° C. The research work is of the pre-experimental type, descriptive in nature. An energy balance was made of the furnace without load preheating, then the load preheating system was dimensioned, an energy balance was made including the load preheater and a benchmarking between the energy performance indicators. The effect of preheating the load to 70 ° C using 4 180 kg / h of combustion gases from 640 ° C to 110 ° C allows an increase in efficiency to 86.51%, improving energy performance indicators in 3.42% reducing monthly natural gas consumption by 42,939 m³ of natural gas, monthly natural gas billing costs of 13,431 U \$ / month and CO₂ emissions of 79.13 Tons / month.

Key word: Furnaces, load preheating, performance indicators.

1. Introducción.

1.1 Realidad problemática.

Las Empresas del Sector Productivo, necesitan del insumo energético ya sea calor de para procesos o energía eléctrica, para poder cumplir con el desarrollo de sus procesos. La variabilidad de los costos de los combustibles sometidos en este último año al efecto Covid 19 lo cual ha generado gastos de dinero no previstos en su consumo, sobre todo si se tienen equipos de gran volumen como los hornos que son consumidores potenciales de calor, en este caso gas natural abastecido de forma virtual en Chimbote. Actualmente las empresas están en una lucha continua para subsistir en el mercado globalizado, por tal motivo tienen que ser más competitivas, y están siempre en la constante búsqueda de mejoras en sus procesos para poder ofertar un producto de buena calidad y de bajo costo operativo. Para esto la aplicación de innovaciones tecnológicas al proceso van acompañadas de estrategias de uso racional de la energía y con tecnologías para aprovechar los flujos y calores sensibles remanentes de los elementos y fluidos intervinientes en el proceso.

SIDERPERU por ser parte de una empresa transnacional, como lo es el grupo GERDAU, forma parte de estas empresas globalizadas, por lo que, para estar en competencia con otras empresas, está en constante búsqueda de mejoras de sus procesos, mejorar calidad y cantidad de productos, y reducir costos. La planta de Laminación en caliente, cuenta con hornos de calentamiento, siendo uno de ellos el horno de palanquillas de 55 TM/h de capacidad de calentamiento. Si bien es cierto se ha realizado hace tres años la conversión tecnológica cambiando al petróleo R500 por gas natural, e incluso se inyecta oxígeno en reemplazo del aire comburente, aun así, las temperaturas de los gases de combustión salientes del horno superan los 600 °C, identificándose un potencial de calor sensible por recuperar.

Teniendo en cuenta la alta temperatura de los gases de combustión salientes del horno de palanquillas, los cuales presentan un potencial de flujo de energía por recuperar y teniendo en cuenta que las palanquillas de 275 kg de peso son suministradas de manera continua y a temperatura ambiental al horno de palanquillas. Se presenta la oportunidad de precalentar la carga con la finalidad de que las palanquillas ingresen al horno a una temperatura con la cual se aproveche el calor remanente por la alta temperatura de los gases de la combustión.

Formulamos el siguiente problema:

¿De qué manera influye el precalentamiento de la carga en la optimización de los indicadores de desempeño energético en el horno de palanquillas, SIDERPERU?

1.2 Antecedentes.

Se presentan los siguientes antecedentes en la tesis:

Cano, I. & Cueva, J. (2012), Estudio del sistema de calentamiento de aire para el ahorro de energía en el horno de calentamiento de palanquillas de la empresa SIDERPERU. Universidad Nacional del Santa. Concluyo que el sistema de calentamiento del aire de la combustión, tiene los siguientes detalles: contiene de 21 tubos acero al carbono en arreglo en dirección normal al flujo de gases de combustión y 14 tubos dispuestos en dirección paralela a este, una superficie de transferencia de calor de 81.37 m², calentando al aire a 300 °C, los gases de combustión ceden su calor sensible disponible de 600° hasta 371 °C. Se consigue incrementar la eficiencia del horno de palanquillas inicialmente en 72.84 % hasta 82%, reduciéndose en 673,92 Toneladas de CO₂ anuales dejadas de emitir, con lo cual es viable técnica-económica y ambientalmente los Proyectos de uso eficiente de la energía y los de MDL, estos proyectos permiten revertir económicamente los proyectos de uso eficiente que conllevan a un mejor desempeño energético en la industria,

Carbajal, H. (2013). Diagnóstico energético en la empresa pesquera Cantabria S.A. para la mejora de sus indicadores energéticos. Universidad Nacional del Santa. Concluyo que: con los datos de producción, registros de consumos energéticos y cálculos se determinó los indicadores energéticos, económicos y ambientales, actuales de la planta y con el desarrollo del plan de mejoras, se calcularon los indicadores energéticos mejorados, resultando en los I. Técnicos: 10.43% de mejora en el ratio térmico, 1.60% R. Eléctrico, 5.49% R. Consumo de vapor y 92.17% en Consumo de agua. I. Económicos: 10.43% en R. térmico, 1.60% en R. Eléctrico, 10.02% en R. Energía Total y 92.17% en consumo de agua. En Indicadores Ambientales: 67.35% tanto técnico como económico en respecto de lo que se estaba produciendo y recuperando en CO₂.

Cribillero, P. (2013), Influencia del cambio de combustible residual 500 a gas natural para el proceso de calentamiento de las tinas de decapado respecto al costo por energía en la planta de galvanizado viales en la empresa SIDERPERU. Universidad Cesar Vallejo. En su principal resultado demostró que las innovaciones tecnológicas dan como resultado importantes beneficios económicos y técnicos, cuando se utiliza un combustible convencional, en este caso el petróleo R500. Se diseñó un sistema de precalentamiento haciendo uso del calor remanente de los gases de la combustión del Gas Natural, siendo empleado en una tina de desengrasado para la planta de galvanizado de la Empresa Siderúrgica del Perú. Se obtuvo una mejora del indicador técnico en 20.98 % y del indicador económico 31.13 %,

Domínguez, L. y Pérez, F. (2011). Cogeneración utilizando vapores excedentes de la caldera acuotubular de SIDERPERU. Universidad Nacional del Santa. Se cuantifico los ahorros en la facturación de la energía (eléctrica y combustibles), obteniéndose un Ahorro económico de S/.188096.20 (65418 U\$), con un porcentaje de mejora en la facturación de 62.67 %. El gasto de energía se reduce solo a los consumos de Petróleo R-500. Así mismo existe una mejora en los Indicadores Energéticos del orden de 67.70% en lo relacionado al consumo de petróleo R-500/Tonelada de vapor producido. Se realizó la evaluación económica del proyecto para determinar su rentabilidad, obteniéndose los siguientes indicadores económicos: Valor Actual Neto igual a 4 978000.78 U\$ y 3 680740.13 U\$ (incluyendo en el primer caso los ingresos por mercado de carbono y sin incluir en el segundo caso los ingresos por mercado de carbono).El periodo de retorno de la inversión es de 1 año y 1 mes y 1 año y 5 meses para caso de evaluación , así mismo el valor del TIR es de 72,94 % y 49,98 % respectivamente.

Espinoza, J. y Seminario, F. (2011), Reducción del consumo de petróleo R-500 en el horno de la planta de galvanizado de tubos de la empresa SIDERPERU. Universidad Nacional del Santa. Tuvo como objetivo general la reducción del consumo de petróleo R500 mediante la reutilización de los gases de combustión del horno de la planta de galvanizado de tubulares de la empresa SIDERPERU. En sus resultados realizo una evaluación energética para determinar las condiciones de precalentamiento de la carga entrante al horno con temperaturas de 190, 160 ,130 y 100 ° C con de la combustión

emitidos por el horno a una temperatura de 500° C, determinándose que la mejor condición de precalentamiento para la carga es a 190° C, donde se consigue reducir la temperatura de los gases hasta 404 ° C y una reducción de consumo de combustible del orden de 402.0 Galones de petróleo al mes. Se obtuvo una mejora del Indicador de desempeño energético en 101.58 %, además de una mejora del indicador económico de 60.05 %.

Herrera, B. y Cacua, K. (2013), Análisis de la combustión con aire enriquecido con oxígeno como estrategia para incrementar la eficiencia energética. Revista Scielo para la Universidad de Bogotá de Colombia. La tecnología de combustión con aire enriquecido es muy utilizada actualmente en diversos sectores productivos y en los cuales los procesos se desarrollan con una elevada temperatura alcanzando una eficiencia alta en los sistemas que la utilizan, ya que al separar el elemento inerte(nitrógeno) del aire la acción del oxidante se hace más efectiva. Se ha demostrado fehacientemente la reducción de emisiones y un incremento de la eficiencia en los m.c.i alternativos, así mismo concluye que la recirculación de los gases de la combustión favorece significativamente a la disminución de los costos en las tecnologías de captura o secuestro de CO₂.

Mariños, D., Rojas, S., De los Santos, Y. & Chucuya, R. (2016), Optimización del combustible por precalentamiento de la carga y enriquecimiento con oxígeno en los hornos de recalentamiento de la industria siderúrgica. Revista Scielo de la Universidad Nacional de Trujillo. El calentamiento de la carga se realiza empleando la energía térmica remanente de gases de la combustión que son expulsados del horno, proporcionando la energía térmica requerida por la carga entrante al horno de calentamiento. Al incrementarse el porcentaje de oxígeno en el aire de combustión, la temperatura de combustión se eleva considerablemente, del mismo modo se incrementan el indicador de transferencia de calor y la eficacia de la reacción de combustión. Las propuestas se evaluaron con la finalidad de optimizar la combustión, aumentando la estabilidad de llama y la operatividad del horno, reduciéndose las emisiones, aumentando la producción y bajando los costos y el consumo de energía primaria.

Rubio, P. (2018), Evaluación técnica del proceso de combustión y de eficiencia energética de un horno industrial panadero. Universidad Técnica Federico Santa María de Chile. Concluye que el horno tiene una eficiencia de 9,69% en máxima potencia térmica de 6,12 kW y una mínima potencia térmica de 5,27 kW para el proceso de panificación de lotes de 475 kg y 532 kg. Para mejorar el desempeño y la disponibilidad del equipo térmico como propuesta se modificará la empaquetadura de la puerta (sistema adhesivo y de hermeticidad) para así evitar la disipación de calor a través de las fronteras del horno.

Nonalaya, M. (2019), Modelo de gestión de la energía, para disminuir los costos productivos del horno N° 3, en la Empresa UNACEM S.A.A. Universidad Nacional del Centro en Perú. Manifiesta que la implementación de un sistema de administración de la energía, logra significativos ahorros económicos de energía eléctrica en el orden de 2'136 509 US\$ anuales. Se optimizó el indicador con un valor de 1,35 US\$/TN de cemento. Como principal resultado obtenido, el ahorro de energía térmica consumida fue de 68,19 kcal/kg en el proceso de clinkerizado del Horno N°3, con una reducción de costos anuales de 355 002 US\$, todo el ahorro se consiguió con la implementación de la administración energética en el proceso productivo del Horno N° 3, se estima ahorros en el corto plazo de 2'491 511 US\$ anuales por reducción de consumo energético térmico y eléctrico.

Ortiz, O. (2010). Mejoramiento de la eficiencia de la caldera de alto horno de SIDERPERU mediante la implementación de un precalentador de aire con los gases de combustión. Concluye que la investigación, demuestra la viabilidad técnica-económica en el empleo de los gases de combustión para ser empleados en un precalentador de aire para el generador de vapor acuotubular del Alto Horno en la Empresa SIDERPERU, consiguiéndose un incremento del rendimiento del caldero, reduciendo el consumo de petróleo R500. Se realizó un análisis gravimétrico de los gases de combustión del caldero del Alto Horno, se aprovechó el calor sensible de 35 Toneladas de gases/hora a una temperatura de 450 °C, lográndose a través de un balance de energía del caldero la necesidad de implementar un precalentador de aire donde se derivó 34 000 kg/h de aire de combustión hasta 210 °C, del mismo modo la reducción del consumo de combustible fue del orden de 41 851 galones de .R-00/año,

con un ahorro económico anual de U\$ 60 998,4, con lo cual se presenta como una importante oportunidad de mantener operativo el caldero que suministra aire al proceso del alto horno.

Vega, V. (2014), Optimización de los procesos de combustión del horno petrolero 311-H1, para mejorar su eficiencia en la Refinería Iquitos-PETROPERU. Universidad Nacional del Centro. Concluye que la mejora de la combustión en el hogar del horno permite obtener una mejora sustancial de la eficiencia térmica desde 74,6% antes de implementarse el plan de mantenimiento general hasta 80,7%, esto fue la solución de los problemas permanentes en el proceso de combustión del horno industrial, que fueron las causas de pérdidas de energía en el horno. Se consiguió optimizar el consumo de combustible elaborando una mezcla en una proporción de 87% Fuel Oil y 13% Kerosene.

1.3 Justificación.

La justificación es la siguiente:

La Empresa SIDERPERU. en su Planta de laminación en caliente cuenta con el Horno de Calentamiento de Palanquillas el cual consume un promedio de 600 m³ de gas natural por hora el cual combustiona con oxígeno. Encontrándose los gases de la combustión a un promedio de 600 °C, pudiendo utilizarse para precalentar la palanquilla entrante, con lo cual se podría obtener los resultados siguientes:

Disminución en el consumo de gas natural mensual. La implementación de la mejora tecnológica permitirá promover el uso racional de los insumos energéticos, pues se aprovecharía los flujos de energía remanentes optimizando procesos y generándose un valor agregado adicional.

Reducción de la facturación mensual por consumo de gas natural, permitiendo un mejor posicionamiento económico en el sector económico.

Disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero contribuyendo con los compromisos NDC firmados por el Perú en la COP 21. La posibilidad de incluir en su política de responsabilidad social el respeto al medio ambiente, al mantener el ritmo de producción afectando en menor medida al ecosistema empleando las mismas unidades de energía consumidas.

1.4 Hipótesis.

El sistema de precalentamiento de carga influye en los indicadores de desempeño energético del Horno de Palanquillas de SIDERPERU, optimizándolos en 2 %.

1.5 Objetivos.

Objetivo general.

Determinar la influencia del sistema de precalentamiento de carga en los indicadores de desempeño energético del Horno de palanquillas de SIDERPERU.

Objetivos específicos.

1. Realizar un balance de energía en el horno de palanquillas de SIDERPERU.
2. Caracterizar los indicadores de desempeño energético en el horno de palanquillas de SIDERPERU.
3. Dimensionar un sistema de precalentamiento de carga mediante el aprovechamiento del calor sensible de gases de la combustión para el horno de palanquillas de SIDERPERU.
4. Determinar el porcentaje de mejora de los indicadores de desempeño energético en el horno de palanquillas de SIDERPERU.

II. Marco Teórico

2.1 Hornos Industriales.

2.1.1 Generalidades.

- a. Definición: Son equipos térmicos consumidores de energía, ya sea térmica o eléctrica utilizados en la industria, que tiene por finalidad calentar o fundir una pieza o un elemento colocado en su interior, dentro de un ambiente superior a la temperatura ambiental. Generalmente el proceso de adición de calor es a través de un proceso de intercambio de calor sensible. El proceso de cambio de calor sensible y en algunos casos latente se realiza por contacto directo sobre las superficies del material a calentar o indirectamente por transferencia de calor por conducción, convección y radiación, o mecanismos combinados. El objeto de esta adición de energía puede ser por:
- Calentar un material antes de un proceso de laminación.
 - Fundir un material, mineral o elemento.
 - Tratamiento térmico de un material para impartir en las ciertas propiedades.
 - Recubrimiento exterior de piezas metálicas. (Espinoza y Seminario, 2011)
- b. Procesos: El tratamiento térmico consiste en el incremento de temperatura con un posterior enfriamiento originándose un cambio en las propiedades físicas o mecánicas del material y de igual modo una modificación en su estructura cristalina del material, por lo general se aplica en metales y aleaciones. Este proceso no altera ni cambia la composición química de los metales, básicamente consiste en proporcionar ciertas propiedades permanentes para su uso o empleo tal como la dureza, tenacidad, maleabilidad, entre otras. Los tratamientos térmicos cobran importancia para los casos en los que se requiere propiedades en los materiales para condiciones de servicio críticos y cuando las aleaciones tienen una composición más compleja. Se debe tener en cuenta 4 variables de control: temperatura máxima de calentamiento, tiempo de residencia, velocidad del proceso de calentamiento y enfriamiento. (Duarte y Vargas, 2018)

Los hornos por recubrimientos, son aquellos hornos que se caracterizan por estar sometidos a ciertas temperaturas dentro del hogar del horno con la finalidad de recubrir superficies exteriores para mejorar las propiedades químicas y la conformación de un producto final. Los Hornos de galvanizado, permiten realizar un proceso de recubrimiento superficial que consiste en piezas terminadas de hierro/acero mediante la inmersión dentro

de un crisol que contiene zinc fundido a 450°C. Su objetivo principal es evitar una posible oxidación y corrosión galvánica sobre la superficie y estructura del metal debido a la humedad del medio (salino) y la contaminación ambiental. Esta actividad representa el 50% del consumo de zinc y desde más de un siglo se ha consolidado como el procedimiento más aceptado y de menor costo para proteger al hierro e inhibirlo contra la corrosión. El galvanizado consiste en impregnar una capa de zinc sobre la superficie del hierro; al ser el zinc más propenso a la oxidación es menos noble en comparación al hierro y genera un óxido más estable, protegiendo los productos ferrosos en un ambiente húmedo y salino. (Espinoza y Seminario, 2011)

El proceso de fundición consta de una serie de operaciones que tienen por finalidad cambiar de fase un material desde el estado sólido al estado líquido a partir de un suministro indirecto o directo de energía térmica o energía eléctrica, hasta alcanzar la temperatura de moldeo del material fundido. El proceso de fundición comienza con una etapa de calentamiento se precalienta el metal hasta una temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición y transformarlo completamente al estado líquido. Por medio de un indicador de proceso temperatura/tiempo se alcanza el punto de fusión. El calentamiento se realiza directamente en los hornos de arco eléctrico con tensiones eléctricas superiores a los 10 kV en procesos por lotes que pueden variar desde 15 a 40 minutos según la capacidad del horno y del tipo de material a fundir. Luego se vierte el material fundido dentro de un molde para su posterior enfriamiento y proceso metalúrgico para el cual el material este destinado. (Flores y Orellana, 2014)

Luego del proceso de fundición el material moldeado empieza a enfriarse, y progresivamente a medida que desciende la temperatura, solidificándose. Se requiere de un tiempo preestablecido para conseguir el cambio de fase. En esta etapa el metal fundido asume la forma del molde que lo contiene y se generan las propiedades requeridas. Luego del proceso de fundición el material queda preparado para un proceso posterior que puede ser un calentamiento para un proceso de laminación, maquinado y conformación, corte o cizallado, entre otros. En algunos casos se le somete a un tratamiento térmico posterior tal como el temple, revenido o recocido, con la finalidad de adicionarle mejores propiedades finales al material. En ciertos casos queda preparado para un proceso de

recubrimiento tal como la cementación, niquelización o el galvanizado o cincado. (Flores y Orellana, 2014)

- c. Partes: Las partes de un horno industrial son la zona de trabajo en la cual se realiza el proceso principal para la cual se le ha diseñado y toma el nombre de solera o piso (que puede ser móvil o galopante o fijo), esta zona soporta los máximos valores de temperatura que pueden alcanzarse dentro del horno, esta zona se separa del medio ambiente a través de un techo o tapa que toma el nombre de bóveda, la cual puede ser fija como en un horno de calentamiento continuo o móvil para el caso de un horno eléctrico. Ambas partes están construidas de materiales refractarios para altas temperaturas con componentes de sílice, alúmina y propiedades termoaislantes. Los cimientos son la parte estructural de apoyo y su función es sostener las demás partes del horno, y debe tener la suficiente solidez para soportar la carga estática, y las posibles cargas dinámicas de tal manera que la presión de la estructura debido al peso no supere los valores permisibles. (Duarte y Vargas, 2018)

La solera o piso es aquella parte del horno sobre el cual se coloca el material a calentar. Es una estructura sólida, rígida y químicamente estable. La solera deberá estar en condiciones de soportar: la erosión a alta temperatura que puede ocasionar un metal fundido, la penetración de algunos materiales al encontrarse a temperaturas sobre el punto de fusión, el impacto debido al agregarse el material ferroso a fundir y la posible hidratación en el proceso. La bóveda o techo deberá estar en condiciones de soportar altas temperaturas. Los gases calientes ejercen una presión sobre la parte interna de la bóveda por lo cual esta debe ser impermeable al efecto de los gases de la combustión aun contenidos dentro del horno, cuando se tiene un proceso por lotes. El material refractario debe ser capaz de soportar: choques térmicos por variaciones de temperatura, radiación térmica e impacto mecánico debido al movimiento del material en proceso dentro del horno. (Duarte y Vargas, 2018)

Las paredes deben soportar a la bóveda sometida a altas temperaturas. Así mismo protegen la zona interna de las pérdidas de calor al exterior y su grado de aislamiento impide la salida de los gases ni la infiltración del aire atmosférico al interior. La parte superior de las paredes debe estar en capacidad de soportar los choques térmicos debido a fluctuaciones de temperatura. Las juntas térmicas cumplen la función de compensar la

dilatación de la estructura del horno por efecto del calor. La hermeticidad de las juntas no debe rebajar la solidez de la estructura del horno ni deberá permitir la fuga de gases, metales o escorias. El diseño de las juntas de dilatación térmica se determina en concordancia a las temperaturas máximas a alcanzar dentro del horno y los coeficientes de dilatación volumétrica en los materiales refractarios y metálicos que conforman el revestimiento exterior del horno. (Duarte y Vargas, 2018)

La estructura metálica soporta todas las partes del horno y está en capacidad de absorber los esfuerzos originados en la mampostería tanto durante los procesos térmicos que se presentan dentro del horno. Así mismo estos esfuerzos son transmitidos desde la estructura hasta los cimientos del horno. Las partes de la estructura o armazón permiten el montaje de diversos componentes del horno, así tenemos marcos, tapas, pórticos, ventanas, sopladores para limpieza, etc. Las ventanas permiten la carga y descarga del material de proceso desde la solera, además a través de ellas permiten la vigilancia del proceso del horno pudiendo en muchos casos permitir mediciones dentro del horno en operación con pirómetros infrarrojos, las puertas deberán ser estancas, livianas en peso, sólidas y con resistencia a altas temperaturas y deberán estar recubiertas de material refractario. Las puertas son del tipo bisagra o levadizo, y deben garantizar la hermeticidad del horno para evitar la fuga de calor, pérdidas e infiltraciones. (Duarte y Vargas, 2018)

2.1.2 Clasificación.

a. Clasificación según la fuente de energía.}

- **Hornos térmicos:** Utilizan combustibles líquidos o gaseosos derivado de los hidrocarburos. Tenemos los siguientes:

Horno de reverbero: la energía térmica requerida se produce por un banco de quemadores, con una red de suministro de combustible líquido o gaseoso, cuyas flamas inciden de manera directa sobre la carga metálica. Los gases de combustión generan en el hogar brascas corrientes debido al movimiento browniano que permiten cambios térmicos y como consecuencia aceleran el proceso de fundición del metal (generalmente usado en la fundición de cobre). Está conformado por tres zonas: el hogar o cámara a través del cual se inyecta el combustible; la solera, recipiente en donde ocurre la fusión (crisoles para el caso de hornos eléctricos) y la chimenea. Los gases calientes fluyen a través de calentadores de aire, transfiriendo su calor sensible, luego por medio de un sistema de

control automático de compuertas, se invierte el sentido del flujo, de tal manera que los gases y el aire, pasan a través de los recuperadores y alcanzan altas temperaturas entre 1 000 °C a 1 200 °C antes de ingresar al horno. Mientras que los gases de la combustión circulan a través de otros recuperadores de calor. A través de estos procesos se logra recuperar calor sensible mediante un eficaz proceso de intercambio de calor. (Mestanza y Lara, 2012)

Hornos de crisol fijo: Son hornos de tipo convencional que utilizan carbón mineral, son equipos térmicos de arquitectura cuadrada, son montados en serie en arreglos continuos uno detrás de otro, conformando un solo bloque térmico pero independientes uno de otro a través de una pared de ladrillo de material refractario, comparten una única chimenea con un tiro adecuado que evita el flujo de gases de combustión desde un horno a otro. Dentro de sus imperfecciones de proceso u operación tenemos la forma de extracción del metal líquido, lo cual se realiza por medio de cucharas de colado para la extracción de pequeñas cantidades de metal. Su eficiencia térmica es baja en relación a la magnitud de energía térmica suministrada en comparación al material fundido. (Mestanza y Lara, 2012)



Figura 01 Horno de Reverbero

Fuente: Empresa Insertec (2021)

Alto Horno: En su interior se presentan una serie de reacciones químicas secuenciales y el material se presenta en sus tres estados sólido, líquido y gas. Se presentan elevados valores de temperatura cercanos a los 2 000°C cerca de los quemadores en donde se genera la combustión del coque utilizado como combustible. La finalidad del proceso dentro del

horno es producir una aleación líquido llamado arrabio, formado por Hierro (92 a 95%) y carbono (3,5 a 5,0%) y otros elementos tal como silicio, manganeso, fosforo, azufre, etc., a una temperatura cercana a los 1 500°C. Se genera una cantidad importante de escoria en el Alto Horno, con un indicador entre 200-350 kg de escoria/ton.de hierro fundido y del mismo modo se genera un gas residual combustible de bajo poder calorífico entre 600 a 900 Nm³/ kg. En algunas empresas este gas se enriquece con gas de coque de un proceso de gasificación. (Quintanilla, 2018)

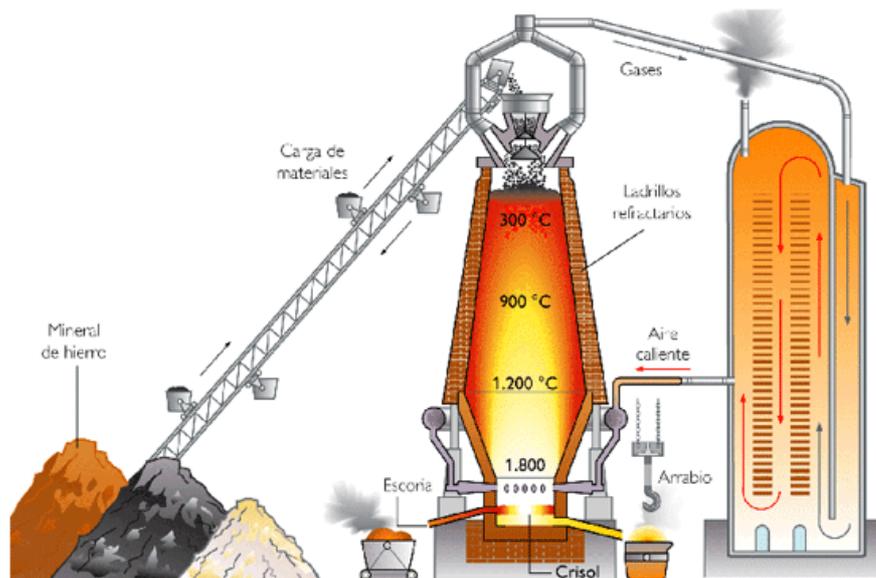


Figura 02 Alto Horno

Fuente: Torres (2014)

Hornos rotatorios: Utilizado en la industria del cemento, está formado por un cilindro inclinado entre 2 a 4% en su eje horizontal, interiormente este revestido de refractarios, con lo cual incrementa su masa y peso. El material a procesar ingresa por una tolva superior y en contracorriente se le aplica el suministro de energía térmica, en este caso los gases calientes alta temperatura transfieren su calor sensible de forma directa y en contracorriente. El combustible empleado es carbón pulverizado, petróleo residual o gas natural o gas de síntesis. El cilindro rotativo del horno descansa sobre varios pares de rodillos o polines que le permiten así mismo apoyarse y girar sobre su eje debido a la acción de un sistema cadena cremallera con velocidades para el cilindro entre 4 a 10 rpm. El horno es utilizado en la industria generalmente para la clinkerización o en las plantas

de cal con longitudes que varían desde 10 hasta 50 metros accionados por motores eléctricos con potencias de hasta 500 kW. (Dávila, 2009)

Un proceso de combustión que genera un alto volumen de gases producidos por unidad de combustible empleado se presenta en los combustibles sólidos (carbón) combustibles residuales líquidos en comparación al gas natural con una diferencia de 100 °C en sus temperaturas de llama adiabática, además las partículas de carbono producidas por la disociación del gas natural son 100 veces más pequeñas que las generadas por el petróleo y carbón, por lo tanto la transferencia de calor por radiación a partir del gas natural resulta menor en comparación de las largas, radiantes y continuas llamas conseguidas con la combustión del petróleo y carbón, tal como son las condiciones que se requieren en la industria del cemento. En los hornos para industria del cemento el 60% del flujo de calor suministrado se aporta en la cámara de precalcinado, para el proceso de descarbonatación. (Castillo, 2019)



Figura 03 Hornos rotativos de cal

Fuente: Castillo (2015)

- **Hornos eléctricos:**

El horno de resistencia eléctrica, es un equipo eléctrico que permite incrementar la temperatura del material hasta valores superiores al punto de fusión. Las resistencias son fabricadas de una aleación de carburo de silicio. En este tipo de hornos se eleva la temperatura del ambiente en donde se introduce el material a procesar. La elevación de temperatura se realiza a través de elevados flujos de intensidad de corriente por medio de un electrodo de aleación de cobre, emitiéndose calor a través de los mecanismos de transferencia de calor por radiación y convección. Es necesario aislar adecuadamente el

horno para un óptimo aprovechamiento de la energía térmica, alcanzándose temperaturas de proceso cercana a los 1 300 °C. (Gutiérrez, 2015)

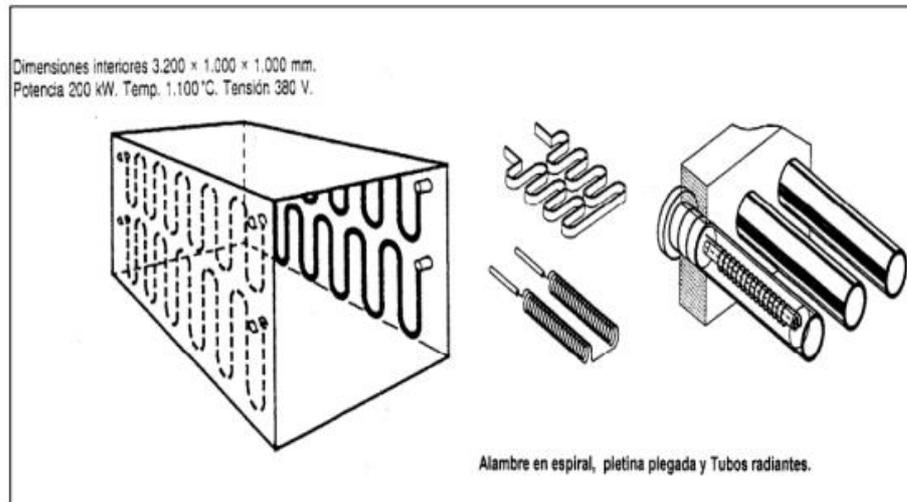


Figura 04 Horno de Resistencia

Fuente: Gutiérrez (2015)

Horno eléctrico de inducción: Es un equipo térmico en el cual el suministro de calor se realiza por medio de la inducción eléctrica a través de un medio conductor con bobinas magnéticas dentro de un crisol, con potencias que pueden alcanzar hasta los 30 MW. El calentamiento por inducción eléctrica se emplea en gran cantidad de industrias por su gran versatilidad en aplicación tal como los procesos de fundición y templado de metales o aleaciones ferrosas. Con la gran ventaja de que se realiza para procesos por lotes en periodos de tiempo entre 20 a 40 minutos por colada y sin el empleo de combustibles derivados de los hidrocarburos. Los componentes elementales del sistema de calentamiento por inducción son una fuente de corriente alterna que generalmente es energía proveniente de una red en alta tensión, una bobina de inducción y el material a trabajar. El calor de inducción producida por la bobina en el núcleo de cobre hueco produce la disipación de calor. El agua de refrigeración circula por el interior de las bobinas enfriándose esta última a una temperatura de 100-120 °C. La fuente de alimentación de corriente alterna hace circular la corriente por medio de la bobina de inducción, generándose un campo electromagnético. Al encontrarse el material a procesar dentro del horno, el campo magnético produce corrientes de torbellino que fluyen en el material generando su cambio de temperatura y fundición. (Aguirre y Plascencia, 2018)

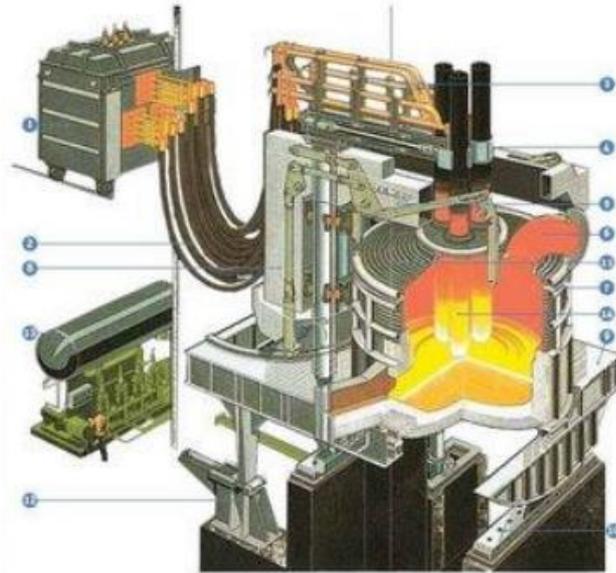


Figura 05 Horno de arco eléctrico

Fuente: Castillo (2015)

b. Clasificación según el proceso que desarrolla.

- **Hornos continuos:**

En este tipo de horno, la carga a procesar está continuamente entrando y saliendo del horno, durante de un determinado tiempo de residencia el material se calienta hasta tener una temperatura homogénea en toda su sección transversal. El movimiento del material dentro de este horno se realiza por empuje directo a través de muñones o empujadores accionados por sistemas hidráulicos, o suspendidos a través de vigas galopantes o por medio de soleras giratorias o carriles con bandas transportadoras o carros. Generalmente cuentan con dos zonas de control, de calentamiento y de homogenización. (Cuzco y Domínguez, 2019)

Este tipo de hornos tiene siempre un flujo permanente de carga de entrada y de salida. La ventaja de ser continuo le permite grandes volúmenes de material a procesar de forma inmediata, mientras que su desventaja radica en las pérdidas por radiación por ventanas y puertas de entrada y retiro de la carga, las cuales permanecen más del 50 % del tiempo de proceso abiertas. Dentro de este tipo de hornos tenemos:

Los Hornos de Calentamiento de empuje continuo

Los Hornos de recubrimientos para planchones.

Los hornos de viga galopante.

Los Hornos de recubrimiento o galvanizado.

El Alto Horno. (Cano y Cueva, 2013)



Figura 06 Descarga de palanquillas en horno continuo

Fuente: Castillo (2015)

- **Hornos discontinuos o batch:**

Se caracterizan porque se llena primero la carga con una cantidad de la carga a procesar y se hermetiza antes de iniciarse el proceso de calentamiento o de fundición, se caracterizan por un tiempo de residencia de la carga que puede variar según el material, por ejemplo, para hornos de foso es de 30 minutos. La carga es introducida de forma manual, o con la ayuda de grúas porta imanes según la naturaleza del proceso. (Cuzco y Domínguez, 2019)

En estos hornos la carga entrante por lotes permanece fija durante el proceso de calentamiento, luego se retira la totalidad de la carga y se suministra una carga nueva.

Tenemos los siguientes tipos de hornos:

Hornos de foso.

Hornos para recocido

Hornos Eléctricos. (Cano y Cueva, 2013)

2.1.3 Hornos de calentamiento de empuje continuo.

Es el tipo de horno más utilizado en los procesos de laminación para el recalentamiento continuo de palanquillas, tochos, planchones e incluso hasta lingotes de 2.5 TM. Su funcionamiento es normalmente continuo y el avance de la carga a calentar se efectúa situando una nueva carga en la puerta de ingreso al horno. (Cano y Cueva, 2013)

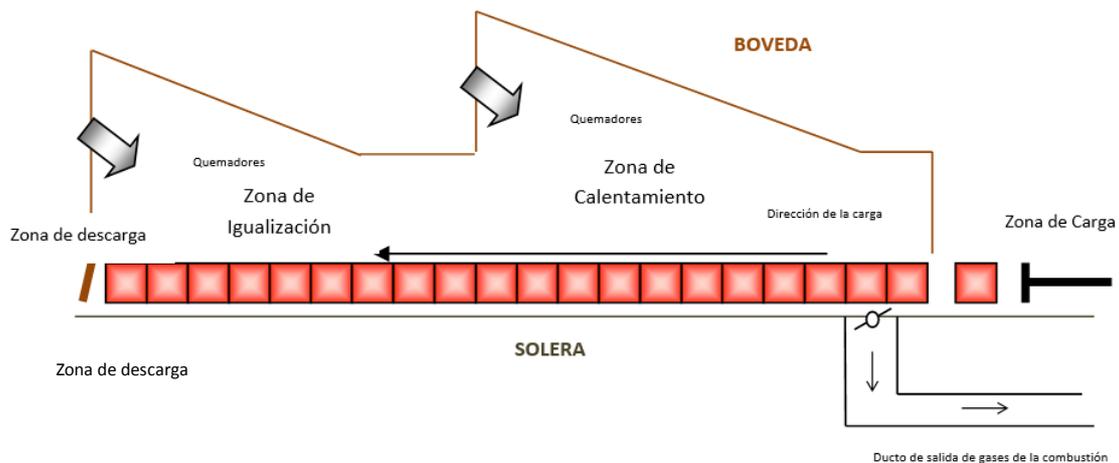


Figura 07 Perfil de Horno de calentamiento

Fuente: Guevara (2019)

El perfil del horno viene determinado por la producción, el espesor y calidad de la carga; para pequeños espesores los hornos son normalmente de calentamiento menores a 20 TM y de calentamiento superior a 20 TM para piezas más grandes y para mayores volúmenes de producción. La tendencia actual es disponer un gran número de quemadores en la bóveda, formando lo que se denomina una bóveda radiante que permite alcanzar una mayor producción específica por m² efectivo de solera. (Cano y Cueva, 2013)

Los elementos principales:

- Estructura básica de las cámaras del horno distribuidas en una o varias zonas de calentamiento y otras de calentamiento final o Igualización.
- En el revestimiento hay que distinguir la solera, las paredes laterales y la bóveda ya que es diferente la acción que se produce sobre cada una de ellas, sin embargo, existe una tendencia ya generalizada al empleo de revestimientos monolíticos, tanto refractarios

como aislantes y a veces sustituidos por mantas, módulos o bloques a base de fibra cerámica.

- Hay que destacar también por su incidencia en el consumo energético, los carriles de deslizamiento o apoyo de la carga, normalmente refrigerados por agua y recubiertas con placas aislantes.
- Los mecanismos de carga y descarga situados respectivamente a la entrada y salida del horno; la carga al igual que la descarga puede ser frontal o lateral, siendo normalmente frontal para cargas de gran tamaño.
- El sistema de combustión distribuido en distintas zonas de control conforme al tamaño del horno y sus exigencias de producción.
- El recuperador de calor cuya utilización es fundamental para un rendimiento energético óptimo. El equipo de regulación y control tanto de la temperatura como de la presión interna del horno. (Cano y Cueva, 2013)

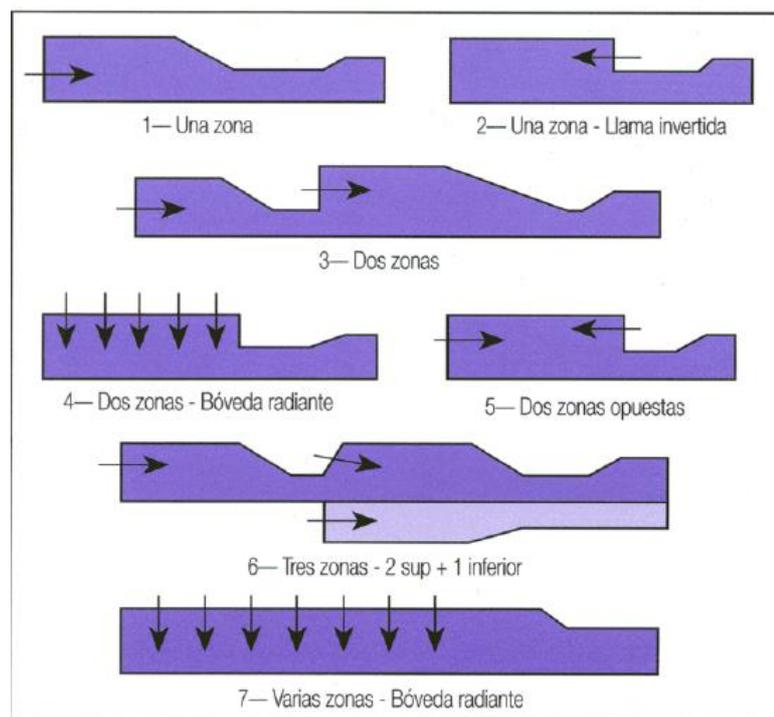


Figura 08 Tipos de perfiles de Horno de calentamiento

Fuente: Cano y Cueva (2013)

Los hornos de recalentamiento son aquellos equipos térmicos a los cuales se le suministra un flujo de calor a la carga para incrementar su temperatura y preparar la carga para un proceso posterior como puede ser el decapado o un proceso de recubrimiento, sin

pretender conseguir una reacción química en su estructura cristalina o generar un cambio de fase, tal como fusión o vaporización. En la industria metalúrgica la temperatura tiene un papel relevante en la calidad del material. Por ejemplo:

- Los hornos con atmosferas elevadas ablandan a los metales, preparándolos para operaciones posteriores de deformación en caliente tal como ocurre en los trenes de laminación.
- Las temperaturas mucho más altas eliminan la acritud del material, un caso concreto es el recocido, que incluye un calentamiento y enfriamiento sin deformación.
- La elevación de la temperatura sobre un punto crítico (por ejemplo, punto de fluencia del material), seguido de un enfriamiento rápido consigue que en el acero una mayor dureza y resistencia, pero con menor ductilidad.
- En el proceso de cementación los metales son calentados con la finalidad de absorber carbono. (Ramos, 2012)

2.1.4 Eficiencia energética en Hornos industriales.

Los hornos son equipos térmicos utilizados en muchos sectores industriales y comerciales, así tenemos sectores industriales con un uso intensivo de energía como la industria cementera, cerámicos y siderurgia, así como en menor grado la industria alimentaria tal como la panificación, producción de galletas, u otros productos. Según su naturaleza del proceso del horno se utiliza combustibles derivados de hidrocarburos o energía eléctrica. Para la industria alimentaria se requiere de hornos que empleen combustibles sin azufre tal como lo son el Gas Licuado de Petróleo o el gas natural (tal es el caso también de los crematorios de hospitales), que generan una combustión completa sin emisión de partículas sólidas o gaseosas llamados inquemados. En los hornos de la industria del cemento o siderúrgicas, se emplea el coque la reducción de los minerales, así como combustible. En lo referente al empleo de hornos eléctricos para procesos de calentamiento y secado, están siendo menos usados, debido al alto consumo de energía y potencia y sus elevados costos. Salvo en el caso de producción de hierro esponja a partir de chatarra, en el cual la tecnología de mayor uso es con hornos de arco eléctrico. Los hornos industriales debido a su alta temperatura en los gases de la combustión, permiten instalar recuperadores de calor denominándose hornos de tipo recuperativo o regenerativo. (Rojas, Gómez y Gómez, 2012)

La eficiencia energética en hornos presenta potenciales reducciones de consumo de energía primaria entre el 10% y el 40% según el sistema de recuperación a instalar o tecnología eficiente a implementar. La reducción del consumo de combustible y electricidad en los procesos genera un ahorro de divisas a las empresas y como segundo efecto genera potenciales reducciones de emisión de gases de efecto invernadero. Por otro lado, para proyectos de cambio de combustibles, la disminución del consumo de energía conlleva a una reducción menor de emisiones, tal es el caso del cambio de petróleo por gas natural. Para la elegibilidad ambiental de un proyecto, es recomendable que la disminución de emisiones de GEI sea mayor al 10% con referencia a la línea de base. En nuevos proyectos, la elección se establece según el nivel de inversión y la potencial de reducción de costos que se desea conseguir, básicamente con la idea de recuperar la inversión realizada, salvo subvenciones o subsidios no existe discriminación en la implementación de un proyecto de uso eficiente. (Rojas, Gómez y Gómez, 2012)

La implementación de tecnologías de calentamiento permita optimizar el consumo de combustible, disminuir las emisiones y permiten mejorar la productividad y mejora continua y con ello la calidad de los productos finales, esto último ha motivado la investigación y desarrollo tecnológico para posesos con temperatura. Los nuevos sistemas de recuperación de calor para aprovechar la energía térmica de gases a alta temperatura, permite el precalentamiento del aire de combustión y la carga entrante de proceso, consiguiéndose una mejora del rendimiento en la combustión y el desempeño energético del horno. Por ello se han venido implementando los recuperadores gases – gas, y los regeneradores gases – sólido. (Amell, Copete y Codavid, 2006)

- **Calentamiento de aire de combustión:** Es uno de los métodos más utilizados para aprovechar las elevadas temperaturas de salida de los gases de combustión desde un horno, aprovechándose estos últimos de manera indirecta a través de un intercambiador de calor aire-gases. Al precalentar el aire de combustión se mejora las condiciones de temperatura de llama adiabática en el frente de llama de los quemadores permitiendo una sustancial reducción por el calor de reacción del combustible. El inconveniente es que no permite cambiar una línea de producción de intermitente a continuo. (Espinoza y Seminario, 2011)

Las altas temperaturas de gases salientes desde los hornos, permitieron la innovación tecnológica e implementación de sistemas de recuperación de calor en el horno o en procesos cercanos al horno que necesiten utilizar el flujo de calor sensible disponible. Las aplicaciones de mayor relevancia son las siguientes: calentamiento del aire de combustión, precalentamiento de la carga y cogeneración (cada 50°C de incremento de la temperatura del aire comburente, permite una reducción de 3% del consumo del combustible empleado). (Guevara,2019)

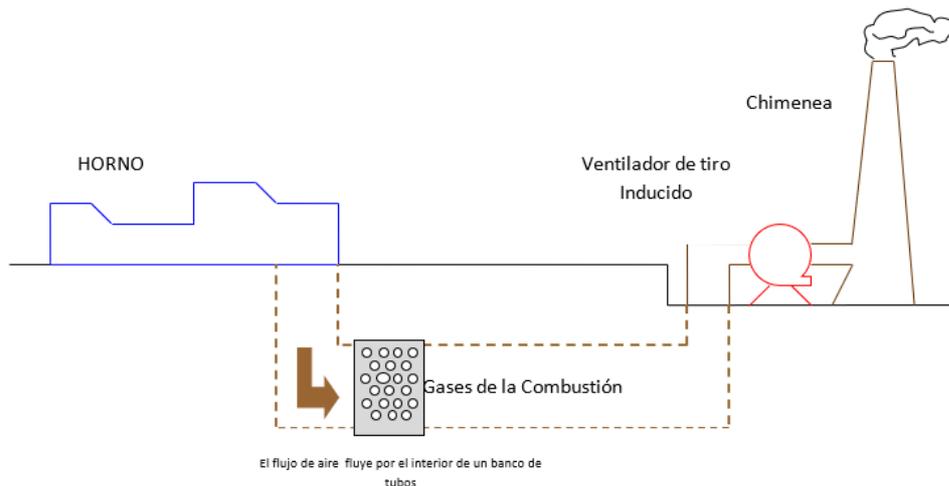


Figura 09 Sistema de precalentamiento de aire en un horno continuo

Fuente: Guevara (2019)

- **Cogeneración:** En los hornos continuos en los cuales las temperaturas son elevadas (superiores a 600°C) y se tienen grandes flujos de gases de combustión se puede acoplar a la salida del horno un Generador de Vapor Recuperador de Calor, haciendo circular a través de este sistema los gases de la combustión. La finalidad es obtener vapor sobrecalentado a baja presión para accionar una turbina de vapor acoplado a un alternador con el cual se obtendría un Sistema de Cogeneración del tipo Bottoming Cycles o vapor saturado para procesos industriales. Este Sistema se utiliza en Hornos de Empresas Cementeras, Refinerías, Siderúrgicas. (Espinoza y Seminario, 2011)
- **Precalentamiento de carga:** Es un método ideal para la recuperación es calor, especialmente en hornos continuos y sobre todo es una técnica que permite variar el tipo

de producción variando del modo de producción del tipo batch, por lotes o intermitente a un modo de producción continuo. Consiste en alargar la cámara de entrada de la carga, haciendo circular a través de ella los gases de la combustión por contacto directo y en flujo cruzado con la carga entrante al horno. Permite reducir el calor sensible de la carga, reducir la temperatura de los gases de combustión en camino al ambiente, transforma un proceso intermitente y continuo con mejoramiento de la ratio de producción y reduce sustancialmente el consumo de combustible. Esta técnica es muy utilizada en los hornos del tipo túnel, de empuje continuo, de viga galopante, de crisol, de solera de rodillos entre otros. (Espinoza y Seminario, 2011)



Figura 10 Sistema de precalentamiento de carga en un horno por lotes

Fuente: Espinoza y Seminario (2011)

- **Cambio de combustible:** Los hornos eléctricos presentan tecnologías de control de temperatura en el proceso de fundición, pero el costo de la energía eléctrica es sustancialmente elevado con respecto al costo del combustible, con diferencia en la facturación entre 100 y 200% mayor con respecto al gas natural o el gas licuado de petróleo, más aún en este tiempo de incremento de precios de la energía (tal es el caso en Europa en la cual muchas Empresas Siderúrgicas han entrado en crisis económica). Es la razón por la cual se recomienda la sustitución de los hornos eléctricos por hornos térmicos que empleen con gas natural o gas licuado de petróleo. Las nuevas tecnologías de control a través de PLC permiten un control inteligente de la combustión en función a las condiciones de temperatura de la carga dentro del horno. (Rojas, Gómez y Gómez, 2012)

- **Optimización de la combustión:** Control del exceso de aire y la relación aire combustible, operando con la cantidad ideal requerida para cada tipo de combustible, se estima entre 10 a 20 % para combustibles gaseosos y 25-30 % para combustibles líquidos. Control de la combustión, procurando una combustión completa con una mínima presencia de inquemados sólidos e inquemados gaseosos. Esto se puede optimizar mejorando la calidad del combustible al realizar un tratamiento químico externo con aditivos. Control de la presión del horno, a través del dámper de salida de los gases de combustión. Una excesiva abertura del dámper del horno ocasiona una fuga rápida de los gases de la combustión y un exceso del consumo de combustible, mientras que una reducción de la apertura del dámper provoca un sofocamiento en el horno, pérdida en el tiro de chimenea y la presencia de puntos fríos en ciertas zonas del horno. (Guevara,2019)

Para determinar la eficiencia de combustión es necesario realizar la medida de tres variables: el porcentaje de oxígeno (O_2), el porcentaje de monóxido de carbono (CO) y la temperatura de salida de los gases de combustión. Estos parámetros son medidos de manera discreta o continua según el tipo de analizador de gases de combustión y tecnología que tenga. El porcentaje de O_2 contenido en los gases debe mantenerse en un valor máximo de 3,5% y con un valor mínimo de 3,0% (por debajo de ese valor existe el riesgo de tenerse una combustión incompleta, disociación y una alta presencia de CO que puede afectar la naturaleza del material luego de terminado el proceso al cual está sometido), en el otro caso de tenerse un elevado porcentaje de oxígeno, generara en si un mayor volumen de gases de la combustión con una menor temperatura de llama adiabática que puede generar enfriamiento en la atmósfera del horno. (Rojas, Gómez y Gómez, 2012)

Combustión con oxígeno o aire enriquecido: El aire y el combustible son los componentes de la reacción de combustión, el aire es una mezcla de O_2 y N_2 en una proporción de 79% y 21% respectivamente, así tenemos que en volumen de aire entran 3,76 unidades de nitrógeno (79/21) por cada unidad de oxígeno. El nitrógeno es un gas inerte, no reacciona en la combustión, y no contribuye durante la reacción. Sin embargo, tiene un efecto negativo el cual es llevarse consigo un gran porcentaje del calor liberado por la reacción del combustible. (Rojas, Gómez y Gómez, 2012)

En la actualidad muchos hornos utilizan en la reacción de combustión oxígeno puro o con aire enriquecido con oxígeno, disminuyendo el caudal de gases de la combustión salientes

del horno en un 70%, con lo cual disminuyen las pérdidas de calor por la chimenea. Incrementando el porcentaje de oxígeno en el aire a partir de su porcentaje inicial se consigue incrementar la temperatura de la llama adiabática del proceso. Para el caso del gas natural combustionado con aire alcanza los 1938°C, en cambio sí se combustiona en una atmosfera controlada con un 23% de O₂ (aire enriquecido con oxígeno) puede alcanzar los 2004°C (tan solo con una diferencia en porcentaje de oxígeno de 2%). Cuanto mayor sea la temperatura de llama como producto de la calidad de los componentes que intervienen, se conseguirá una mayor transferencia de energía térmica al producto y con la consiguiente reducción del consumo de combustible. (Rojas, Gómez y Gómez, 2012)

2.2 Sistemas de Pre calentamiento de carga.

El calentamiento de la carga por arco eléctrico se efectúa por el flujo de corriente eléctrica entre dos electrodos uno de los cuales puede ser la propia carga ingresada al horno. Las principales aplicaciones industriales del calentamiento por arco eléctrico se realizan en hornos de fusión de metales y hornos para reducción de minerales. En los hornos de arco de fusión se instala la carga en el interior del crisol y se genera el arco entre los electrodos o entre los electrodos y la carga. Se tiene el algún caso de un solo electrodo (es el caso de los hornos de corriente continua), dos electrodos ubicados horizontalmente (calentamiento indirecto por radiación del arco al interior de la cuba) o tres electrodos (hornos de corriente alterna). En los hornos de arco de reducción, utilizados en la fabricación de ferroaleaciones, carburo de calcio, silicio metálico, etc., los electrodos permanecen sumergidos dentro del baño del material fundido y el calentamiento se realiza realmente por resistencia directa del material. (Rojas, Gómez y Gómez, 2012)

Según Espinoza y Seminario (2011), presentan el caso de un horno de Crisol por lotes, donde se realiza el recubrimiento superficial de los tubos de acero con una película de zinc. La energía del proceso es suministrada por la combustión del petróleo R500 en una cámara de combustión donde se homogenizan los gases de la combustión, que luego ingresan a la cámara de calentamiento del crisol a través de ventanas. Los gases calientes circundan una cuba donde este contenido el zinc, posteriormente los gases son eliminados a la atmosfera a través de un sistema de tipo natural. La carga ingresa por lotes al horno, recubriéndose los tubos, luego se extrae la carga. Se instaló un sistema para precalentar la carga, esto en función a las condiciones de salida de la temperatura de los gases de la

combustión, con esta modificación el proceso vario de intermitente a un proceso continuo. El cálculo del informe se realizó para una temperatura de 130° C, con una base de datos para diversos valores, así tenemos 70°C, 90° y 110°C. El contacto de la carga con una fracción de los gases calientes se consideró de flujo directo y en contraflujo y por tiro natural. (Espinoza y Seminario, 2011)

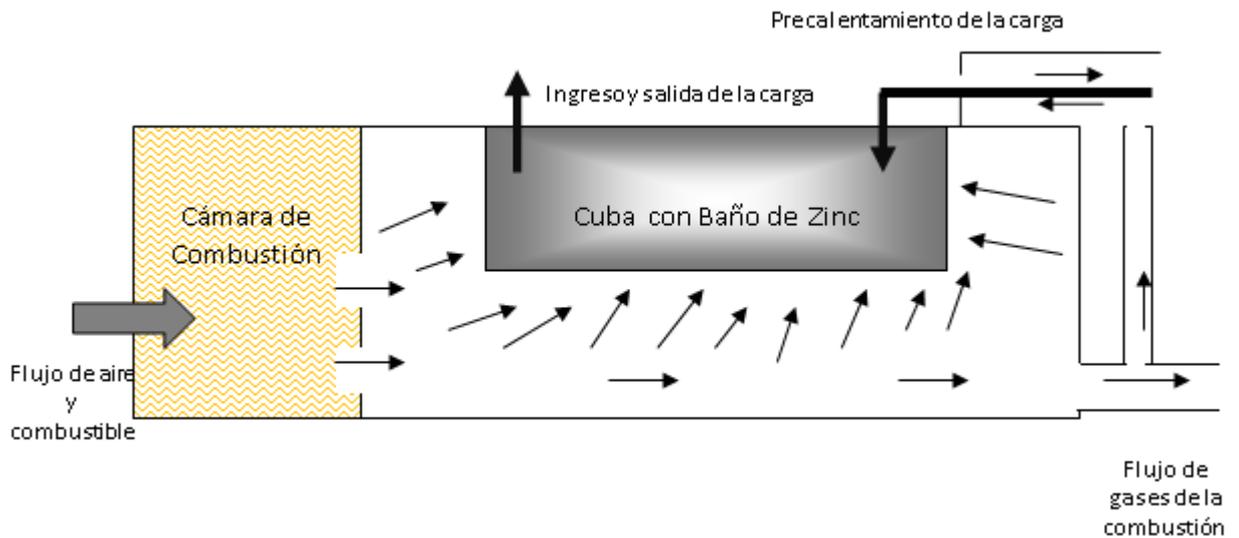


Figura 11 Sistema de precalentamiento de carga para un horno de crisol

Fuente: Espinoza y Seminario (2011)

El precalentamiento del metal y las aleaciones se practica con el objetivo de disminuir su resistencia para la deformación plástica, como regla antes de la laminación, estampado, o para cambiar su estructura cristalina en el tratamiento térmico, cada uno de estos procesos, puede incidir en la calidad de la pieza conllevando a su inutilización de no realizarse correctamente. Para la realización de un correcto proceso es necesario tener en cuenta varios factores: Temperatura de calentamiento, uniformidad de la temperatura y tiempo de calentamiento. Temperatura de calentamiento: Usualmente se le llama a la temperatura de la superficie a la que se quiere llevar el metal para su ulterior procesamiento, esta depende de la composición química del metal, de la temperatura del horno, así como una serie de factores del propio horno (geometría, altura, intensidad activa del piso, productividad etc.) por ejemplo la temperatura de precalentamiento del acero para un proceso posterior de laminación es de 1 240 °C. (Díaz, 20017)

Para un correcto precalentamiento del metal antes de la laminación es necesario prestar mucha atención a la temperatura a la que se desea calentar el metal, La temperatura de

calentamiento para la mayoría de las aleaciones se encuentra en un intervalo de 30 a 100 °C por debajo de la temperatura de sólido, debido a que las inclusiones no metálicas, en las fronteras de los granos forman una fase líquida, la que contribuye a la disminución de la resistencia entre los granos, intensifica la oxidación en sus fronteras, lo que hace que el metal pierda la resistencia y se destruye en el proceso de laminación o estampado. Este fenómeno se llama requemado, el que no puede ser resuelto por ningún proceso posterior de tratamiento, por este motivo se limita la temperatura máxima de calentamiento. (Díaz, 20017)

La primera generación de las tecnologías de recuperación de calor se caracteriza por tener un sistema centralizado de control y ubicado exteriormente del equipo, por donde se conduce los gases de la combustión quienes ceden su calor sensible al aire, el cual luego de ser precalentado se deriva hacia los quemadores para la combustión. Estos sistemas requieren una elevada inversión para su implementación y con restricciones básicamente a espacio que ocupa el precalentador. La incorporación de los recuperadores de calor a zonas cercanas a la cámara de combustión, permite una mejor eficacia de la recuperación del calor, ha dado origen a los recuperadores y regeneradores, como tecnologías de eficientes en la recuperación del calor. (Amell, Copete y Codavid, 2006)

Se desarrollaron sistemas de calentamiento innovadoras en la industria metalúrgica para compensar el avance de la ciencia de materiales, a través de mecanismos de transferencia de calor por radiación, de tal manera que no se requiere de material para el transporte del calor, la radiación viaja a la velocidad de la luz y se difunde de forma uniforme en el espacio obteniéndose un calentamiento uniforme. Una tecnología de este tipo es el sistema con tubos radiantes, fabricados de acero con alto contenido de Cromo – Silicio, siendo desplazados por tubos fabricados de silicio, el cual contiene mejores propiedades debido a su alto coeficiente de emisividad del material, calentamiento homogéneo longitudinal y radial, entre otros. Copete y Codavid, 2006)

2.3 Balance de energía en hornos.

La combustión es una reacción de oxidación, que produce una elevada cantidad de energía térmica (flujo de calor y luz), generando un tipo de llama que depende la naturaleza del combustible, su composición química y valores de presión y temperatura. En toda

reacción de combustión existe un combustible y otro comburente, en este caso solo el oxígeno contenido en el aire. En una reacción completa la totalidad de los elementos que conforman el combustible se oxidan completamente, generándose productos de la combustión como CO_2 , vapor de agua y nitrógeno (elemento inerte que no reacciona). Los requerimientos de aire según la naturaleza del combustible son variables, así tenemos que para combustibles gaseosos el exceso de aire varía entre 10 a 15 %, mientras que para un combustible líquido el exceso de aire es entre 20 a 25 %. En forma real la combustión completa es teórica, produciéndose otros elementos tal como: monóxido de carbono, hidrogeno, óxidos de azufre (si el combustible posee azufre), inquemados (según la naturaleza del combustible) y, si la temperatura es alta, se generan los óxidos de nitrógeno. Para la combustión incompleta el exceso de aire es menor al valor requerido y necesario para reaccionar, originándose principalmente monóxido de carbono. (Flores y Orellana, 2014)

El balance energético de un horno varía principalmente según el tipo de proceso, en este caso para hornos continuos o hornos por lotes. En los hornos del tipo continuo el indicador de producción se evalúa en kg/h o en t/h, mientras que en los hornos por lotes o batch es de mayor relevancia la carga introducida en cada lote considerándose un indicador de kg o en toneladas por lote a procesar. La temperatura para los hornos continuos es homogénea en cada zona del horno en función del tiempo, pero la temperatura de la carga varía según su ritmo de entrada y ubicación sobre la solera del horno. (Ramos,2012)

El enriquecimiento del aire con oxígeno es una tecnología que ayuda a optimiza la reacción de combustión de cualquier equipo térmico. El oxígeno puro favorece la combustión para todo tipo de combustibles, con los resultados de conseguirse un mejor encendido en un menor tiempo, aumenta la estabilidad de la llama dentro del horno y se consigue reducir el porcentaje de emisiones. Al incrementarse el porcentaje de oxígeno en el aire de combustión los valores de temperatura de flama adiabática se incrementan, las tasas de transferencia de calor aumentan y el rendimiento de la combustión mejora. La inyección de oxígeno es de gran utilidad cuando se desea incrementar la producción y así mismo reducir el consumo de energía primaria. (Empresa Carburos metálicos, 2016)

La combustión enriquecida con oxígeno se clasifica según el contenido de oxígeno en el aire con enriquecimiento de nivel bajo, medio y alto. Para el primer nivel (oxígeno entre 23 y 30%) se utiliza para incrementar la eficiencia de los procesos, pues la mayor parte de los combustores funcionan óptimamente hasta 28% de enriquecimiento sin modificaciones tecnológicas en la instalación. El enriquecimiento de medio nivel (O₂ entre 30 y 90%) y de alto nivel (O₂ mayor que 90%) son técnicas mucho más complejas, ya que requieren de tecnologías especializadas debido a los cambios de las características de la combustión, que conllevan altos costos en la modificación de los componentes de la instalación y del suministro de O₂. Cuando el contenido de O₂ en el aire es superior a 98% se presenta una oxicomcombustión, que se caracteriza por tenerse mayores valores de temperaturas de proceso con producción casi nula de NO_x.

Tabla 01 Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiometrica de algunos combustibles

Sustancia	Producto	En peso, kg de comburente/kg de combustible		En volumen, m ³ de comburente/m ³ de combustible	
		Oxigeno	Aire	Oxigeno	Aire
Monóxido de Carbono	CO	1,33	5,75	Solido	Solido
Dióxido de Carbono	CO ₂	2,66	11,51	Solido	Solido
Hidrogeno	H ₂ O	7,94	34,30	0,5	2,39
Metano	CO ₂ +2H ₂ O	3,99	17,24	2,0	9,57
Etano	2CO ₂ +3H ₂ O	3,72	16,07	3,5	16,75
Propano	3CO ₂ +4H ₂ O	3,63	15,66	5,0	23,95
Butano	4CO ₂ +5H ₂ O	3,58	15,46	6,5	31,14
Acetileno	2CO ₂ +H ₂ O	3,07	13,26	2,5	11,96

Fuente: Flores y Orellana (2014)

Las llamas tendrán una mayor temperatura con mejores porcentajes de oxígeno presente en el aire. La carga, incluso al final del proceso estará recubierto de escoria que evitará la

temperatura deseada con lo cual se deberá agregar un calor adicional para vencer esta resistencia térmica para homogenizar el material en toda su sección transversal, para lo cual es imprescindible el control de la temperatura. Un termopar permite captar y medir valores de temperatura dentro de una atmosfera a lata temperatura y con presencia de radiación infrarroja. El consumo de combustible para un horno industrial se calcula según un balance de energía, para la etapa de diseño de un horno, o durante el proceso real, a través de medición de las principales variables intervinientes, tal como temperaturas y flujos másicos, lo cual se debe completar con información documental acerca de propiedades de los materiales tal como combustible, aire, agua de enfriamiento, gases de combustión, entre otros. (Ramos, 2012)

Un balance de energía (según la primera ley de la termodinámica) se realiza por lo general a plena carga de producción para los hornos continuos, y ciclo completo de una carga en los hornos por lotes. En algunos casos los hornos continuos operan solo en 1 o 2 turnos de trabajo/día, por lo cual en los periodos de arranque para el calentamiento y homogenización de la atmosfera del horno y parada (enfriamiento lento) generan gastos de combustibles que debe adicionarse en el cálculo de los indicadores de desempeño energético. En los hornos por lotes, se presentan perdidas cuando se abren los hornos para retirare la carga, lo cual involucra un periodo de tiempo de perdida de temperatura de la atmosfera interior del horno. Entre los componentes de un balance energético se distinguen los que suponen aportación de calor al proceso y los receptores de ese calor. (Ramos, 2012)

Un Balance de Energía permitirá cuantificar el grado de aprovechamiento de la energía suministrada. En este caso la energía térmica es función del calor de reacción y calor sensible del combustible (gas natural o petróleo o carbón). 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 permite conocer qué porcentaje es el calor útil en relación al calor suministrado o entrante al horno. En todo balance de energía es fundamental que las condiciones de mediciones de variables las cuales se recomiendan realizarlas de forma simultánea para evitar los cambios de los valores medidos de un instante a otro. (Cano y Cueva, 2013)

Según el procedimiento desarrollado en el Módulo de Auditorías Energéticas (Guevara,2019), se presentan las siguientes ecuaciones para el balance de energía en un horno de calentamiento:

2.3.1 Flujos de calor entrante al horno.

Flujo de calor 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:

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

Donde:

\dot{Q}_1 = Calor entrante con el calor de reaccion del combustible

\dot{m}_{GN} = Flujo masico del combustible Gas Natural $\left(\frac{kg}{sg}\right)$

Pci_{GN} = Poder calorifico inferior del combustible $\left(\frac{kcal}{kg}\right)$

Flujo de calor sensible por temperatura 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.

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_c * Cp_c * (T_{fc} - T_{ic}) \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

Q_2 = Flujo de calor entrante por calor sensible del combustible

\dot{m}_c = Flujo masico del combustible Gas natural $\left(\frac{kg}{sg}\right)$

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

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

Cp_c = Calor especifico a presion constante del combustible $\left(\frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C}\right)$

Flujo de 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.

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

Donde:

Q_3 = Flujo de calor entrante por calor sensible del aire

\dot{m}_c = Flujo masico del aire $\left(\frac{\text{kg}}{\text{sg}}\right)$

T_{fc} = Temperatura final del aire antrante al horno($^{\circ}\text{C}$)

T_{ic} = Temperatura inicial del medio ambiente($^{\circ}\text{C}$)

Cp_c = Calor espezifico a presion constante del aire $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}}\right)$

Flujo de calor suministrado al horno (\dot{Q}_e): Teniendo en cuenta que el aire comburente para la combustión y las palanquillas a temperatura ambiental, no se consideran sus calores aportantes de calor sensible, por lo tanto el calor entrante al horno es igual a :

$$\dot{Q}_e = \sum_{i=1}^n Q_i = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 \dots \dots (4)$$

2.3.2 Flujos de calor saliente del horno.

Flujo de calor útil en el horno (\dot{Q}_4): También llamado calor sensible de la carga, la cual está compuesta por los calores sensibles del acero Se evalúa en función a la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_4 = \dot{m}_{pl} * Cp_{pl} * (T_{fpl} - T_{ipl}) \dots \dots (5)$$

Donde:

\dot{Q}_4 = Calor util para el calentamiento de las palanquillas

\dot{m}_{pl} = Flujo masico de palanquillas a calentar $\left(\frac{\text{kg}}{\text{sg}}\right)$

Cp_{pl} = Calor espezifico a presion del acero (palanquillas) $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}}\right)$

T_{fpl} = Temperatura final de las palanquillas luego del calentamiento($^{\circ}\text{C}$)

T_{ipl} = Temperatura inicialde las palanquillas antes del calentamiento($^{\circ}\text{C}$)

Flujo de calor perdido por gases de la combustión (\dot{Q}_5): 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:

$$\dot{Q}_5 = \dot{m}_g * Cp_g * (T_g - T_{amb}) \dots \dots (6)$$

Donde:

\dot{Q}_5 = Calor perdido por los gases de la combustión en la chimenea

\dot{m}_g = Flujo masico de los gases de la combustión $\left(\frac{\text{kg}}{\text{sg}}\right)$

C_{p_g} = Calor espezifico a presión constante de los gases de la combustión $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right)$

T_g = Temperatura de los gases de la combustión en la chimenea($^\circ\text{C}$)

Flujo de calor extraído por el agua de refrigeración (\dot{Q}_6): Es el calor extraído por el agua al refrigerar las paredes laterales del horno. Se evalúa según la siguiente ecuación:

$$Q_6 = \dot{m}_w * C_{p_w} * (T_{f_w} - T_{i_w}) \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

Q_6 = Calor extraido por el agua de refrigeración

\dot{m}_w = Flujo masico del agua de refrigeración $\left(\frac{\text{kg}}{\text{sg}}\right)$

C_{p_w} = Calor espezifico a presión constante del agua de refrigeración $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right)$

T_{f_w} = Temperatura final del agua de refrigeración($^\circ\text{C}$)

T_{i_w} = Temperatura inicial del agua de refrigeración ($^\circ\text{C}$)

Flujo de calor perdido a través de las paredes (\dot{Q}_7): 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.

$$P_c = 5.67 * e * \left[\left(\frac{T_p + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \dots \dots \dots (8)$$

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

$$\dot{Q}_7 = \frac{P_c * A}{4.18 * 1000} \dots \dots \dots (9)$$

Donde:

P_c = Perdidas de calor por unidad de superficie (W/m^2)

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 (m^2)

Flujo de calor perdido por puertas abiertas (\dot{Q}_8): 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 radiactivo.

$$\dot{Q}_8 = \left(0.00567 * e * \left[\left(\frac{T_H + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \right) * A_p * \left(\frac{3600}{4.18} \right) \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

A_p = Área de las puertas abiertas (m^2)

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

Otras pérdidas de calor(\dot{Q}_9): Son aquellas perdidas no cuantificadas numéricamente y que incluyen la eficiencia de la combustión, fugas de calor, perdidas por presencia de inquemados sólidos e inquemados gaseosos.

$$\dot{Q}_9 = \text{Otras perdidas}$$

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

$$\dot{Q}_s = \sum_{i=1}^n Q_i = +\dot{Q}_4 + \dot{Q}_5 + \dot{Q}_6 + \dot{Q}_7 + \dot{Q}_8 + \dot{Q}_9 \dots \dots (11)$$

2.3.3 Consolidado de balance de energía.

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 para los flujos de calor entrante y saliente del horno.

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_s \dots \dots \dots (12)$$

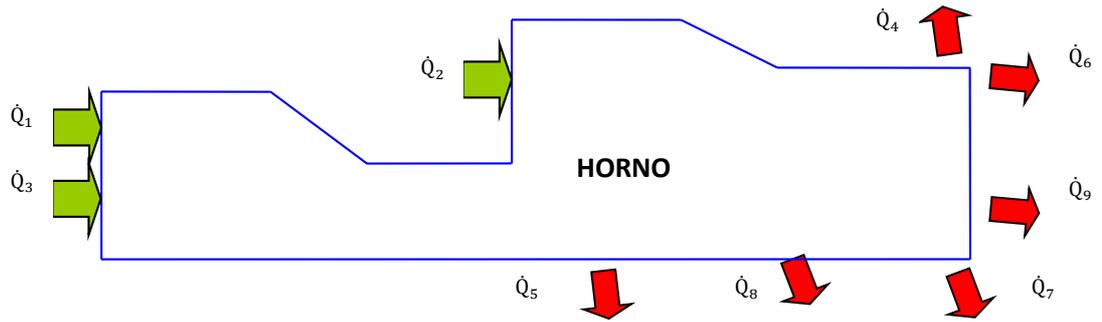


Figura 12 Flujo de calor para el balance en horno de palanquillas

Fuente: Guevara (2019)

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

$$\eta = \frac{Q_3}{Q_e} * 100\% \dots \dots \dots (13)$$

2.3.4 Efecto del precalentamiento de la carga.

Los factores principales a tomar en cuenta durante el diseño de un sistema de precalentamiento para un horno industrial, así como los criterios fundamentales para la selección de las características principales del equipo, factores que especifiquen sus dimensiones y materiales constructivos, siendo de vital importancia la temperatura de operación dentro del horno, la misma que por tratarse de un horno por lotes variará a lo en función del tiempo, siguiendo un ciclo de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento sin extraer la carga del interior del horno. (López y Ramírez, 2011)

En los hornos, el mayor porcentaje de pérdidas se realiza por la temperatura de los gases de combustión. Las pérdidas se generan por el calor sensible de los gases de combustión en función a la temperatura que salen del horno, ya sea en forma de inquemados sólidos o gaseosos sin reaccionar. El calor sensible se emplea en el precalentamiento de la carga. (Cortez, 2003)

Los combustibles en función a su composición química presentan influencias en la pérdida del calor a través de la chimenea y también aberturas tal como puertas y ventanas. En los hornos de baja temperatura de alrededor de 500°C, las pérdidas por gases (calores extraídos por los productos de combustión) son poco afectadas por la naturaleza del

combustible. A temperaturas muy altas del orden superior a 1315 °C, la diferencia en el ahorro de combustible es muy notoria. La diferencia se produce por el cambio de las temperaturas de llama que presentan según su naturaleza cada combustible. Una medida de la temperatura máxima alcanzada durante la reacción de combustión (considerando un sistema aislado) es la temperatura de flama adiabática, definida como aquella alcanzada con la reacción del combustible a presión constante con aire a temperatura ambiental y aislado térmicamente del medio exterior. En los hornos las temperaturas adiabáticas de llama no se alcanzan, porque se irradia el calor mientras tiene lugar la combustión. (Cortez, 2003)

Las chimeneas, son ductos utilizados en los equipos térmicos que permiten la evacuación de los gases de la combustión. Algunos hornos que emplean combustibles gaseosos o líquidos no requieren de estos componentes, sino de conductos solamente con canales cortos o ductos elevados a través de un tiro natural. En caso contrario se implementa de una campana extractora o un dispositivo para recoger los gases a través del techo. Las chimeneas son de vital importancia para los equipos térmicos que empleen regeneradores indistintamente el tipo de combustible empleado. (Cortez, 2012)

El Tiro Natural o depresión estática se produce en la base, generado por la variación de presión originada por los gases dentro del horno y la columna de aire exterior al equipo a una altura similar al de la chimenea. Los factores que afectan al tiro son los siguientes:

- La altura de la chimenea.
- El peso específico del aire será mayor cuanto más baja sea la temperatura, el tiro será mayor cuanto menor es la temperatura exterior.
- Con la reducción del peso específico de los gases, el tiro se incrementa de forma similar a la temperatura de los gases.

Otros factores a tener en cuenta en el tiro de la chimenea, son la altitud, la ubicación geográfica de instalación del horno, la humedad del aire, entre otros. (Cortez, 2012)

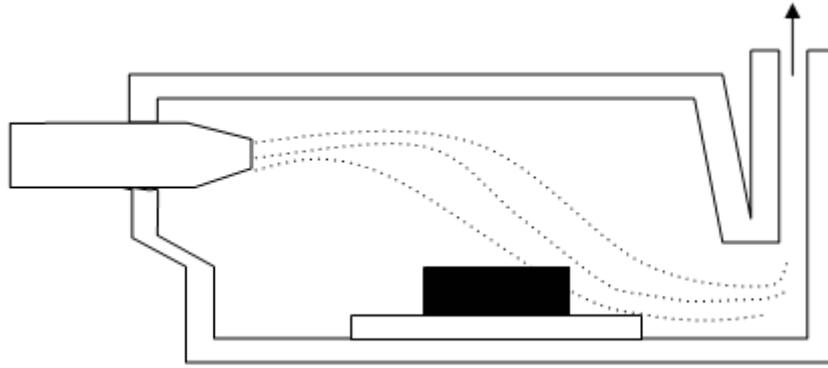


Figura 14 Flujo de pérdidas de calor

Fuente: Cortez (2012)

Para un sistema de precalentamiento de carga se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Dimensiones del ambiente interno del equipo.
- Temperatura de los gases disponible para el calentamiento
- Selección adecuada de los componentes que conforman las paredes, puertas y solera del equipo.
- Espesores óptimos de materiales de cada componente que conforman el horno.
- Flujo de calor transferido desde el horno y los fluidos dentro de él. (López y Ramírez, 2011)

Para el revestimiento de los hornos, se emplean ladrillos fabricados con sustancias refractarias, así tenemos el material denso que tiene propiedades refractarias de resistencia a alta temperatura y el poroso que es un material del tipo refractario-aislante. El primero resiste una alta temperatura, aislando el horno del exterior y mantenimiento una alta temperatura dentro de la atmosfera del horno, está compuesto arcilla y sílice. El ladrillo refractario-aislante-poroso posee una elevada refractariedad, además permite la acumulación del calor dentro del horno para un mejor aprovechamiento. Se emplea mortero refractario para adherir los ladrillos; existe una variedad de ladrillos en función a su composición química que les da ciertas particularidades y tipos de uso. Para materiales diferentes en su estructura química pueden utilizarse para casos en los cuales existen altos choques térmicos (cámaras de combustión de avión) o solo para mantener aislada una sustancia gaseosa a alta temperatura. (López y Ramírez, 2011)

Al calentarse el horno, los materiales se dilatan progresivamente expandiéndose y al enfriarse sufre una contracción térmica, con el peligro de que el cambio brusco de temperatura desarrolle fisuras en la estructura y paredes del horno. La junta de expansión es un espacio vacío que se deja en algunas partes de forma intencionada así como muros y en la bóveda con la finalidad de compensar la expansión y contracción sufrida por los materiales ante los cambios de temperatura, en estos espacios vacíos se rellena con fibra de cerámica, así tenemos para los hornos de concreto, se deja un relleno con fibra de cerámica antes de realizarse el siguiente vaciado, en cada tramo se rellena la junta de dilatación cada 1,5 metros aproximadamente con un espacio de relleno de 5 a 7 mm., en hornos de tamaño pequeño si el ancho o altura mide 1,5 metros, entonces se dejara la junta de compensación tan solo en las esquinas. (López y Ramírez, 2011)

El efecto de precalentamiento de la carga está dado por flujo de calor sensible aprovechado por las palanquillas de acero para precalentarse utilizando el flujo de calor sensible de los gases de la combustión.

Para la figura 13, se cumple que:

$$\dot{Q}_{GC} = \dot{Q}_{PC} \dots \dots \dots (14)$$

Donde:

$$\dot{Q}_{GC} = \dot{m}_g * C_{p_g} * (T_g - T_x) \dots \dots \dots (15)$$

\dot{Q}_{GC} = Flujo de calor suministrado por los gases de la combustión salientes del horno hasta una temperatura T_x , superior a 110 °C, valor mínimo permitido de emisión de los gases de la combustión de gas natural.

$$\dot{Q}_{PC} = \dot{m}_{pl} * C_{p_{pl}} * (T_{xpl} - T_{ipl}) \dots \dots \dots (16)$$

\dot{Q}_{PC} = Flujo de calor útil para precalentar la carga desde la temperatura ambiental hasta la temperatura T_{xpl} , superior en 10 °C en relación a T_x .

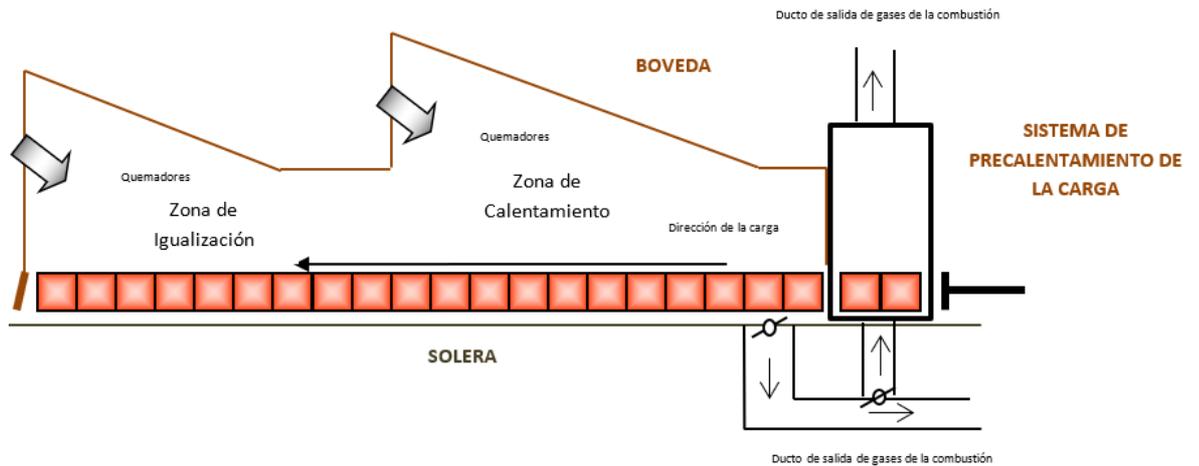


Figura 15 Perfil de horno de palanquillas con precalentamiento de carga

Fuente: Elaboración propia,

Con lo cual el flujo calor útil en el horno de la ecuación 4 varía debido a que la carga ingresa al horno con una temperatura T_{xpl} . Se determina según la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{4pl} = \dot{m}_{pl} * C_{ppl} * (T_{fpl} - T_{xpl}) \dots \dots \dots (17)$$

Donde:

\dot{Q}_{4pl} = Calor util para el calentamiento de las palanquillas

\dot{m}_{pl} = Flujo masico de palanquillas a calentar $\left(\frac{kg}{sg}\right)$

C_{ppl} = Calor espedifico a presion del acero (palanquillas) $\left(\frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C}\right)$

T_{fpl} = Temperatura final de las palanquillas luego del calentamiento($^\circ C$)

T_{xpl} = Temperatura de las palanquillas luego del precalentamiento($^\circ C$)

Con lo cual el flujo de calor saliente del horno con precalentamiento de la carga es igual a:

$$\dot{Q}_{s \text{ cpc}} = \sum_{i=1}^n Q_i = \dot{Q}_{4pl} + \dot{Q}_5 + \dot{Q}_6 + \dot{Q}_7 + \dot{Q}_8 + \dot{Q}_9 \dots \dots \dots (18)$$

Y el flujo de calor entrante al horno se reduce para mantener en equilibrio los flujos de calor entrante y saliente:

$$\dot{Q}_e > \dot{Q}_{e\text{ cpc}} \dots \dots \dots (19)$$

$$\dot{Q}_{e\text{ cpc}} = \dot{Q}_{s\text{ cpc}} \dots \dots \dots (20)$$

2.4 Indicadores de desempeño energético.

El Desempeño Energético está referido a resultados medibles relacionados con el uso eficiente de energía y la dinámica del consumo de la energía térmica y/o eléctrica en un determinado sistema el cual se evalúa a través de una línea base que permite fijar metas y objetivos a alcanzar mediante un plan de actividades desarrollado por la empresa o un consultor externo. El desempeño energético expresa la necesidad de determinar los usos significativos de la energía en las áreas conformantes de la instalación, de tal forma que mediante un análisis como herramientas tal como el diagrama de Pareto, análisis causa raíz o diagrama de Ishikawa se priorice las zonas de mayor importancia en la empresa a la cual mejorar el desempeño energético. El desempeño energético incluye, la implementación de los indicadores de desempeño energético KPI de energía que describan el comportamiento de las diversas variables energéticas intervinientes y que son de importancia conocer el desempeño por parte de la empresa o entidad analizada. El desempeño energético incluye una recopilación de información medible y documental, la cual deberá ser trabajada o realizada a través de la revisión energética, con lo cual se podrá seleccionar la mejor alternativa como solución para un punto crítico energético. Esta toma de decisiones conlleva a un análisis del problema y de las alternativas óptimas de uso eficiente de la energía que permitan conseguir o alcanzar las metas energéticas trazadas y cuantificar el potencial de ahorro energético obtenido. (Hernández Maya, 2018)

Los indicadores de desempeño energético o key performance indicator energy se utilizan para identificar el estado de la dinámica del consumo de energía en una planta consumidora de energía y de igual manera el estado del desempeño energético, en donde es de suma importancia trazar una línea base con los indicadores de desempeño energético, de tal forma que sean la referencia para alcanzar las metas energéticas fijadas. En general deben establecerse uno o más IDEs para cada uno de los usos significativos de

la energía como parte de una política de mejora continua de la empresa y que deberán ser verificados en la etapa de verificación. (Quezada,2020)

El cálculo de los parámetros relacionados a la intensidad energética (alto consumo de energía) permitirá determinar el nivel del uso eficiente de la energía y de la dinámica del consumo de energía, el controlling posibilita la realización de los benchmarking energéticos entre indicadores de diversos centros de consumo de energía.

Tenemos los siguientes Indicadores a evaluar:

- Nivel de producción (NP): Determina la cantidad de carga procesada en el horno por hora, turno, mes, según la necesidad en estudio:

$$NP = \frac{\text{Toneladas de acero procesado(Ton.)}}{\text{tiempo(h)}} \dots \dots \dots (21)$$

- Indicador de Desempeño Energético Técnico (IDEs T): Compara la unidad de energía consumida con el nivel de producción.

$$IE = \frac{\text{m}^3 \text{ de gas natural}}{\text{Toneladas de acero procesado}} \dots \dots \dots (22)$$

- Indicador de Desempeño Energético Ambiental (IDEs A): Compara las toneladas de dióxido de carbono emitidas a la atmosfera por unidad de producción.

$$IA = \frac{\text{Ton. de CO}_2 \text{ emitidas a la atmosfera}}{\text{Toneladas de acero procesado}} \dots \dots \dots (23)$$

- Indicador de Desempeño Energético Económico (IDEs E): Compara la facturación que se incurre por el consumo de gas natural por unidad de producción.

$$IEc = \frac{\text{U\$ por consumo de gas natural}}{\text{Toneladas de acero procesado}} \dots \dots \dots (24)$$

III. Materiales y métodos.

3.1 Materiales:

3.1.1 Referente al acero:

El acero inoxidable es una aleación de hierro que contiene un porcentaje de cromo de 10.5%, por ejemplo, el AISI 310 es un Acero inoxidable con propiedades refractarias compuesto por Cr – Ni – Si, es acero austenítico y antimagnético, no templable, puede alcanzar dureza tan solo con un enfriamiento sin calentamiento, por su alto contenido de cromo y níquel tiene una gran resistencia a la oxidación en caliente a temperaturas cercanas a 1200°.

Aplicaciones: Intercambiadores de calor para sistemas térmicos y de refrigeración, componentes de turbinas de gas, crematorios, en pisos de hornos, ganchos, moldes para vidrio, tubos de conducción, ganchos o colgadores; su vida útil es función de las condiciones de trabajo a la cual se le somete.

La composición química es la siguiente: C: 0,15 - Si: 2,0 - Cr: 25,0 - Ni : 20,0

Propiedades Físicas

Densidad (gr./cm³) = 7.9

Punto de Fusión (°C) = 1400 – 1455

Temperatura de calentamiento para proceso de laminación 1 240°C.

Calor específico =0,2014 Kcal/kg-°C

Dimensiones 130 mm x 130 mm x 2 metros de largo.

Peso = 275 kg/palanquilla.



Figura 16 Patio de palanquillas de acero

Fuente: SIDERPERU.

3.1.2 Referente al combustible:

El gas natural es un gas combustible obtenido que se obtiene de rocas porosas en la corteza terrestre y se encuentra junto al petróleo crudo en el mismo yacimiento. El gas natural se compone de una mezcla de hidrocarburos con muy bajo punto de ebullición. El metano es el principal constituyente de este combustible, el etano puede estar presente en cantidades de hasta 10%, el propano, el butano, pentano hexano, heptano y agua también están presentes. El gas natural es transportado como gas comprimido a una presión de 200 Bar y temperatura atmosférica, en donde se reduce el volumen del gas natural en 300 veces. El gas natural comprimido es inodoro, incoloro, no tóxico, su densidad (con respecto al agua) es 0,65 y combustiona cuando entra en contacto con aire a concentraciones de 5 a 15%. Dentro sus propiedades físico químicas tenemos las siguientes:

Poder calorífico inferior: 7 775 kcal/m³.

Densidad: 0.65 kg/m³ (Fuente: Osinergmin)

Calor específico: 1.7 kJ/kg °C = 0,406 kcal/kg °C.

El combustible tiene un exceso de aire óptimo para la combustión es de 10 a 12%. Cuando se utiliza oxígeno puro o se enriquece el aire se incrementa notablemente la combustión, y la energía térmica disponible en el horno. Con esto se incrementa la productividad y se reducen los costos por facturaciones debido a la reducción del consumo de combustible. La tecnología del precalentamiento de carga se ha implementado para calentar materiales férricos y no férricos, así como en hornos que ocupan gas natural, combustible líquido o coque.

Dentro de las ventajas tenemos:

- Se incrementa la capacidad de producción del horno (entre 20 y 40%).
- Se reduce el costo de producción por tonelada de material procesado (plomo, hierro, acero, vidrio, etc.)
- Disminuye el consumo de combustible (entre 25 y 35%), como consecuencia del mejor empleo del calor de reacción del combustible.
- Disminuye el volumen de gases de combustión, al no estar presente el nitrógeno (del aire).
- Por lo general se emplea quemadores (Aire-Gas), los cuales no presentan una considerable inversión.

3.1.3 Referente al horno de palanquillas:

Se presenta el siguiente reporte de plena carga para el horno de palanquillas:

Tabla 02 Información de operación a plena carga de horno de palanquillas

Parámetro	Cantidad	Unidad de Medida
Producción continua	55	Toneladas de palanquilla/hora
Flujo de combustible	1 900	m ³ /hora
Flujo de aire enriquecido con 7 % de O ₂ . (Exceso de aire 6.6 % y 15,8 kg GN/kg aire)	25 061	m ³ /hora
Temperatura de combustible	28	°C
Temperatura aire comburente enriquecido	300	°C
Temperatura de gases de la combustión saliente del horno	640	°C
Temperatura de ingreso de la palanquilla	20	°C
Temperatura final de calentamiento de la palanquilla	1 240	°C
Temperatura inicial del agua de enfriamiento	18	°C
Temperatura final del agua de enfriamiento	32	°C
Temperatura paredes frontales del horno	150	°C
Temperatura aberturas del horno	250	°C
Peso de palanquilla	275	kg
Numero de palanquillas en el horno	200	palanquillas
Flujo másico de agua de enfriamiento	22	m ³ /h
Temperatura ambiente	20	°C

Fuente: Producción laminación Caliente

3.2 Métodos.

3.2.1 La Investigación es del tipo: pre -experimental, de naturaleza descriptiva.

3.2.2 El diseño de la investigación pre- experimental se utiliza para establecer una relación entre la causa y el efecto de una situación. Es un diseño de investigación donde se observa el efecto causado por la variable independiente sobre la variable dependiente.



O1: Indicadores de desempeño energético sin precalentamiento de la carga.

O2: Indicadores de desempeño energético con precalentamiento de la carga

X: Sistema de precalentamiento de la carga.

G.E: Horno continuo de calentamiento de palanquillas.

3.2.3 Metodología de cálculo:

Se presenta la siguiente secuencia del cálculo par obtención de resultados y discusión realizado en el presente informe:

- Balance de energía en el horno de calentamiento de palanquillas, según se detalla en la siguiente figura:

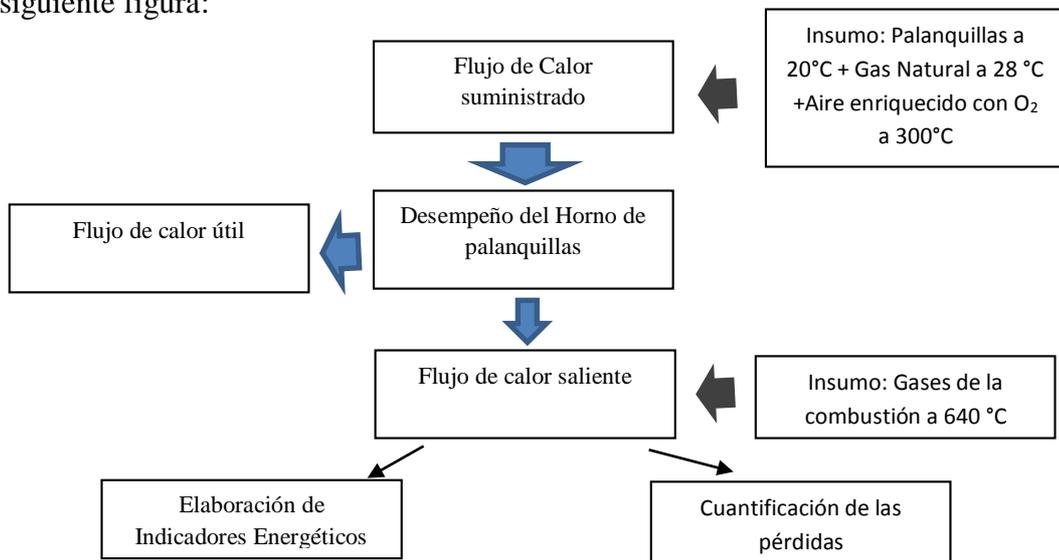


Figura 17 Esquemización del Balance de Energía inicial en horno de palanquillas

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuantificación del flujo de calor útil remanente del flujo de calor de pérdidas. Se tiene un flujo de calor remanente de la temperatura de los gases de la combustión luego del precalentador de aire enriquecido con O_2 , el cual se encuentra inicialmente a $640^\circ C$, los cuales antes de ser expulsados a la atmósfera pueden ser recuperados a una precámara de precalentamiento de la carga de palanquillas de acero al horno, según la siguiente figura:

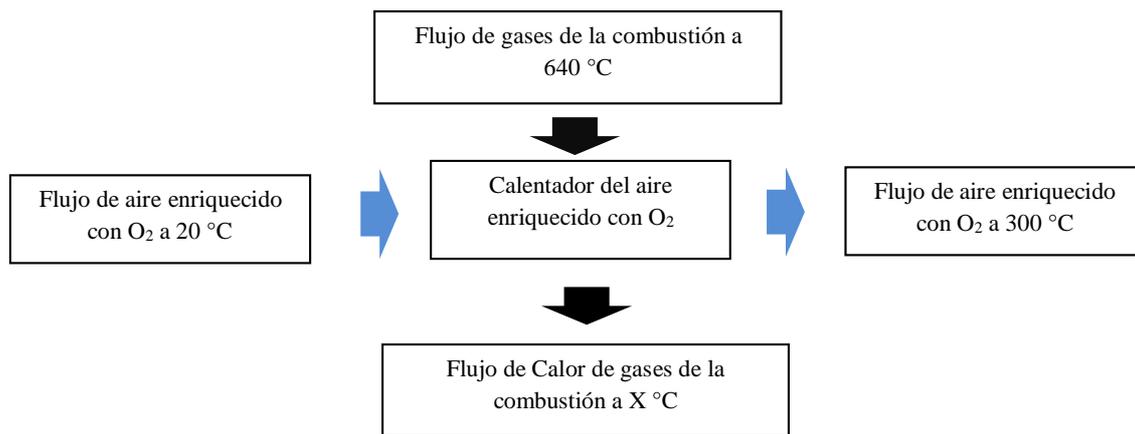


Figura 18 Esquematización del Balance de Energía en precalentador de aire de horno de palanquillas

Fuente: Elaboración Propia.

- Se planifica extraer una fracción de los gases de la combustión salientes del horno de palanquillas y derivarlos hacia un precalentador de la carga, para el precalentamiento de las palanquillas entrantes al horno, con la finalidad de reducir el consumo de combustible (gas natural). En donde el precalentador de carga se ubicó en la mesa de carguío delante de la puerta de entrada al horno de palanquillas.

Los gases de la combustión actualmente se extraen del precalentador de aire a una temperatura aun elevada y su valor de emisiones a la atmósfera está limitado por el valor de $110^\circ C$, el cual representa el valor de temperatura mínimo permitido para los gases de la combustión de gas natural a la atmósfera (punto de rocío de los gases de la combustión de gas natural es $54^\circ C$). Una fracción de los gases de la combustión se deriva hacia un precalentador de la carga y la fracción restante se deriva al precalentador de aire enriquecido con O_2

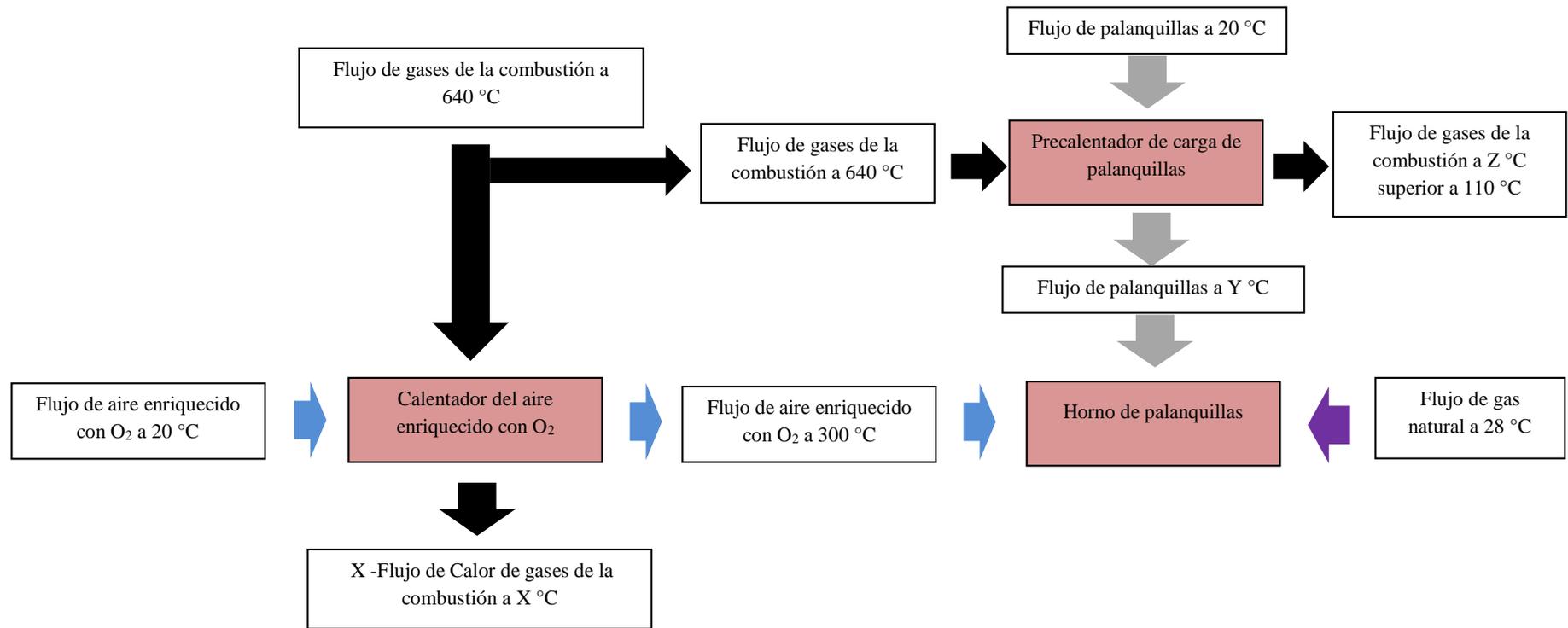


Figura 19 Esquematzación para el Balance de Energía con precalentador de carga de horno de palanquillas

Fuente: Elaboración Propia.

- Se determina los valores de temperatura de los gases de la combustión salientes del precalentador de aire y del precalentador de carga restringidos por la temperatura permitida de los gases de la combustión provenientes de la combustión de gas natural. Así mismo la fracción de gases de la combustión derivados al precalentador de aire existente y al precalentador de carga propuesto.
- Se dimensiona el precalentador de carga según las características de espacio disponible en la puerta de entrada al horno de calentamiento en la mesa de carguío. La cual incluye los servicios auxiliares para el tiro inducido adicional para extraer los gases de la combustión del precalentador de carga (evitando la infiltración de aire dentro del precalentador de aire o la fuga de gases de la combustión por las paredes laterales del precalentador de carga.
- Se realiza un benchmarking energético entre los indicadores de desempeño energético técnico, económico y ambiental del sistema inicial y propuesto.

IV. Resultados y discusión.

4.1 Condiciones actuales de desempeño del Horno.

4.1.1 Balance de energía.

Para el balance de energía se toma en cuenta los valores de la tabla 02 y las ecuaciones de los ítems 2.4.1 y 2.4.2 para determinar los flujos de calor entrante y flujos de calor saliente del horno.

a. Flujo de calor entrante al horno:

Flujo de calor por reacción del combustible (\dot{Q}_1) : Aplicando la ecuación 1.

$$\dot{Q}_1 = 1\,900 \frac{m^3}{h} \times 7\,775 \frac{kcal}{m^3} = 14\,772\,500 \frac{kcal}{h}$$

Flujo de calor sensible por temperatura del combustible (\dot{Q}_2): Aplicando la ecuación 2.

$$\dot{Q}_2 = 1\,900 \frac{m^3}{h} \times 0,65 \frac{kg}{m^3} \times 0,406 \frac{kcal}{kg\,^{\circ}C} \times (28 - 20) = 4\,011 \frac{kcal}{h}$$

Flujo de calor sensible del aire de combustión (\dot{Q}_3): Aplicando la ecuación 3.

$$\dot{Q}_3 = 25\,061 \frac{m^3}{h} \times 0,83 \frac{kg}{m^3} \times 0,24 \frac{kcal}{kg\,^{\circ}C} \times (300 - 20) = 1\,397\,817 \frac{kcal}{h}$$

Las propiedades del aire empleadas son:

$$C_{p_a} = \text{Calor específico a presión constante del aire} = 0,24 \frac{kcal}{kg\,^{\circ}C}$$

$$\rho_a = \text{densidad del aire a } 150\,^{\circ}C = 0,83 \frac{kg}{m^3}$$

Flujo de calor suministrado al horno (\dot{Q}_e): Aplicando la ecuación 4.

$$\dot{Q}_e = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i = 14\,772\,500 + 4\,011 + 1\,397\,817 = 16\,174\,328 \frac{kcal}{h}$$

b. Flujo de calor saliente del horno:

Flujo de calor útil en el horno: Aplicando la ecuación 5.

$$\dot{Q}_4 = 55\,000 \frac{kg}{h} \times 0,2014 \frac{kcal}{kg\,^{\circ}C} \times (1240 - 20)^{\circ}C = 13\,513\,940 \frac{kcal}{h}$$

Las propiedades del acero son:

$$Cp_a = \text{Calor específico a presión constante del acero} = 0,2014 \frac{kcal}{kg\,^{\circ}C}$$

Flujo de calor perdido por gases de la combustión (\dot{Q}_5): Se tiene el siguiente procedimiento.

Para determinar el flujo de aire se aplica la ecuación de continuidad en el ducto de salida de los gases de la combustión, en donde se demuestra lo siguiente:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c + \dot{m}_a$$

$$\dot{m}_g = (1\,900 * 0,65) + (25\,061 * 0,83) = 22\,036 \frac{kg}{h}$$

Las propiedades de los gases de combustión a 640 °C son:

$$Cp_a = \text{Calor específico a presión constante de los gases} = 0,25 \frac{kcal}{kg\,^{\circ}C}$$

En el calentador de aire de la siguiente figura se cumple la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_g * Cp_g * (T_{1g} - T_g) = \dot{m}_a * Cp_a * (T_{fa} - T_{ia})$$

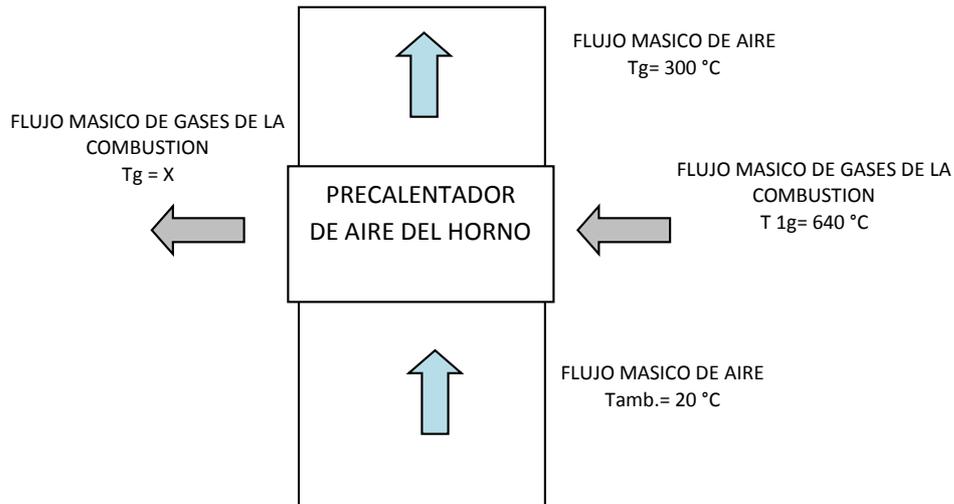


Figura 20 Distribución de flujos en el precalentador de aire del horno

Fuente: Elaboración propia

$$22\,035,63 * 0,25 * (640 - T_g) = (25\,061 * 0,83) * 0,24 * (300 - 20)$$

$$T_g = 386,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con el ultimo valor se cumple que:

$$T_g = 386,3 \text{ } ^\circ\text{C} > T_{fa} = 300 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{con una diferencia de } 86,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación 6.

$$\dot{Q}_5 = 22\,035,63 * 0,25 * (386,3 - 20) = 2\,177\,740 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Flujo de calor extraído por el agua de refrigeración (\dot{Q}_6): Aplicando la ecuación 7.

$$Q_6 = 22\,000 * 1 * (32 - 18) = 308\,000 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Donde:

$$\dot{m}_w = 22\,000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 22 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Flujo de calor perdido a través de las paredes (\dot{Q}_6).

Donde:

P_c = Perdidas de calor por unidad de superficie (W/m^2)

T_p = Temperatura de la pared exterior del horno = 200 °C

T_a = Temperatura del medio ambiente = 20 °C

e = Emisividad del material de la pared del horno = 0,95

$$P_c = 5.67 * 0,95 * \left[\left(\frac{150 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] = 1\,327,5 \frac{W}{m^2} = 1\,143,3 \frac{kcal}{h\,m^2}$$

A = Área superficial del horno (m^2)

Se cuenta el área no refrigerada, en este caso las paredes frontal y posterior del horno:

Pared frontal Largo = 8 metros Altura = 2 metros

Pared posterior Largo = 8 metros Altura = 2.2 metros

$$A = (8 * 2) + (8 * 2,2) = 33,6\,m^2$$

Aplicando la ecuación 9:

$$\dot{Q}_7 = 1\,143,3 * 33,6 = 38\,415 \frac{kcal}{h}$$

Flujo de calor perdido por puertas abiertas (\dot{Q}_8):

Donde:

A_p = Área de las puertas abiertas (m^2)

Pared frontal Largo = 6.5 metros Altura = 0,5 metros

Pared posterior Largo = 6,5 metros Altura = 0,5 metros

$$A = 2 * (6,5 * 0,5) = 6,5\,m^2$$

T_H = Temperatura en la puerta del Horno (°C) = 250 °C

$$\dot{Q}_8 = \left(0.00567 * 0,95 * \left[\left(\frac{250 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \right) * 6,5 * \left(\frac{3600}{4.18} \right)$$

$$\dot{Q}_8 = 20\,338 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Otras pérdidas de calor: Se calcula según la ecuación 11.

$$\dot{Q}_s = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i = \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 + \dot{Q}_5 + \dot{Q}_6 + \dot{Q}_7 + \dot{Q}_8 + \dot{Q}_9$$

$$\dot{Q}_9 = 115\,895 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

4.1.2 Consolidado del balance de energía.

Tabla 03 Balance de Energía en el Horno

Flujo de calor entrante	kcal/h	%	Flujo de calor saliente	kcal/h	%
\dot{Q}_1	14'772 500	90,38 %	Q_4	13'513 940	83,55%
\dot{Q}_2	4 011	0,02 %	Q_5	2'177 740	13,49%
\dot{Q}_3	1'397 817	9,60%	\dot{Q}_6	308 000	1,90 %
---	-----	----	\dot{Q}_7	38 415	0,23 %
---	-----	----	\dot{Q}_8	20 378	0,12 %
---	-----	-----	\dot{Q}_9	115 895	0,72 %
\dot{Q}_e	16'174 328	100.00%	\dot{Q}_s	16'174 328	100.00%

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla anterior se tiene la siguiente figura con valores de temperatura.

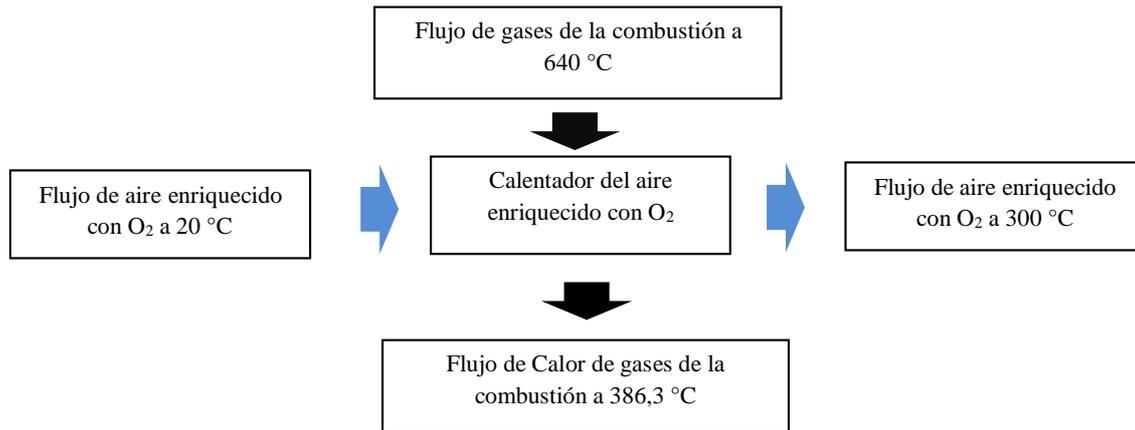


Figura 21 Temperaturas en el sistema de recuperación de horno de palanquillas

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.3 Indicadores de desempeño.

Eficiencia del Horno: Se evalúa en función al flujo de calor útil absorbido por las palanquillas para precalentarse hasta 1 240 °C y flujo de calor entrante al horno.

$$\eta = \frac{13'513\ 940}{16'174\ 328} * 100\% = 83,55 \%$$

Tenemos los siguientes indicadores:

Indicador de Desempeño Energético Técnico (IDEs T): Compara la unidad de energía consumida con el nivel de producción.

$$IDEs\ T = \frac{1\ 900\ \frac{m^3}{h}}{55\ \frac{Ton}{h}} = 34,54\ \frac{m^3\ de\ gas\ natural}{Ton\ de\ acero\ calentado}$$

Indicador de Desempeño Energético Ambiental (IDEs A): Compara las toneladas de dióxido de carbono emitidas a la atmosfera por unidad de producción. Para el gas natural se tiene un factor de emisiones de 56,1 Ton CO₂ equivalentes emitidos/TJ (Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - Volumen 2: Energía, pág. 2.16 - 2.17)

Se determina la equivalencia de emisiones de 1 900 m³/h.

Poder calorífico del gas natural 7 775 kcal/m³

$$\text{CO}_2 \text{ emitido a la atmosfera} = 1\,900 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 7\,775 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} * \frac{\text{TJ}}{10^9 \text{kJ}} * 56,1 \frac{\text{Ton CO}_2}{\text{TJ}}$$

$$\text{CO}_2 \text{ emitida la atmosfera} = 3,46 \frac{\text{Ton CO}_2}{\text{h}}$$

$$\text{IA} = \frac{3\,460 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{h}}}{55 \frac{\text{Ton}}{\text{h}}} = 62,90 \frac{\text{kg CO}_2 \text{ emitido}}{\text{Ton de acero calentado}}$$

Indicador de Desempeño Energético Económico (IDEs E): Compara la facturación que se incurre por el consumo de gas natural por unidad de producción.

La Empresa es un consumidor categoría VII con un consumo mayor a 280 001 m³/mes, por lo tanto, su costo unitario referencial par a la ciudad de Chimbote según precios de octubre 2021 es 2 244 Soles (559,68 U\$) sin contar el margen de capacidad (Ver calculo en anexos)

$$\text{IEc} = \frac{559,68 \text{ U\$ por consumo de gas natural}}{55 \text{ Toneladas de acero procesado}} = 10,17 \frac{\text{U\$}}{\text{Tonelada de acero calentado}}$$

4.2 Dimensionamiento del sistema de precalentamiento de carga.

4.2.1 Balance de energía para calentamiento de carga.

Cálculo según máxima temperatura de precalentamiento de carga en función al menor valor permitido de emisión de gases de la combustión del gas natural.

Según la figura 14 y la ecuación 14, para el precalentamiento de la carga se define el valor de la temperatura final de precalentamiento hasta 100 °C, con el cual se debe tomar en cuenta que los gases de la combustión para un máximo aprovechamiento de su calor

sensible deberán estar 10 °C sobre el valor de precalentamiento de la carga, en este caso 110 °C. Seguidamente determinamos el valor del flujo másico de los gases a utilizar para el precalentador de carga.

$$\dot{Q}_{GC} = \dot{Q}_{PC}$$

Donde:

$$\dot{m}_{pl} = 55\,000 \text{ kg/h}$$

$$Cp_{pl} = 0.2014 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$Cp_g = 0,25 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$T_g = 640 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_{gpl} * Cp_g * (T_{gi} - T_{gf}) = \dot{m}_{pl} * Cp_{pl} * (T_{xpl} - T_{ipl})$$

$$55\,000 * 0,2014 * (100 - 20) = \dot{m}_{gpl} * 0,25 * (640 - 110)$$

$$\dot{m}_{gpl} = 6\,688 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Queda disponible el siguiente flujo de gases entrante al precalentador de aire:

$$\dot{m}_{gpa} = \dot{m}_g - \dot{m}_{gpl}$$

$$\dot{m}_{gpa} = 22\,035,63 - 6\,688 = 15\,348 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Seguidamente se verifica el valor de la nueva temperatura de los gases de la combustión a la salida del precalentador de aire. El cual está restringido aun valor de 310 °C (10 °C más sobre el valor de 300 °C, el cual es el valor de la temperatura final del aire. El cálculo es similar al desarrollado para la figura 19.

Se cumple:

$$\dot{m}_{gpa} * Cp_g * (T_{1g} - T_g) = \dot{m}_a * Cp_a * (T_{fa} - T_{ia})$$

$$15\,368 * 0,25 * (640 - T_g) = (25\,061 * 0,83) * 0,24 * (300 - 20)$$

$$T_g = 276,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El valor obtenido es menor al valor de restricción el cual es 310 °C, por lo tanto, la primera alternativa de solución de tener una temperatura de precalentamiento de la carga hasta 100 °C es inviable técnicamente.

Cálculo según valor de temperatura de precalentamiento de carga en función al menor valor permitido de emisión de gases de la combustión del gas natural.

Asumiendo un valor de temperatura de precalentamiento de la carga de 70 °C.

Según la figura 14 y la ecuación 14, para el precalentamiento de la carga se define el valor de la temperatura final de precalentamiento hasta 70 °C, con el cual se debe tomar en cuenta que los gases de la combustión se emitirán a 110 °C para un máximo aprovechamiento permitido, con el cual se determina el flujo másico de gases de la combustión aprovechables.

$$\dot{Q}_{GC} = \dot{Q}_{PC}$$

Donde:

$$Cp_{pl} = 0,2014 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$Cp_g = 0,25 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$T_g = 640 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{gi} = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_{gpl} * Cp_g * (T_{gi} - T_{gf}) = \dot{m}_{pl} * Cp_{pl} * (T_{xpl} - T_{ipl})$$

$$55\,000 * 0,2014 * (70 - 20) = \dot{m}_{gpl} * 0,25 * (640 - 110)$$

$$\dot{m}_{gpl} = 4\,180 \frac{kg}{h}$$

Queda disponible el siguiente flujo de gases entrante al precalentador de aire:

$$\dot{m}_{gpa} = \dot{m}_g - \dot{m}_{gpl}$$

$$\dot{m}_{gpa} = 22\,035,63 - 4\,180 = 17\,856 \frac{kg}{h}$$

Seguidamente se verifica el valor de la nueva temperatura de los gases de la combustión a la salida del precalentador de aire. El cual está restringido a un valor de 310 °C (10 °C más sobre el valor de 300 °C, el cual es el valor de la temperatura final del aire. El cálculo es similar al desarrollado para la figura 19.

Se cumple:

$$17\,856 * 0,25 * (640 - T_g) = (25\,061 * 0,83) * 0,24 * (300 - 20)$$

$$T_g = 326 \text{ °C}$$

El valor obtenido es mayor al valor de restricción el cual es 310 °C, por lo tanto, la segunda alternativa de solución de tener una temperatura de precalentamiento de la carga hasta 70 °C es viable técnicamente.

4.2.3 Detalles del sistema de precalentamiento de carga.

Para el sistema de precalentamiento de carga continua se tienen cuenta las siguientes dimensiones:

Se considera una cadencia de calentamiento para 200 palanquillas desde 20 °C a 1 240 °C

$$\text{Cadencia de calentamiento} = \frac{200 \text{ palanquillas}}{1\,240 - 20 \text{ °C}} = 0,164 \frac{\text{palanquilla}}{\text{°C}}$$

Para un incremento de temperatura de 50 °C (desde 20 °C hasta 70 °C)

$$\text{Cadencia de calentamiento} = 0,164 \frac{\text{palanquilla}}{\text{°C}} * 50 \text{ °C} = 8,2 \text{ palanquillas}$$

Se asume un valor de la eficacia de un horno de calentamiento similar a un horno de 0,8.

Por lo tanto, el número de palanquillas en el precalentador de carga es:

$$\text{Numero de palanquillas en el precalentador de carga} = \frac{8,2}{0,8} = 10,25 = 11$$

El largo del precalentador de carga es de:

$$\text{Largo} = 11 * 0.13 = 1,43 \text{ m}$$

Dimensionamiento del extractor de gases de la combustión.

Se tiene la siguiente ecuación para el cálculo del motor eléctrico del exhaustor de los gases de la combustión:

Para la determinación de la potencia del motor eléctrico del ventilador (P) en kW, se tiene el siguiente calculo:

$$P = \frac{Q * H}{\eta_v * \eta_m} (KW)$$

Dónde:

Q = Caudal de aire (m³/s) (a una densidad para gases de la combustión de 0,57 kg/m³)

$$Q = 4\ 180 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{\text{h}}{3\ 600 \text{ sg}} * \frac{\text{m}^3}{0,57 \text{ kg}} = 2,037 \frac{\text{m}^3}{\text{sg}}$$

H = Presión estática a desarrollar por el ventilador (valor de la presión estática 7" Hg = 23,75 kPa)

η_v = Eficiencia del ventilador. =0.8

η_m = Eficiencia del motor eléctrico. = 0.9

Se tiene un valor de la potencia eléctrica del motor igual a:

$$P_{ME} = \frac{2,037 * 23,75}{0.8 * 0.9} = 67,19 \text{ kW} = 70 \text{ kW}$$

(ver layout de planta en anexos)

4.3 Balance de energía con sistema de precalentamiento de la carga.

4.3.1 Balance de energía.

a. Flujo de calor entrante al horno:

El flujo de calor suministrado al horno se mantiene constante con un valor de 16'174 313,61 kcal/h. Se contabiliza un flujo de calor adicional debido al calor sensible aportado por las palanquillas de acero entrantes al horno a 70 °C.

$$\dot{Q}_{pl} = 55\,000 * 0,2014 * (70 - 20) = 553\,850 \frac{kcal}{h}$$

El flujo de calor suministrado al horno estará en función a la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{c1} * P_{ci_c} + \dot{m}_{c1} * C_{p_c} * (T_{fc} - T_{ic}) + \dot{m}_{a1} * C_{p_a} * (T_{fa} - T_{ia}) + 553\,850$$

Además:

$$\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{m}_{c1} * 0,65 * 15,8 * 1,066}{0,83}$$

Reemplazando valores tenemos el siguiente resultado:

$$\dot{m}_{c1} = 1\,834,94$$

$$\dot{m}_{a1} = 24\,203,12$$

Se determinan los valores aportantes de los flujos de calor entrante;

Flujo de calor por reacción del combustible (\dot{Q}_1) :

$$\dot{Q}_1 = 1\,834,94 \frac{m^3}{h} * 7\,775 \frac{kcal}{m^3} = 14'266\,656 \frac{kcal}{h}$$

Flujo de calor sensible por temperatura del combustible (\dot{Q}_2):

$$\dot{Q}_2 = 1\,834,94 \frac{m^3}{h} * 0,65 \frac{kg}{m^3} * 0,406 \frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C} * (28 - 20) = 3\,872 \frac{kcal}{h}$$

Flujo de calor sensible del aire de combustión (\dot{Q}_3):

$$\dot{Q}_3 = 24\,203,12 \frac{m^3}{h} * 0,83 \frac{kg}{m^3} * 0,24 \frac{kcal}{kg\,^{\circ}C} * (300 - 20) = 1'349\,950 \frac{kcal}{h}$$

b. Flujo de calor saliente del horno:

Flujo de calor útil en el horno:

$$\dot{Q}_4 = 55\,000 * 0,2014 * (1240 - 70) = 12'960\,090 \frac{kcal}{h}$$

Flujo de calor perdido por gases de la combustión (\dot{Q}_5):

$$\dot{m}_g = \dot{m}_c + \dot{m}_a$$

$$\dot{m}_g = (1\,834,94 * 0,65) + (24\,203,12 * 0,83) = 21\,281,3 \frac{kg}{h}$$

$$\dot{Q}_5 = 21\,281,3 * 0,25 (386,3 - 20) = 1'948\,835 \frac{kcal}{h}$$

Flujo de calor extraído por el agua de refrigeración (\dot{Q}_6): Aplicando la ecuación 7.

$$Q_6 = 308\,000 \frac{kcal}{h}$$

Flujo de calor perdido a través de las paredes (\dot{Q}_7).

$$\dot{Q}_7 = 1\,141,4 * 33,6 = 38\,415 \frac{kcal}{h}$$

Flujo de calor perdido por puertas abiertas (\dot{Q}_8):

$$\dot{Q}_8 = 20\,338 \frac{kcal}{h}$$

Otras pérdidas de calor:

$$\dot{Q}_9 = 115\,895 \frac{kcal}{h}$$

Flujo de calor recuperado por precalentamiento de palanquillas:

$$\dot{Q}_{pl} = 553\,850 \frac{kcal}{h}$$

4.3.2 Consolidado del balance de energía.

Tabla 04 Balance de Energía en el Horno con precalentamiento de la carga

Flujo de calor entrante	kcal/h	%	Flujo de calor saliente	kcal/h	%
\dot{Q}_1	14'266 656	88,20 %	Q_4	12'960 090	80,12%
\dot{Q}_2	3 872	0,02 %	Q_5	1'948 835	13,50%
\dot{Q}_3	1'349 950	8,34%	\dot{Q}_6	308 000	1,90 %
\dot{Q}_{pl}	553 850	3,44 %	\dot{Q}_7	38 415	0,24 %
---	-----	----	\dot{Q}_8	20 378	0,12 %
---	-----	----	\dot{Q}_9	344 760	0,72 %
---	-----	----	\dot{Q}_{pl}	553 850	3,40 %
\dot{Q}_e	16'174 328	100.00%	\dot{Q}_s	16'174 328	100.00%

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla anterior se tiene la siguiente figura final de distribución de flujos en el horno:

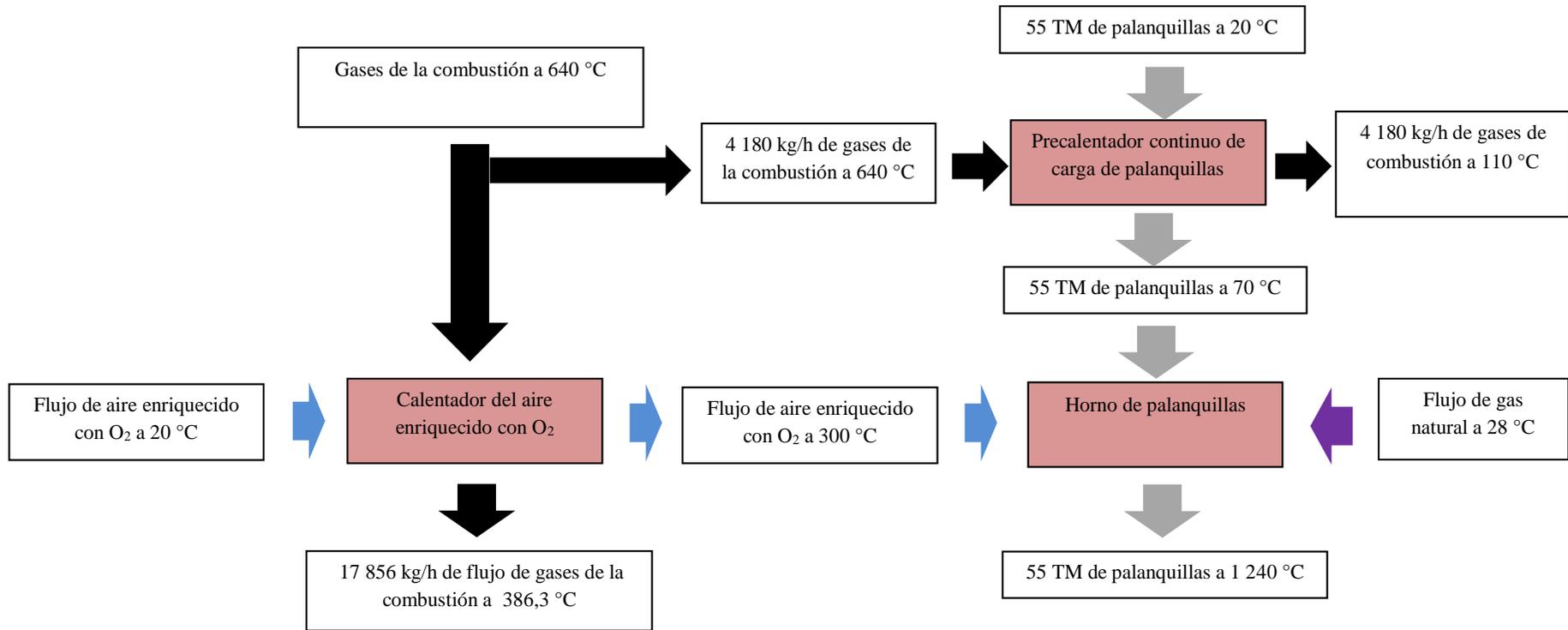


Figura 22 Distribución real de temperaturas con sistema de precalentamiento continuo de carga de horno de palanquillas

Fuente: Elaboración Propia.

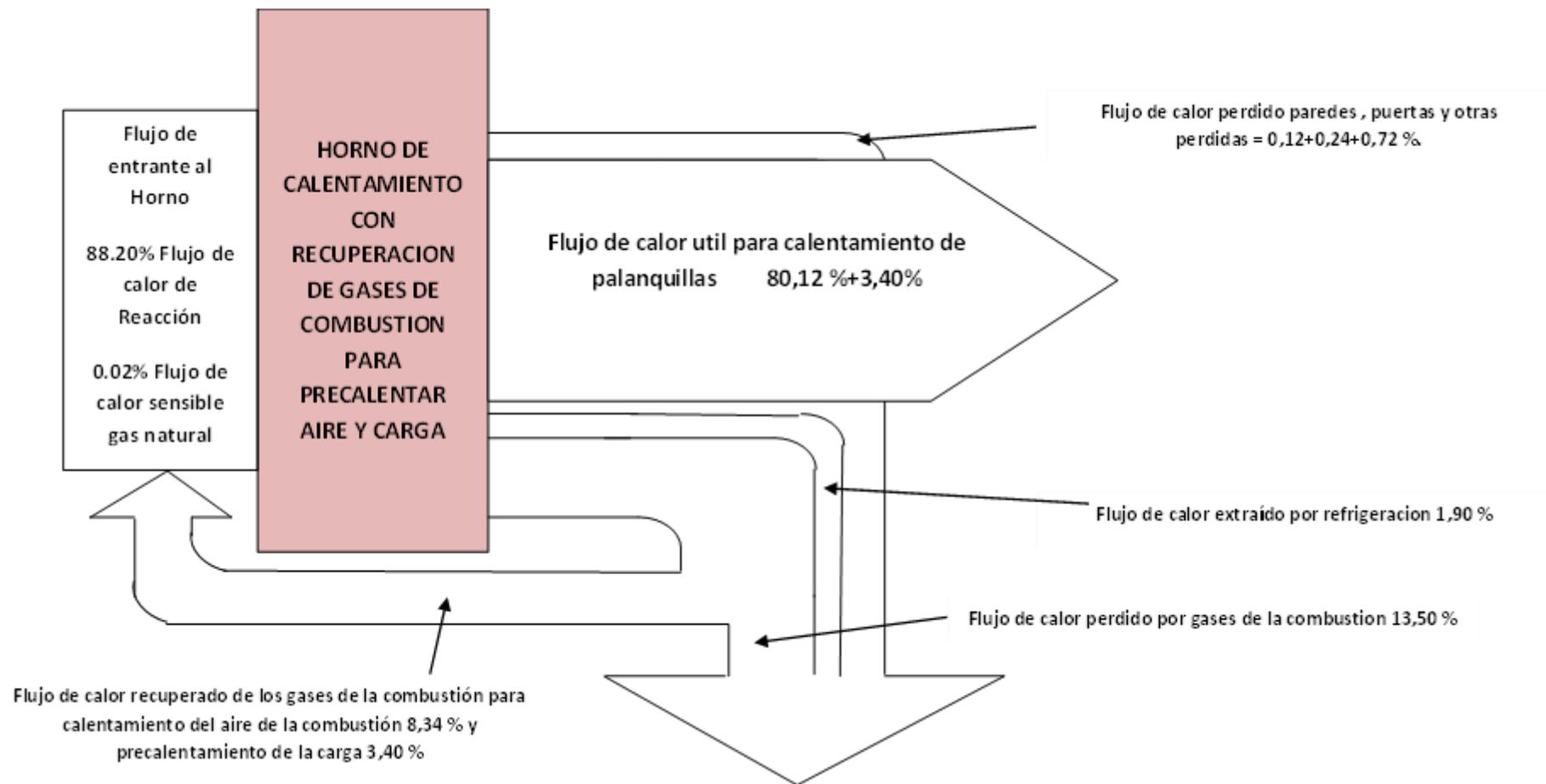


Figura 23 Diagrama de sankey para sistema de precalentamiento continuo de carga de horno de palanquillas

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.3 Indicadores de desempeño.

Eficiencia del Horno: Se evalúa en función al flujo de calor útil absorbido por las palanquillas para precalentarse hasta 1 240 °C y flujo de calor entrante al horno.

$$\eta_1 = \frac{13'513\ 940}{16'174\ 328 - 553\ 850} * 100\% = 86,51\ \%$$

Tenemos los siguientes indicadores:

Indicador de Desempeño Energético Técnico (IDEs T) :

$$IDEs\ T_1 = \frac{1\ 834,94\ \frac{m^3}{h}}{55\ \frac{Ton}{h}} = 33,36\ \frac{m^3\ de\ gas\ natural}{Ton\ de\ acero\ calentado}$$

Indicador de Desempeño Energético Ambiental (IDEs A):

Se determina la equivalencia de emisiones de 1 834,94 m³/h.

Poder calorífico del gas natural 7 775 kcal/m³

$$CO_2\ emitido\ a\ la\ atmosfera = 1\ 834,94\ \frac{m^3}{h} * 7\ 775\ \frac{kcal}{m^3} * 4,18\ \frac{kJ}{kcal} * \frac{TJ}{10^9 kJ} * 56,1\ \frac{Ton\ CO_2}{TJ}$$

$$CO_2\ emitida\ la\ atmosfera = 3,34\ \frac{Ton\ CO_2}{h}$$

$$IDEs\ A_1 = \frac{3\ 340\ \frac{kg\ CO_2}{h}}{55\ \frac{Ton}{h}} = 60,72\ \frac{kg\ CO_2\ emitido}{Ton\ de\ acero\ calentado}$$

Indicador de Desempeño Energético Económico (IDEs E): Compara la facturación que se incurre por el consumo de gas natural por unidad de producción.

La Empresa es un consumidor categoría VII con un consumo mayor a 280 001 m³/mes, por lo tanto, su costo unitario referencial para la ciudad de Chimbote según precios de octubre 2021 es 2 167 Soles (540,39 U\$) sin contar el margen de capacidad (Ver calculo en anexos)

$$\text{IDEs Ec} = \frac{540,39 \text{ U\$ por consumo de gas natural}}{55 \text{ Toneladas de acero procesado}} = 9,80 \frac{\text{U\$}}{\text{Tonelada de acero calentado}}$$

4.4 Benchmarking entre indicadores de desempeño.

- **Con respecto a la eficiencia del Horno.** Con la implementación del sistema de precalentamiento de carga la eficiencia del horno se incrementa desde 83,55% hasta un valor de 86,51%, un total de 2,96 % , debido a que se está aprovechando el calor sensible aun disponible de los gases de la combustión expulsados al medio ambiente a una temperatura de 386,3 °C.

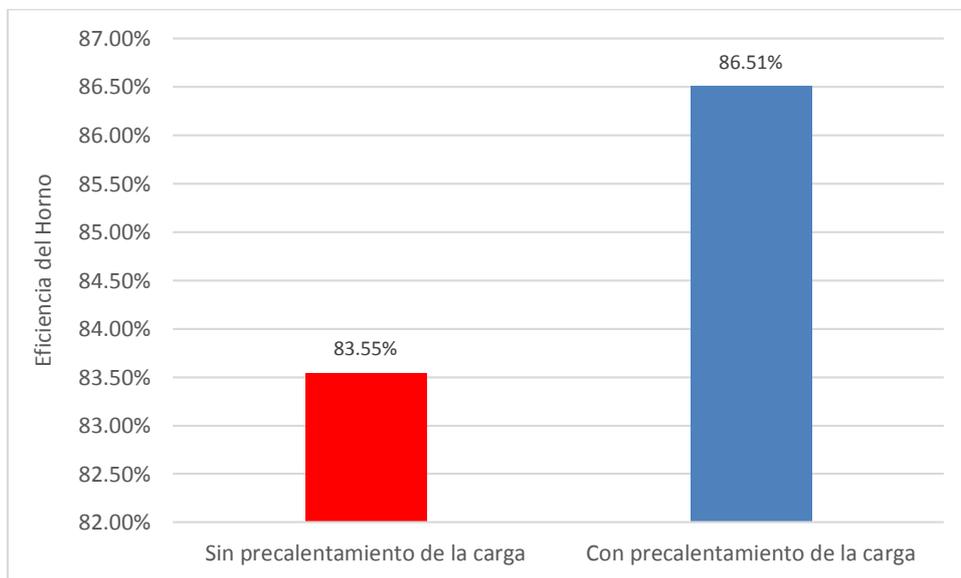


Gráfico 1 Benchmarking entre eficiencia de horno

- **Con respecto al IDEs T.** Con la implementación del sistema de precalentamiento de carga el valor del IDEs T mejora desde 34,54 m³ de gas natural consumido/Tonelada de acero calentado a 33,36 gas natural consumido/Tonelada de acero calentado, con lo cual por cada hora de producción se tiene una reducción del combustible de 65,06 m³ de gas

natural/hora dejada de consumir. Lo que significa una reducción de 3,42 % el consumo de combustible.

Para el área de laminación planos se cuenta con una producción de 23 horas/día (1 hora de parada de mantenimiento autónomo/dio) y 30 horas de parada de mantenimiento mensual programado , se tiene un total de 660 horas efectivas de operación. Con lo cual se tiene una reducción mensual de combustible de 42 939 m³ de gas natural.

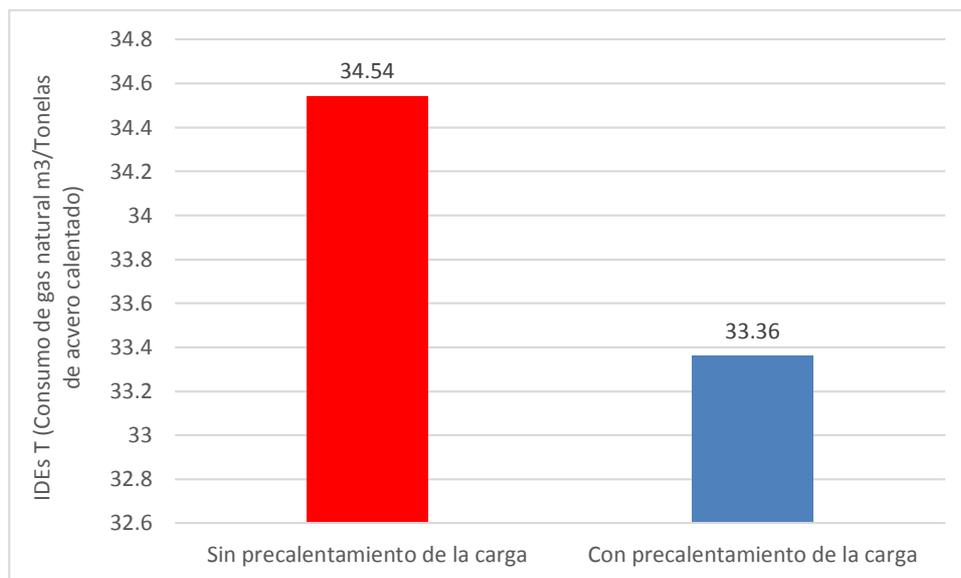


Gráfico 2 Benchmarking entre IDEs T de horno

- **Con respecto al IDEs A.** Con la implementación del sistema de precalentamiento de carga el valor del IDEs A mejora desde 62,90 kg de CO₂ emitido/Tonelada de acero calentado a 60,72 kg de CO₂ emitido/Tonelada de acero calentado, con lo cual por cada hora de producción se tiene una reducción del combustible de 2,18 kg de CO₂ emitido/Tonelada de acero calentado. Lo que significa una reducción de los gases emitidos de CO₂ 3,46 %. Con un total por hora de emisiones de 119,9 kg de CO₂. Según el mismo análisis realizado para el IDEs A, se tiene una reducción mensual de las emisiones de CO₂ de 79,13 Toneladas/mes.

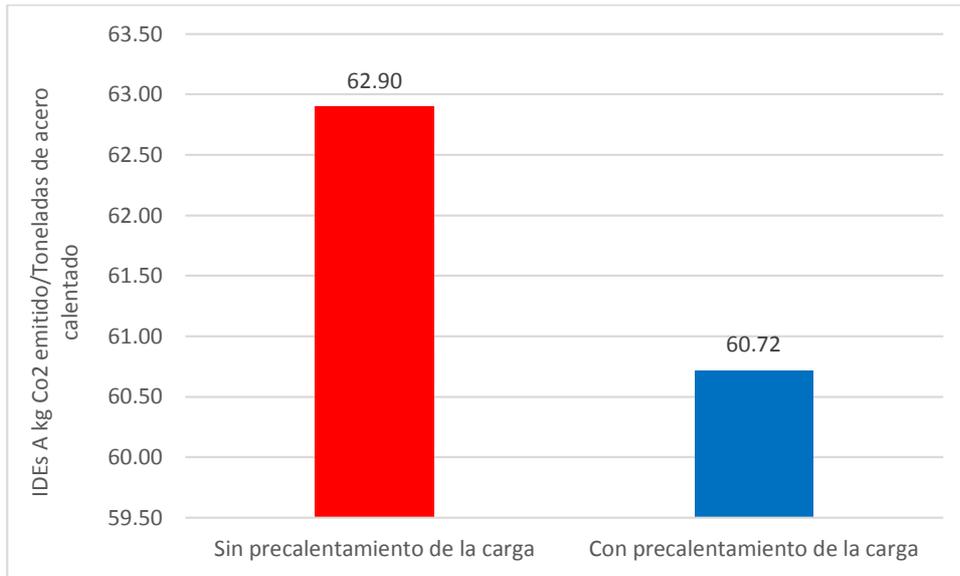


Gráfico 3 Benchmarking entre IDEs A del horno

- Con respecto al IDEs E.** Con la implementación del sistema de precalentamiento de carga el valor del IDEs E mejora desde 10,17 U\$ facturados por consumo de gas natural/tonelada de acero calentado a 9,80 U\$ facturados por consumo de gas natural/tonelada de acero calentado, con lo cual por cada hora de producción se tiene una reducción del combustible de 0,37 U\$ facturados por consumo de gas natural/tonelada de acero calentado. Lo que significa una reducción del 3,63 %. Con una reducción de la facturación de gas natural por hora de 20,35 U\$.

Según el mismo análisis realizado para el IDEs T, se tiene una reducción de los costos de facturación de gas natural mensual de 13 431 U\$/mes.

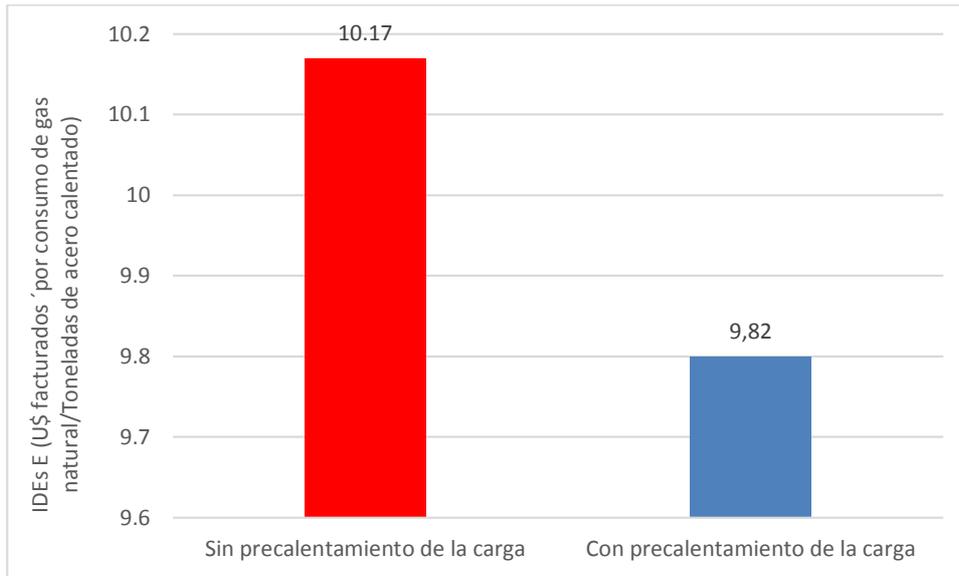


Gráfico 4 Benchmarking entre IDEs E del horno

4.4 Discusión de resultados.

Cano, I. & Cueva, J. (2012) obtuvieron un aumento del rendimiento del horno desde 72.84 % hasta 82%, lo que significa un incremento de 9,16 % para un horno de 20 Toneladas/hora, con una reducción de 673.92 Toneladas de CO₂/año (56,16 Toneladas de CO₂/mes) dejadas de emitir a la atmosfera consumiendo Petróleo R500, mientras que para nuestro caso consumiendo gas natural pero para un sistema de precalentamiento de la carga se consiguió un incremento del rendimiento del horno de 2,96% para un horno de 55 Toneladas/hora, con una reducción mensual de 79,13 Toneladas de CO₂/mes.

Cribillero, P. (2013), en su investigación para el proceso de calentamiento de las tinas de decapado obtuvo una mejora del indicador técnico en 20.98 % y del indicador económico 31.13 % que incluyo el cambio de combustible, a diferencia del presente estudio los indicadores de desempeño energético técnico y económico ambos incrementaron en 3,42% y 3,63% respectivamente tan solo para el precalentamiento de la carga en un horno de calentamiento.

Domínguez, L. y Pérez, F. (2011). Obtuvieron ahorros en la facturación de la energía (eléctrica y combustibles), obteniéndose un Ahorro económico de 65 418 U\$/año (5 451 U\$) con un porcentaje de mejora en la facturación de 62.67 % y con una mejora en los

Indicadores Energéticos técnicos del orden de 67.70% básicamente al aplicar la tecnología de la cogeneración, a diferencia de la presente investigación se consigue ahorros anuales proyectados de 13 431 U\$/mes, con un porcentaje de reducción de la facturación y del indicador de desempeño energético técnico de 3,42%.

Espinoza, J. y Seminario, F. (2011), determino que la temperatura del precalentamiento de la carga es de 190 °C reutilizando el calor sensible de los gases de la combustión provenientes de la combustión del petróleo R500 para un horno de galvanizado en donde aprovecha la diferencia de temperaturas desde 500 °C hasta 404 °C y una reducción de consumo de combustible del orden de 402.0 Galones de petróleo al mes. Obtuvo una mejora del Indicador Energético en 101.58 %, una mejora del indicador económico de 60.05 %. A diferencia de nuestra investigación en la cual se aprovecha el calor sensible de los gases de la combustión de forma paralela en un precalentador de carga y un precalentador de aire de combustión, en el primero de ellos desde 640 hasta 110 °C con una reducción del consumo de combustible de 42 939 m³ de gas natural mensual y una mejora de los indicadores de desempeño energético técnico de 3,42%.

Concordamos con Mariños, D., Rojas, S., De los Santos, Y. & Chucuya, R. (2016), en reconocer la importancia de la recuperación y aprovechamiento del calor sensible de los gases de la combustión para los procesos de precalentamiento del aire de la combustión y precalentamiento de la carga. El aprovechamiento del calor sensible de los gases de la combustión permite un incremento del rendimiento del horno y los indicadores de desempeño energético, con la diferencia de que su trabajo fue más orientado al análisis de la optimización de la combustión, pero no evalúa los resultados finales del desempeño del horno, que si ha sido determinado en el presente informe.

Del mismo modo Nonalaya, M. (2019), aplico un modelo de gestión para el uso eficiente de la energía eléctrica y térmica del Horno N° 3 de la Empresa UNACEM S.A.A. consiguiendo resultados favorables tanto en el ahorro de energía eléctrica y energía térmica, a diferencia en nuestro informe que se centró exclusivamente en un análisis del uso eficiente de la energía térmica. El ahorro económico fue de 1,35 US\$/TN de cemento a diferencia en nuestra investigación se consiguió un ahorro económico de de 0,37 U\$ facturados por consumo de gas natural/tonelada de acero calentado.

V. Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones.

- Se realizó un balance de energía en el horno de palanquillas determinándose que tiene una eficiencia de 83,55 % contando con un sistema de precalentamiento de aire hasta 300 °C , mientras que los gases de la combustión se emiten a 386, 2 °C , siendo el combustible utilizado gas natural. La carga entrante al horno se encuentra a 20°C.
- Los indicadores de desempeño energético para el horno sin precalentamiento de carga son: IDEs T es de 34,54 m³ de gas natural consumido/Tonelada de acero calentado, IDEs A igual a 62,90 kg de CO₂ emitido/Tonelada de acero calentado y IDEs E igual a 10,17 U\$ facturados por consumo de gas natural/tonelada de acero calentado.
- Se dimensiono un sistema de precalentamiento de la carga de palanquillas en el cual el precalentamiento se realiza desde 20 a 70 °C, haciendo uso de 4 180 kg/sg de gases de la combustión, quienes ceden su calor sensible desde 64 °C a 386,3 °C. En el sistema de precalentamiento de carga esta dimensionado para 11 palanquillas y se necesita un exhaustor con un motor eléctrico de 70 kW.
- Con el sistema de precalentamiento de aire se obtiene una eficiencia del horno de 86,51 con los siguientes indicadores de desempeño energético: IDEs T es de 33,56 m³ de gas natural consumido/Tonelada de acero calentado, IDEs A igual a 60,72 kg de CO₂ emitido/Tonelada de acero calentado y IDEs E igual a 9,80 U\$ facturados por consumo de gas natural/tonelada de acero calentado.
- El indicador de desempeño energético han incrementado 3,42 %, reduciéndose el consumo de mensual de gas natural en 42 939 m³ de gas natural, reducción los costos de facturación de gas natural mensual en 13 431 U\$/mes y reducción mensual de las emisiones de CO₂ de 79,13 Toneladas/mes.

Recomendaciones.

- El Control térmico del Horno debe contar con un sistema automatizado de apertura e ingreso de carga, para evitar las pérdidas de calor por puertas abiertas sometidas a temperaturas cercanas a 250 ° C, la cual es dañino también para la salud humana. Se debe contar con sistemas de automatización para el control de temperaturas en diversos puntos y variables del horno, ya que en muchas ocasiones la temperatura de 250 ° C es sobrepasada.
- Un análisis pendiente es el estudio de la influencia del aire enriquecido con oxígeno para evaluar el comportamiento de la combustión y sus beneficios energéticos, económicos y sobre el medio ambiente. Y del mismo modo el porcentaje de oxígeno adicionado.
- El sistema de enfriamiento del horno juega un papel muy importante en la disipación del calor por las paredes laterales del horno, sería recomendable el empleo de nano fluidos (agua adicionada con compuestos químicos) n que puedan extraer el mismo flujo de calor por con un menor flujo de agua utilizada.
- La influencia de los Proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio de Bono Carbono aún se sigue aplicando, aunque los precios por tonelada de carbono dejado de emitir se han reducido aun a valores inferiores a 7 U\$ es aún una posibilidad de obtener incentivos económicos a través de proyectos de eficiencia energética tal como lo es el precalentamiento de la carga,

VI. Referencias bibliográficas y virtuales.

- Aguirre, R. y Plascencia, F. (2018). Diseño y construcción de un horno de inducción de baja potencia utilizando igbt's para fundir metales ligeros. Tesis para optar el título de Ingeniero Electromecánico en la Universidad de las Fuerzas Armadas de Latacunga. Ecuador.
- Amell, A. Copete, M. y Codavid, F. (2007). Desarrollo y evaluación de un sistema de combustión autoregenerativo y radiante para procesos de alta temperatura en PYMES. Revista Dyna, Año 74, Nro. 151, pp. 61-69. Medellín. ISSN 0012-7353. [Consulta: 21 de octubre del 2021]. Disponible en:
<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n151/a07v74n151.pdf>
- Aranda, A. Barrio, F. y García León, M. (2014). Sistemas de gestión de la energía ISO 50001. Universidad de Zaragoza. España. 144 p. ISBN 9788416272419
- Bermúdez, V. (2000). Tecnología Energética. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. 250 pp.
- Cacua, K. (2013). Revisión de la combustión con aire enriquecido con oxígeno como estrategia para incrementar la eficiencia energética. Publicación en Revista Científica Scielo. 2013. Universidad Nacional de Bogotá. Colombia. [Consulta: 21 de agosto del 2021]. Disponible en:
<http://www.scielo.org.co/pdf/inun/v17n2/v17n2a12.pdf>
- Cano, A. y Cueva, J. (2013). Estudio de un sistema de precalentamiento de aire para el ahorro de energía en el horno de calentamiento de palanquillas de la empresa SIDERPERU S.A. Tesis para optar el título de Ingeniero en energía en la Universidad Nacional del Santa. Perú.
- Castillo, P. (2015). Manual de Combustión Industrial. Publicación web del Ing. Percy Castillo. Perú. [Consulta: 22 de octubre del 2021]. Disponible en:
https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2015-01-25_10-01-39113913.pdf

- Castrillón, R. Gonzales, A. y Quispe, E. (2014). Metodología para la implementación del Sistema de Gestión Integral de la Energía: Fundamentos y casos prácticos. Programa Editorial Universidad Autónoma de Occidente. España. 420 p. ISBN 9789588994130
- Carbajal, H. (2013). Diagnóstico energético en la empresa pesquera Cantabria S.A. para la mejora de sus indicadores energéticos. Tesis para optar el título de Ingeniero en energía en la Universidad Nacional del Santa. Perú
- Comunidad Andina de Fomento. (2016). Guía para la Evaluación de Elegibilidad de Financiación de Proyectos de Eficiencia Energética. Documento elaborado para el Banco de Desarrollo de América Latina. México. [Consulta: 21 de agosto del 2021]. Disponible en:
<https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1302/GUIA%20-%20hornos%20de%20alta%20eficiencia.pdf?sequence=1>
- Cortez, G. (2003). Propuesta para el diseño y construcción de un horno a gas para tratamientos térmicos en el área de mantenimiento de la empresa de acero galvanizado P & M. C.A. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Central de Venezuela.
- Cribillero, P. (2013). Influencia del cambio de combustible residual 500 a gas natural para el proceso de calentamiento de las tinajas de decapado respecto al costo por energía en la planta de galvanizado viales en la empresa SIDER PERÚ S.A.A. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico Eléctrico en la Universidad Cesar Vallejo, Perú.
- Dávila. (2009). Desarrollo de una tecnología refractaria basada en MGO-CAZRO3 reforzado con hercinita para hornos rotatorios de cemento. Tesis para optar el grado de Doctor en Ingeniería Mecánica. Universidad de Nueva León. México.

- Díaz, Y. (2017). Hornos de Calentamiento. Publicación realizada en la Universidad Tecnológica de la Habana en Cuba. [Consulta: 19 de setiembre del 2021]. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/308682829_Hornos_de_calentamiento_reheat_furnaces
- Domínguez, L. y Pérez, F. (2011). Cogeneración utilizando vapores excedentes de la caldera kessel anlage de SIDERPERÚ. Tesis para optar el título de Ingeniero en energía en la Universidad Nacional del Santa. Perú.
- Duarte, D. y Vargas, J. (2018). Diseño de horno eléctrico para tratamientos térmicos con atmósfera controlada. Tesis para optar el título de Ingeniero mecánico en la Universidad de los libertadores de Colombia.
- Empresa Carburos Metálicos (2016). Hornos de combustión. Carburos Metálicos. España. [Consulta: 19 de agosto del 2021]. Disponible en:
<http://www.carburos.com/contact-us.aspx>
- Espinoza, J. y Seminario, F. (2011). Reducción del consumo de petróleo R-500 en el horno de la planta de galvanizado de tubos de la empresa Siderperú, Tesis para optar el título de Ingeniero en energía en la Universidad Nacional del Santa. Perú.
- Flores, E. y Orellana, N. (2014). Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas. Diseño de horno eléctrico para tratamientos térmicos con atmósfera controlada. Tesis para optar el título de Ingeniero mecánico en la Universidad de El Salvador.
- Guevara, P. (2016). Diseño de un horno de templado y termoendurecido de vidrio plano. Tesis para optar el título de Ingeniero Electromecánico en la Universidad Nacional de Loja en Ecuador.

- Guevara, R. (2019). Diagnósticos y Racionalización de la Energía. Universidad Nacional del Santa. Perú. 85 p.
- Insertec. (2021). Hornos de reverbero. Página web de empresa Insertec. España. [Consulta: 20 de julio del 2021]. Disponible en:
<https://www.insertec-store.com/es/hornos-industriales/hornos-casthouse-de-aluminio/fusion-mantenimiento-aleacion-colada/horno-reverbero.html>
- López, V. y Ramírez, W. (2011). Diseño de un horno para tratamiento térmico del rodete de la turbina francis (Celec unidad de negocio Hidroagoyán). Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico en la Escuela Superior de Chimborazo en Ecuador.
- Mariños, D. De los Santos, Y. Rojas, S. y Chucuya, R. (2016). Optimización del combustible por precalentamiento de la carga y enriquecimiento con oxígeno en los hornos de recalentamiento de la industria siderúrgica. Publicación en Revista Científica SCIENDO. Volumen 19. 2016. Universidad Nacional de Trujillo. Perú. [Consulta: 20 de setiembre del 2021]. Disponible en:
<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/SCIENDO/article/view/1491>
- Mestanza, D. y Lara, V. (2012). Diseño y construcción de un horno de combustión industrial para fundir aluminio”. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico de la Escuela Superior Tecnológica de Chimborazo. Ecuador.
- Nonalaya, M. (2019). Modelo de gestión de la energía, para disminuir los costos productivos del horno N° 3, en la Empresa UNACEM S.A.A Tesis para optar el título de Ingeniero Industrial de la Universidad Nacional del Centro en Perú.
- Ortiz, R. (2010). Mejoramiento de la eficiencia de la caldera de alto horno de Siderperú mediante la implementación de un precalentador de aire con los gases de combustión. Tesis para optar el título de Ingeniero en Energía en la Universidad Nacional del Santa en Perú.

- Palomino, E. Cabrera, J. y Ferreras, F. (2018) Evaluación de causas del sobreconsumo de combustible en horno de calentamiento de acero para laminación. Publicación Científica Revista Scielo N° 21. La Habana. [Consulta: 19 de octubre del 2021]. Disponible en:
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442018000100006
- Quezada, B. (2020). Arreglo del suministro de energía para optimizar la línea base energética en empresa Isadora S.A.C. Tesis para optar el título de Ingeniero en Energía en la Universidad Nacional del Santa en Perú.
- Ramos, Y. (2012). Diseño del sistema de control de temperatura de un horno de calentamiento N° 2 en SIDOC S.A. Tesis para optar el título de Ingeniero Electrónico en la Universidad de Occidente en Ecuador.
- Rojas, C. Gómez, J. y Gómez, R. (2012). Guía para la Evaluación de Elegibilidad de Financiación de Proyectos de Eficiencia Energética. Hornos de Alta eficiencia. Banco de desarrollo de América Latina. México. [Consulta: 23 de agosto del 2021]. Disponible en:
<https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1302/GUIA%20-%20hornos%20de%20alta%20eficiencia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rubio, P. (2018). Evaluación técnica del proceso de combustión y de eficiencia energética de un horno industrial panadero. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico Industrial en la Universidad Técnica Federico Santa María en Chile.
- Quintanilla, J. (2018). Efecto de la temperatura y flujo de dióxido de carbono en la reactividad de los reductores sólidos usados en la siderúrgica integrada. Tesis para optar el título de Ingeniero Metalurgista en la Universidad San Agustín de Arequipa.

Torres, M. (2014). Materiales de uso técnico. Hornos. Consejería de Cultura y Educación de Galicia de España. [Consulta: 20 de agosto del 2021]. Disponible en:

<https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/index.html>

Trinks, W. y Mawhinney, M. (2003). Hornos Industriales. John Wiley & Sons. 456 p. ISBN 0471387061

Vega, J. (2014). Optimización de los procesos de combustión del horno petrolero 311-H1, para mejorar su eficiencia en la refinería Iquitos-PETROPERU. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad del Centro en Perú.

VII. Anexos

Anexo 1 Propiedades del aire.

Anexo 2 Calculo de la tarifa aplicada de gas natural.

Anexo 3 Balance de energía sin precalentamiento de carga.

Anexo 4 Factores de emisiones equivalentes.

Anexo 5 Corte transversal del sistema de precalentamiento de carga.

Anexo 6 Layout de planta

Anexo 1 Propiedades del aire.

AIRE

Temperatur: °K	Densidad ρ (Kg/m ³)	Calor especifico c_p kJ/Kg°C	Visc. dinám. $\eta \cdot 10^5$ (Kg/m.seg)	Visc. cinem. $\nu \cdot 10^6$ (m ² /seg)	Conductiv. térmica "k" W/m°C	Dif. térmica $\alpha \cdot 10^4$ (m ² /seg)	Nº de Prandt Pr
100	3,6010	1,027	0,692	1,92	0,0092	0,0250	0,770
150	2,3675	1,010	1,028	4,34	0,0137	0,0575	0,753
200	1,7684	1,006	1,329	7,49	0,0181	0,1017	0,739
250	1,4128	1,005	1,488	10,53	0,0223	0,1316	0,722
300	1,1774	1,006	1,983	16,84	0,0262	0,2216	0,708
350	0,9980	1,009	2,075	20,76	0,0300	0,2983	0,697
400	0,8826	1,014	2,286	25,90	0,0336	0,3760	0,689
450	0,7833	1,021	2,484	31,71	0,0371	0,4222	0,683
500	0,7048	1,030	2,671	37,90	0,0404	0,5564	0,680
550	0,6423	1,039	2,848	44,34	0,0436	0,6532	0,680
600	0,5879	1,055	3,018	51,34	0,0466	0,7512	0,680
650	0,5430	1,063	3,177	58,51	0,0495	0,8578	0,682
700	0,5030	1,075	3,332	66,25	0,0523	0,9672	0,684
750	0,4709	1,086	3,481	73,91	0,0551	1,0774	0,686
800	0,4405	1,098	3,625	82,29	0,0578	1,1981	0,689
850	0,4149	1,109	3,765	90,75	0,0603	1,3097	0,692
900	0,3925	1,121	3,899	99,30	0,0628	1,4271	0,696
950	0,3716	1,132	4,023	108,20	0,0653	1,5510	0,699
1000	0,3524	1,142	4,152	117,80	0,0675	1,6779	0,702
1100	0,3204	1,160	4,440	138,60	0,0732	1,9690	0,704
1200	0,2947	1,179	4,690	159,10	0,0782	2,2510	0,707
1300	0,2707	1,197	4,930	182,10	0,0837	2,5830	0,705
1400	0,2515	1,214	5,170	205,50	0,0891	2,9200	0,705
1500	0,2355	1,230	5,400	229,10	0,0946	3,2620	0,705
1600	0,2211	1,248	5,630	254,50	0,1000	3,6090	0,705
1700	0,2082	1,267	5,850	280,50	0,1050	3,9770	0,705
1800	0,1970	1,287	6,070	308,10	0,1110	4,3790	0,704
1900	0,1858	1,309	6,290	338,50	0,1170	4,8110	0,704
2000	0,1762	1,338	6,500	369,00	0,1240	5,2600	0,702
2100	0,1682	1,372	6,720	399,60	0,1310	5,7150	0,700
2200	0,1602	1,419	6,930	432,60	0,1390	6,1200	0,707
2300	0,1538	1,482	7,140	464,00	0,1490	6,5400	0,710
2400	0,1458	1,574	7,350	504,00	0,1610	7,0200	0,718
2500	0,1394	1,688	7,570	543,50	0,1750	7,4410	0,730

Fuente : <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla10.pdf>

Anexo 2 Calculo de la tarifa aplicada de gas natural.

Consumidor Industrial 2 -Consumo más de 280 000 Sm³/mes

Categoría Tarifaria VII

Cálculo de la Tarifa de Gas Natural

Para los cálculos tarifarios realizados para el mes de octubre 2021 haciendo uso de las ecuaciones 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

Asimismo, se tienen los siguientes costos unitarios del gas natural para Chimbote del mes octubre 2021.

Costo unitario GNL= 0,76832 S/. /m³

Costo unitario Recargo FISE = 0,00794 S/. /m³

Costo unitario transporte virtual= 0,32596 S/. /m³

Costo unitario margen de distribución = 0,07901 S/. /m³

Margen de capacidad= 6,22176 S/./m³/día

Costo unitario GN = 1,18123 S/. /m³

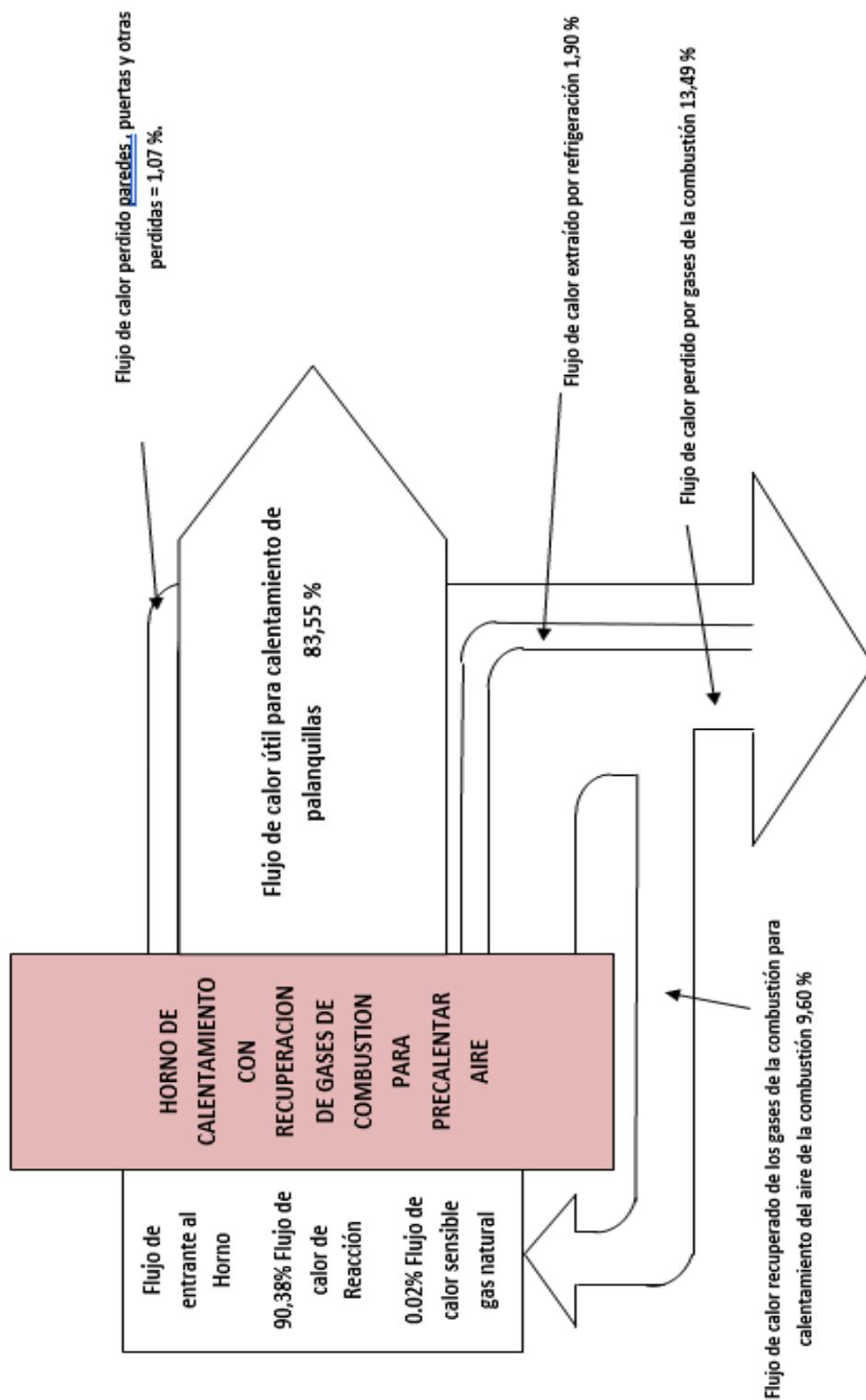
$$\text{Costo GN} = 1,18123 \left(\frac{\text{S/}}{\text{m}^3} \right) * 1\,900 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \right) = 2\,244 \frac{\text{S/}}{\text{mes}}$$

$$\text{Costo GN} = 559,68 \left(\frac{\text{U\$}}{\text{mes}} \right)$$

PLIEGO TARIFARIO GAS NATURAL FACTOR K=0.9123 CONCESION NORTE									
Vigente desde 1 de Octubre 2021									
CATEGORÍAS TARIFARIAS	RANGOS		SUMINISTRO GNL (1)		TRANSPORTE VIRTUAL (2)	DISTRIBUCION POR DUCTOS (3)			
	Desde	Hasta	PRECIO GNL S/. /sm ³	RECARGO FISE S/. /sm ³		S/. /sm ³	MARGEN COMERCIAL S/. /cliente	MARGEN PROMOCION S/. /cliente	MARGEN CAPACIDAD S/. /(m ³ /día)
I	0	100	0.71382	0.00794	0.57698	1.84563	15.93951	0.00000	0.23192
IIA	101	300	0.71382	0.00794	0.57698	66.07631	0.00000	0.00000	0.95058
IIB	301	1000	0.76832	0.00794	0.57698	66.07631	0.00000	0.00000	0.95058
III	1001	5000	0.76832	0.00794	0.57698	249.38668	0.00000	0.00000	0.91803
IV	5001	38000	0.76832	0.00794	0.57698	0.00000	0.00000	8.76673	0.42519
V	38001	143000	0.76832	0.00794	0.57698	0.00000	0.00000	8.76673	0.42519
VI	143001	280000	0.76832	0.00794	0.42353	0.00000	0.00000	8.76673	0.22305
VII	280001	Más	0.76832	0.00794	0.32596	0.00000	0.00000	6.22175	0.07901
GNV	-	-	0.76832	0.00794	0.57698	0.00000	0.00000	0.95726	0.01531
PESCA	-	-	0.76832	0.00794	0.57698	0.00000	0.00000	0.00000	0.71342



Anexo 3 Balance de energía sin precalentamiento de carga.



Anexo 4 Factores de emisiones equivalentes.

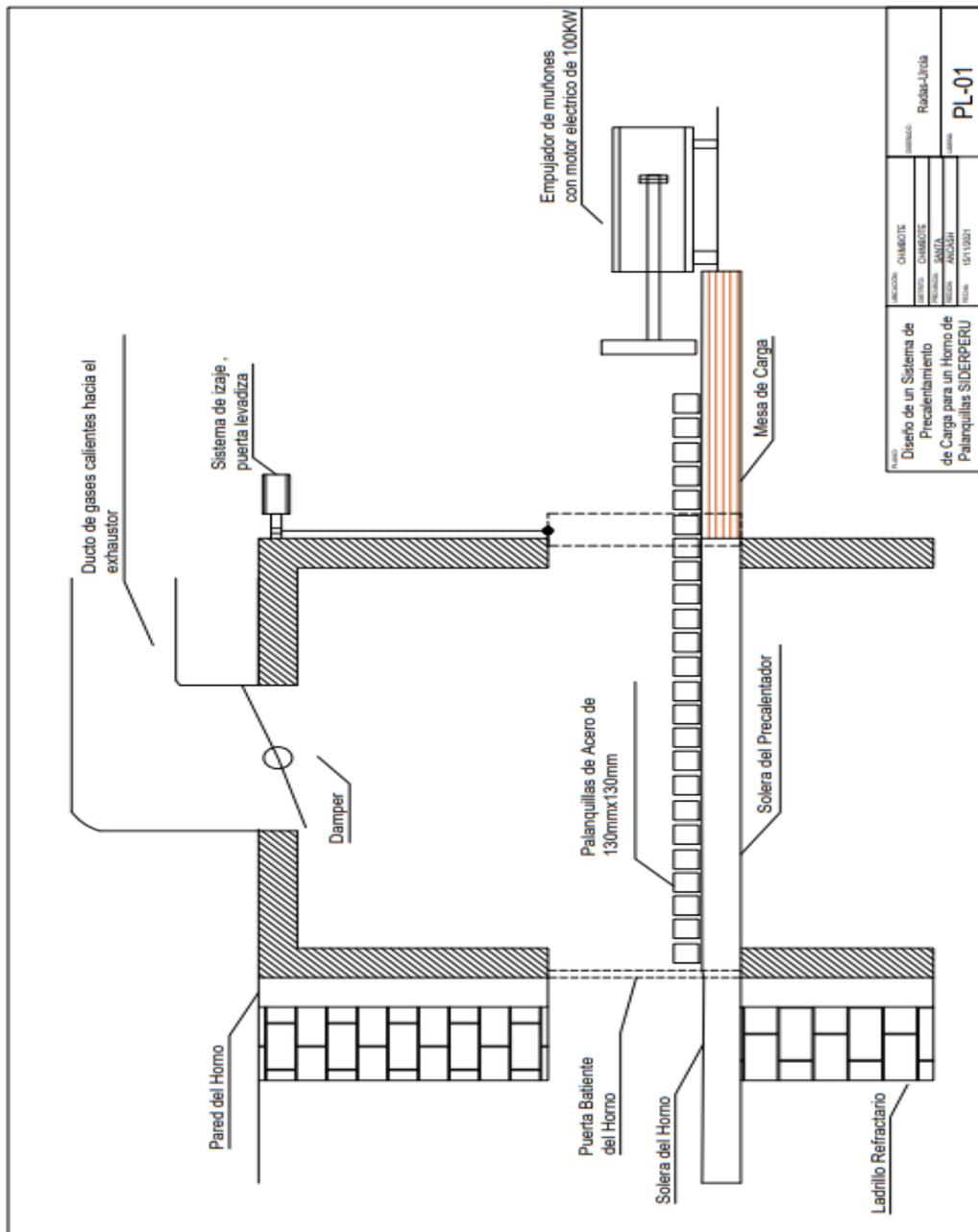
CUADRO 2.2

FACTORES DE EMISIÓN POR DEFECTO PARA LA COMBUSTIÓN ESTACIONARIA EN LAS INDUSTRIAS ENERGÉTICAS
(kg de gas de efecto invernadero por T.J sobre una base calórica neta)

Combustible	CO ₂				CH ₄				N ₂ O			
	FE por defecto (kgCO ₂ /T.J)	Inferior	Superior	FE por defecto (kgCH ₄ /T.J)	Inferior	Superior	FE por defecto (kgN ₂ O/T.J)	Inferior	Superior			
Petróleo crudo	73.300	71.000	75.500	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Gas Natural Licuado	64.200	58.300	70.400	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Gasolina para motores	69.300	67.500	73.000	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Gasolina para la aviación	70.000	67.500	73.000	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Gasolina para motor a reacción	70.000	67.500	73.000	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Gas/Diesel Oil	74.100,00	72.600,00	74.800,00	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Fuelóleo residual	77.400	75.500	78.800	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Gases licuados de petróleo	63.100	61.600	65.600	1,00	0,30	3,00	0,10	0,03	0,30			
Lubricantes	73.300	71.900	75.200	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Gas de refinería	57.600	48.200	69.000	1,00	0,30	3,00	0,10	0,03	0,30			
Ceras de parafina	73.300	72.200	74.400	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Espiritu blanco y SBP	73.300	72.200	74.400	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Otros productos del petróleo	73.300	72.200	74.400	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Antracita	98.300	94.600	101.000	1,00	0,30	3,00	1,50	0,50	5,00			
Carbón de coque	94.600	87.300	101.000	1,00	0,30	3,00	1,50	0,50	5,00			
Gas natural	56.100	54.300	58.300	1,00	0,30	3,00	0,10	0,03	0,30			
Biogasolina	70.800	59.600	84.300	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Biodiésel	70.800	59.600	84.300	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Otros biocombustibles líquidos	79.600	67.100	95.300	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			
Otra biomasa sólida primaria	100.000	84.700	117.000	30,00	10,00	100,00	4,00	1,50	15,00			
Madera/Desechos de madera	112.000	95.000	132.000	300,00	100,00	900,00	4,00	1,50	15,00			
Carbón vegetal	112.000	95.000	132.000	200,00	70,00	600,00	4,00	1,50	15,00			
Gas de vertedero	54.600	46.200	66.000	1,00	0,30	3,00	0,10	0,03	0,30			
Kerosene	71.900	70.800	73.700	3,00	1,00	10,00	0,60	0,20	2,00			

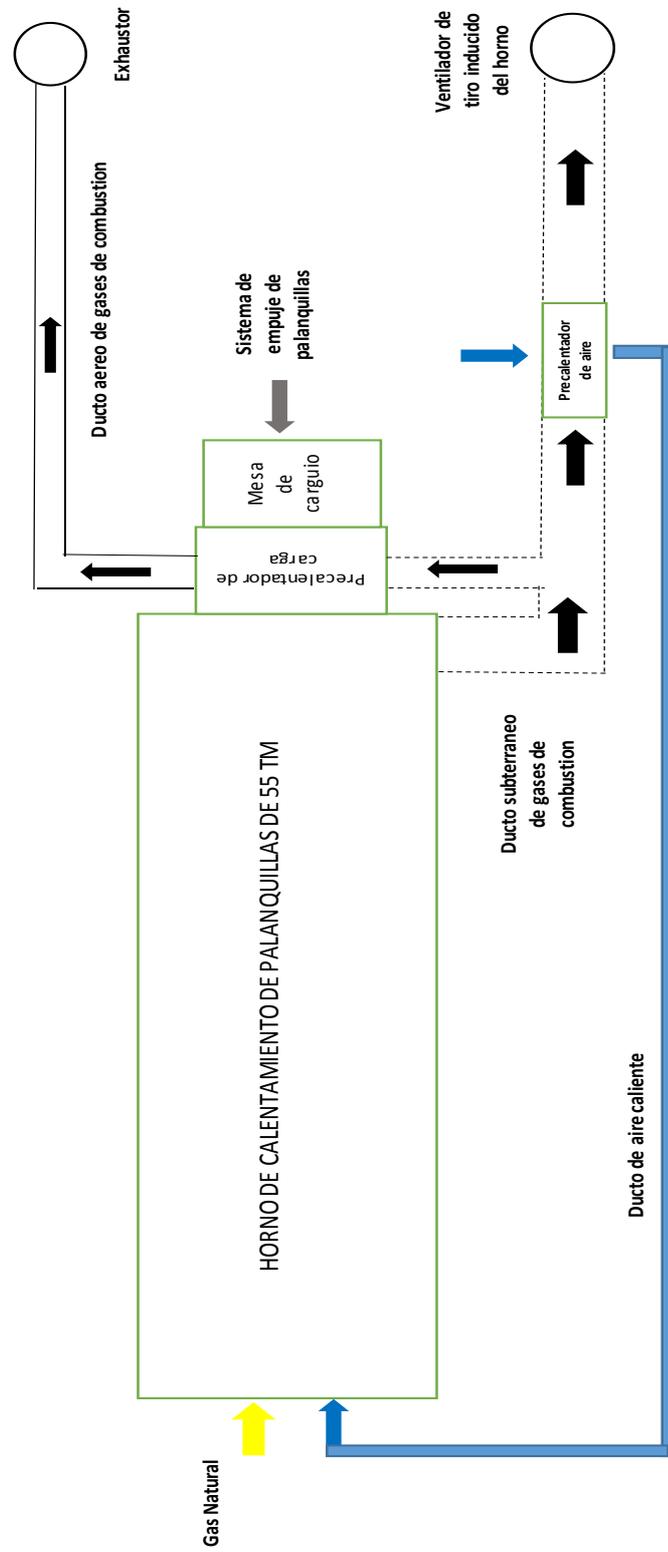
Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - Volumen 2: Energía, pág. 2.16 - 2.17

Anexo 5 Corte transversal del sistema de precalentamiento de carga.



TÍTULO Diseño de un Sistema de Precalentamiento de Carga para un Horno de Palanquillas SIDERPERU		FECHA 15/11/2021	
APROBADO CHAMBERS	DISEÑADO RADAR-LIJOA	REVISADO RADAR-LIJOA	CARGA PL-01

Anexo 6 Layout de planta





DECLARACION JURADA DE AUTORÍA

Yo, Radas Goicochea Anny Judith, Bachiller de la

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Escuela Profesional:	Ingeniería en Energía					
Departamento Académico:						
Escuela de Posgrado	Maestría			Doctorado		

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación es un **trabajo inédito**, intitulado:

EFFECTO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE CARGA EN LOS INDICADORES ENERGETICOS DEL HORNO DE PALANQUILLAS DE LA EMPRESA SIDERPERU

presentado en ...103..... folios, para la obtención del Grado académico: ()

Título profesional: (X) Investigación anual: ()

- He citado todas las fuentes empleadas, no he utilizado otra fuente distinta a las declaradas en el presente trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido presentado con anterioridad ni completa ni parcialmente para la obtención de grado académico o título profesional.
- Comprendo que el trabajo de investigación será público y por lo tanto sujeto a ser revisado electrónicamente para la detección de plagio por el VRIN.
- De encontrarse uso de material intelectual sin el reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el proceso disciplinario.

Chimbote, enero de 2022

Firma:

Nombres y Apellidos: Radas Goicochea Anny Judith

DNI: 72788777



DECLARACION JURADA DE AUTORÍA

Yo, Urcia Solorzano Eliana Tamara, Bachiller de la

Facultad:	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Escuela Profesional:	Ingeniería en Energía					
Departamento Académico:						
Escuela de Posgrado	Maestría			Doctorado		

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa; Declaro que el trabajo de investigación es un **trabajo inédito**, intitulado:

EFFECTO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE CARGA EN LOS INDICADORES ENERGETICOS DEL HORNO DE PALANQUILLAS DE LA EMPRESA SIDERPERU

presentado en ...103..... folios, para la obtención del Grado académico: ()

Título profesional: (X) Investigación anual: ()

- He citado todas las fuentes empleadas, no he utilizado otra fuente distinta a las declaradas en el presente trabajo.
- Este trabajo de investigación no ha sido presentado con anterioridad ni completa ni parcialmente para la obtención de grado académico o título profesional.
- Comprendo que el trabajo de investigación será público y por lo tanto sujeto a ser revisado electrónicamente para la detección de plagio por el VRIN.
- De encontrarse uso de material intelectual sin el reconocimiento de su fuente o autor, me someto a las sanciones que determinan el proceso disciplinario.

Chimbote, enero del 2022

Firma:

Nombres y Apellidos: Urcia Solorzano Eliana Tamara

DNI: 76288745

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería en Energía

Informe del Asesor Informe de Tesis para obtener el título profesional

- 1) Apellidos/Nombres: Radas Goicochea Anny Judith.
Urcia Solorzano Eliana Tamara.
- 2) Título de la Tesis: Efecto de un Sistema de Pre calentamiento de carga en los Indicadores Energéticos del Horno de Palanquillas de la Empresa SIDERPERU.
- 3) Evaluación del Contenido: La presente tesis para título reúne las condiciones metodológicas de la investigación científica y está en conformidad con los Artículos N° 39 y 40 del Reglamento General de Grados y Títulos vigente de la Universidad Nacional del Santa, concluyéndose que el tesista ha elaborado el presente informe dentro de las líneas de investigación que promueve la E.P.I.E _____
- 4) Observaciones _____ Ninguna _____
- 5) Certificación de Aprobación: En calidad de asesor certifico la aprobación de la tesis para título.

Fecha: Nuevo Chimbote, enero del 2022.



Ing. Carlos Macedonio Montañez Montenegro
Asesor



ACTA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, Carlos Macedonio Montañez Montenegro
asesor / presidente de la Unidad de Investigación de la

Facultad	Ciencias		Educación		Ingeniería	X
Departamento Académico						
Escuela de Posgrado	Maestría		Doctorado			

Programa:

De la Universidad Nacional del Santa. Asesor / Unidad de Investigación revisora del trabajo de Investigación intitulado:

EFFECTO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE CARGA EN LOS
INDICADORES ENERGETICOS DEL HORNO DE PALANQUILLAS DE LA EMPRESA
SIDERPERU

Del estudiante / docente:

Radas Goicochea Anny Judith
Urcia Solorzano Eliana Tamara

De la escuela / departamento académico: Ingeniería en Energía

Constato que la investigación presentada tiene un porcentaje de similitud del 25 % el cual se verifica con el reporte de originalidad de la aplicación Turnitin adjunto.

Quién suscribe la presente, declaro el haber analizado dicho reporte y concluyo que las coincidencias detectadas no se conforman como plagio. A mi claro saber y entender, la investigación cumple con las normas de citas y referencias establecidas por la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, enero de 2022

Firma:

Nombres y Apellidos del Asesor/Presidente UIF: Carlos Macedonio Montañez Montenegro

DNI: 42451038

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

7%

2

intranet.cip.org.pe

Fuente de Internet

2%

3

docplayer.es

Fuente de Internet

1%

4

scioteca.caf.com

Fuente de Internet

1%

5

dspace.esPOCH.edu.ec

Fuente de Internet

1%

6

www.doccity.com

Fuente de Internet

1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado