

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**DISEÑO DE UN HORNO CON INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA
UN SISTEMA DE SECADO DE GRANOS UTILIZANDO LA
CASCARILLA DE ARROZ COMO MATERIA PRIMA EN EL MOLINO
"EL MISTI"**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

AUTOR

GABRIEL JOSIAS DEL VALLE SEQUEIROS

ASESOR

AMADO AGUINAGA PAZ

<https://orcid.org/0000-0003-0330-6825>

Chiclayo, 2020

**DISEÑO DE UN HORNO CON INTERCAMBIADOR DE CALOR
PARA UN SISTEMA DE SECADO DE GRANOS UTILIZANDO
LA CASCARILLA DE ARROZ COMO MATERIA PRIMA EN EL
MOLINO "EL MISTI"**

PRESENTADA POR:

GABRIEL JOSIAS DEL VALLE SEQUEIROS

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR:

Jony Villalobos Cabrera

PRESIDENTE

Juan Carlos Vives Garnique

SECRETARIO

Amado Aguinaga Paz

VOCAL

DEDICATORIA

La Presente Tesis está dedicada a mi Padre, Angel Reymundo Del Valle Aquire y a mi Madre Valentina Sequeiros Hinojosa, quienes siempre me han dado su apoyo y crianza excepcional en todos los años de mi vida

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la universidad y a los profesores por sus enseñanzas y consejos inigualables. A sí mismo un agradecimiento especial a mi Asesor Amado Aguinaga Paz por su paciencia y Sabiduría entregada.

ÍNDICE

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. OBJETIVOS.....	13
1.1.1. Objetivo General.....	13
1.1.2. Objetivos específicos.....	13
1.2. Justificación	14
II. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Estado del Arte	15
2.1.1. Productos Similares Existentes	15
2.1.2. Problemática de los problemas existentes.....	16
2.1.3. Planteamiento del Problema.....	16
2.1.4. Requerimientos del diseño	16
2.2. Bases teóricas científicas.....	17
2.2.1. Combustión	17
2.2.2. Tecnología de la combustión para la industria	20
2.2.3. Ecuaciones Termodinámicas de la Combustión	26
2.2.4. Características de la ceniza de biomasa.....	26
2.2.5. Aspectos medio ambientales de la combustión de biomasa	28
2.2.6. Reacción Química	31
2.2.7. Partículas Sólidas.....	31
2.2.8. Transferencia de Calor	33
2.2.9. Intercambiadores de calor	35
III. MATERIALES Y MÉTODOS	39
3.1. Metodología	39
3.2. Recolección de datos.....	43
3.2.1. Datos del Molino “El Misti”	43
3.2.2. Resumen de información de la cascarilla de arroz a utilizar	52
3.3. Definir las características de la cascarilla de arroz.....	52
3.3.1. Características Físicas	53

3.3.2.	Densidad	53
3.3.3.	Conductividad Térmica	54
3.3.4.	Análisis Próximo	54
3.3.5.	Valor de Calentamiento Inferior (LHV) y Valor de calentamiento Superior (HHV)	55
3.3.6.	Análisis Elemental de la cascarilla de arroz	57
3.3.7.	Cantidad de Cascarilla de arroz disponible	58
3.4.	Cálculos de flujos y composiciones de la combustión	59
3.4.1.	Oxígeno Necesario	60
3.4.2.	Nitrógeno necesario	60
3.4.3.	Aire necesario	60
3.4.4.	Gases de combustión	60
3.4.5.	Masa de las especies de los gases de combustión	61
3.4.6.	Fracciones de masa de los gases de la combustión	62
3.4.7.	Fracción volumétrica de los gases de la combustión	63
3.4.8.	Masa molecular de los gases de combustión	65
3.4.9.	Densidad del aire.....	65
3.4.10.	Flujo másico del aire.....	66
3.4.11.	Flujo volumétrico del aire.....	66
3.4.12.	Caudal del aire	66
3.4.13.	Temperatura Adiabática de la llama	67
3.4.14.	Densidad de los gases de combustión	67
3.4.15.	Flujo másico de los gases de combustión.....	68
3.4.16.	Capacidad calorífica de los gases de combustión	68
3.4.17.	Viscosidad Absoluta de los gases de combustión.....	69
3.5.	Potencia del Horno.....	70
3.6.	Selección de Tipo de Horno	70
3.7.	Hidrodinámica en el Lecho.....	72
3.7.1.	Determinación de Tipo de Partícula.....	72
3.7.2.	Número de Arquímedes.....	73
3.7.3.	Número de Reynolds.....	74
3.7.4.	Velocidad Mínima de Fluidización (<i>U_{mf}</i>)	74
3.7.5.	Velocidad Mínima de la Burbuja (<i>U_{mb}</i>).....	75
3.7.6.	Velocidad Terminal de la Partícula de tamaño <i>dp</i>	75

3.7.7.	Velocidad Mínima de Slugging (25°C)	75
3.7.8.	Burbujeo en régimen turbulento.....	76
3.8.	Área de sección transversal del lecho	77
3.9.	Rejilla de distribución de aire	77
3.9.1.	Porosidad o Vacío de la cama del lecho	77
3.9.2.	Caída de presión en la cama del lecho.....	78
3.9.3.	Altura Mínima de Fluidización	78
3.9.4.	Caída de Presión en Plato distribuidor.....	78
3.9.5.	Numero de Orificios	79
3.9.6.	Distancia entre orificios.....	80
3.10.	Altura del lecho fluidizado burbujeante.....	81
3.10.1.	Altura de la cama.....	81
3.10.2.	Altura del francobordo	81
3.11.	Volumen del lecho fluidizado.....	82
3.12.	Tiempo de residencia.....	82
3.13.	Transferencia de Calor en lecho fluidizado burbujeante.....	82
3.13.1.	Coeficiente de transferencia de calor en convección y radiación en el interior del lecho	82
3.13.2.	Refractario y aislamiento	83
3.13.3.	Flujo de Calor del sistema	84
3.13.4.	Temperatura de la pared Exterior	86
3.14.	Diámetro Mínimo de la puerta de Alimentación de combustible	87
3.15.	Selección Conceptual de equipos	87
3.15.1.	Selección de Ventiladores	87
3.15.2.	Selección de Quemador	89
3.16.	Diseño del intercambiador de Calor	89
3.16.1.	Parámetros de diseño y condiciones establecidas.....	90
3.16.2.	Separación transversal (ST) y longitudinal (SL)	90
3.16.3.	Número de Reynolds (Re)	90
3.16.4.	Coeficiente de Convección exterior	91
3.16.5.	Temperatura del gas a la salida del Intercambiador	92
3.16.6.	Temperatura Media Logarítmica.....	94
3.16.7.	Factor de Corrección	94
3.16.8.	Coeficiente de Convección en el interior de los tubos.....	95

3.16.9.	Cálculo de Coeficiente global de Transferencia	97
3.16.10.	Área de Transferencia de Calor	97
3.16.11.	Numero de Tuberías.....	98
3.17.	Identificación y Control de los Parámetros de Operación	98
3.18.	Presupuesto de Materiales e implementos utilizados	100
IV.	RESULTADOS	102
V.	CONCLUSIONES.....	103
VI.	BIBLIOGRAFÍA	104
VII.	ANEXOS	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Producción en kg del año 2012	44
Tabla 2: Producción en kg (cascarilla de arroz diaria) del año 2012.....	45
Tabla 3: Producción en kg del año 2013	46
Tabla 4: Producción en kg (cascarilla de arroz diaria) del año 2013.....	46
Tabla 5: Producción en kg del año 2013	47
Tabla 6: Producción en kg (cascarilla de arroz diaria) del año 2014.....	48
Tabla 7: Producción en kg del año 2015	49
Tabla 8: Producción en kg (cascarilla de arroz diaria) del año 2015.....	49
Tabla 9: Producción en kg del año 2016	50
Tabla 10: Producción en kg (cascarilla de arroz diaria) del año 2016.....	51
Tabla 11: Cantidad de cascarilla de arroz promedio por años en el Molino “El Misti”	52
Tabla 12: Comparación de Materiales con similar conductividad térmica	54
Tabla 13: Análisis Próximo de las características de la cascara de arroz.....	55
Tabla 14: Valor de Calentamiento de distintos combustibles utilizados en la industria.....	57
Tabla 15: Análisis Elemental de la cascarilla de arroz	57
Tabla 16: Porcentaje de Residuos de arroz	58
Tabla 17: Cuadro Comparativo de arroz cascara mensual y diaria	58
Tabla 18: Análisis Elemental de la cascarilla de arroz con ceniza.....	59
Tabla 19: Análisis Elemental de la cascarilla de arroz sin ceniza.....	59
Tabla 20: Resultados LHV y relación de Gases/Combustible	61
Tabla 21. Constantes para la capacidad calorífica	68
Tabla 22. Calor Especifico a 850°C	69
Tabla 23: Viscosidad de los Componentes a 850°C	70
Tabla 24: Ventajas y Desventajas de los principales Tipos de hornos	71
Tabla 25: Características físicas de la arena de rio.....	72
Tabla 26: Características químicas de los gases a diferentes temperaturas	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composición elemental del aire	18
Figura 2: Proceso de combustión	19
Figura 3: Proceso de combustión en kg.....	19
Figura 4: Principales Tecnologías para la combustión de biomasa.....	21
Figura 5: Horno Moderno de parrilla móvil inclinada con sistema de control infrarrojo	22
Figura 6: Diagrama de un Horno de Parrilla Móvil Horizontal.....	22
Figura 7: Parrilla Móvil Inclinada	23
Figura 8: Horno de LFB	24
Figura 9: Horno de LFR	24
Figura 10: Horno de Combustion pulverizada de Combustible	25
Figura 11. Clasificación en polvo de Sólidos Granulares	32
Figura 12. Fuerzas que actúan sobre una partícula suspendida en un gas ascendente.	33
Figura 13: Pared estacionaria y componentes de la conducción.....	34
Figura 14: Configuraciones de intercambiadores de calor sencillo de una sola pasada. a) contraflujo, b) flujo paralelo, c) flujo cruzado	36
Figura 15: Ejemplos de configuraciones de intercambiadores compactos de calor.....	37
Figura 16: Diagrama Esquemático de un intercambiador de calor de coraza y tubo	37
Figura 17: Diagrama de Flujo del Diseño del Horno con intercambiador de Calor	41
Figura 18: Esquema de los componentes del diseño	42
Figura 19: Ubicación Satelital del Molino “El Misti”	44
Figura 20: Diagrama de producción mensual en kg del año 2012	45
Figura 21: Diagrama de producción mensual en kg del año 2013	47
Figura 22: Diagrama de producción mensual en kg del año 2014	48
Figura 23: Diagrama de producción mensual en kg del año 2015	50
Figura 24: Diagrama de producción mensual en kg del año 2016	51
Figura 25: Características de la cascarilla de Arroz	53
Figura 26: Diagrama tipo de Partícula	73
Figura 27: Platillo distribuidor de Aire diseñado	81
Figura 28: Radios y materiales en el flujo de calor del sistema del horno	84
Figura 29. Cuadro de constantes para Reynolds	85
Figura 30. Grafica del factor de corrección	94
Figura 31. Diagrama del Sistema y ubicación de los parámetros de operación	98

RESUMEN

En la presente investigación se diseñó un horno con intercambiador de calor utilizando la cascarilla de arroz como combustible en el Molino “El Misti”, usando eficientes tecnologías de la combustión como el lecho fluidizado burbujeante. Este trabajo se tuvo como propósito la generación de energía calorífica para un sistema de secado, evitando la contaminación del grano de arroz por los gases de la combustión y brindando la temperatura adecuada para el secado.

Para elaborar este proyecto se recolectó información de la producción mensual del pilado del arroz y sus subproductos. Además, se conoció las características físicas y químicas más importantes de la cascarilla de arroz como valores de calentamiento, composición elemental y la cantidad disponible de cascarilla de arroz para su posterior combustión en el horno.

Por consiguiente, se determinó los parámetros de combustión y transferencia de calor con una cantidad prevista de cascarilla de arroz. También, se determinó los parámetros de hidrodinámica de lecho correspondiente al tipo de horno seleccionado. Luego, se seleccionó los materiales e implementos correspondientes para una combustión eficiente a base de lecho fluidizado y para el intercambiador de calor.

Por último, se realizó un presupuesto de elaboración del horno con su respectiva determinación de viabilidad económica.

Palabras clave: Intercambiador de calor, lecho fluidizado burbujeante, cascarilla de arroz, parámetros de combustión y transferencia de calor.

ABSTRACT

In the present investigation a furnace with heat exchanger was designed using the rice husk as fuel in the “Molino El Misti”, using efficient combustion technologies such as the bubbling fluidized bed. The purpose of this work was to generate heat energy for a drying system, avoiding contamination of the rice grain by combustion gases and providing the proper temperature for drying.

To prepare this project, information was collected on the monthly production of the rice pile and its by-products. In addition, the most important physical and chemical characteristics of the rice husk were known as heating values, elemental composition and the amount of rice husk available for subsequent combustion in the oven.

Accordingly, the combustion and heat transfer parameters were determined with an expected amount of rice husk. Also, the bed hydrodynamics parameters corresponding to the type of furnace selected were determined. Then, the corresponding materials and implements were selected for efficient combustion based on a fluidized bed and for the heat exchanger.

Finally, a budget for the preparation of the oven was made with its respective determination of economic viability

Keywords: heat exchanger, bubbling fluidized bed, rice husk, combustion and heat transfer parameters.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la producción de arroz y su procesamiento como producto final es un índice muy alto en la Región Lambayeque, por el cual está en crecimiento constante y una mayor exigencia de parte del consumidor. Por consiguiente, se han inventado maquinarias para la mejora de rendimiento, disminución del quebrado y apariencia del arroz blanco. Uno de ellos son el sistema de secado, que disminuye considerablemente el terreno a usar, el porcentaje de quebrado y la disminución de costos de personal. Por otro lado, la energía para lograr un secado uniforme se obtiene del residuo de producción llamado cascarilla de Arroz; este residuo es muy abundante en la región y muchas veces es desperdiciado contaminando el medio ambiente.

El problema específico del uso del sistema de secado es la conservación de la apariencia física, el olor natural y la disminución notoria del quebrado al momento de terminar el proceso. La mayoría de estos sistemas poseen una alimentación de aire caliente directo desde la combustión en el horno hasta la transferencia del aire caliente hacia la secadora. Sin embargo, se planea implementar en este proyecto un intercambiador de calor en la estructura del horno para lograr un intercambio indirecto de aire caliente y energía calorífica hacia la secadora, aprovechando toda la biomasa de cascarilla de arroz disponible. Además de su correcta implementación de chimenea, aspirador de aire y ciclón

Con la futura implementación de este Horno con intercambiador de calor, el grano de arroz y el arroz blanco conservara todas sus características exigidas por el consumidor. Por lo tanto, el molino aumentara su producción en el proceso de pilado y una mayor atracción de clientes en la venta.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Diseñar un horno con intercambiador de calor para un sistema de secado de granos utilizando la cascarilla de arroz como materia prima en el molino “El Misti”.

1.1.2. Objetivos específicos

- Recopilar los datos sobre de producción diaria de cascarilla de arroz en el Molino “El Misti”.
- Determinar las características físicas, químicas y geométricas de la cascarilla de arroz: Valor de Calentamiento Inferior, Valor de Calentamiento Superior, Humedad, Composición Química.
- Determinar los parámetros de combustión, hidrodinámica del lecho y transferencia de calor.
- Dimensionar y Seleccionar materiales o accesorios adecuados al proceso de combustión mediante lecho fluidizado e intercambio de calor.
- Determinar la viabilidad económica utilizando VAN y TIR.

1.2. Justificación

Hoy en día, el ser humano tiene como objetivo el ahorro energético y cuidado del medio ambiente, debido a los constantes cambios climáticos ocurridos al planeta y al rápido avance tecnológico que conlleva a la necesidad de energía sustentable.

Es por ello, que en la región Lambayeque, la cascarilla de arroz se convierte en una opción de combustible atrayente, ya que es un residuo muy abundante en la región y que posee un valor de calentamiento considerable para la obtención de energía.

Por otro lado, en la industria molinera, la necesidad de mejorar cada día más su producción y calidad, ha optado por recurrir a mejores mecanismos de secado. Por lo cual, el control de humedad es muy fundamental en el pilado del arroz. Sin embargo, las tecnologías típicas de secado carecen de estándar de calidad del grano debido al suministro de aire caliente directo. En consecuencia, la mezcla del arroz en cascara y los gases de combustión provocan un olor anormal y un rendimiento bajo al momento del pilado.

En consecuencia, se elaborará un mecanismo de generación de energía calorífica llamado horno, considerando la cascarilla de arroz disponible en el molino el Misti y un suministro de aire indirecto, libre de gases de combustión, a través de un intercambiador de calor adecuados a la temperatura requerida por la secadora.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del Arte

2.1.1. Productos Similares Existentes

A. Tema 1: Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando la cascarilla de arroz producido por las molineras de arroz de la región Lambayeque. [1]

Autor: Juan Aderlyn Leyva Sánchez

Año: 2015 – Universidad Santo Toribio de Mogrovejo

- La región Lambayeque posee un ingreso de arroz cascara de 9 822 Tn/año a 35 623 Tn/año aproximadamente, considerando la evaluación de producción de 10 piladoras de arroz.
- Las características más importantes de la cascarilla de arroz son poder calorífico inferior (14 311,30 kJ/Kg) , poder calorífico superior (15 861,80 kJ/Kg) y su composición química correspondiente es: Carbono (37,6%), Hidrogeno (%), Nitrógeno (1,88%), Azufre (0,09%) , Oxigeno (37,63%) y Ceniza(16,93%).

B. Tema 2: Diseño de un Horno ecológico para el secado de granos de café Perales Huancaruna S.A.C

Autor: Jorge Eduardo Grandez Villalobos

Año: 2015 – Universidad Pedro Ruiz Gallo

- Los altos niveles de minerales en la cascarilla de café ocasionan potenciales problemas de incrustaciones en las superficies internas del Horno y el intercambiador de Calor.

- La optimización de los parámetros de Temperatura, relación aire/combustible, proporción de exceso de aire y tiempo de residencia, garantiza una combustión completa y la carencia en inconvenientes de inquemados.

2.1.2. Problemática de los problemas existentes

- A.** La implementación de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de biomasa resulto ser un proyecto de gran viabilidad en los costos de energía eléctrica para la molinera y reducción de estas. A su vez, apporto considerablemente al cuidado del medio ambiente, evitando la quema desmedida y la producción de la sílice como contaminante.
- B.** El trabajar con cantidades altas de exceso de aire, se debe tener en cuenta medidas de reducción de emisiones secundarias para reducir los niveles de contaminación de los óxidos de nitrógeno.

2.1.3. Planteamiento del Problema

¿Cuál será la configuración geométrica y física de un horno con intercambiador de calor para un sistema de secado de granos utilizando la cascarilla de arroz como materia prima?

2.1.4. Requerimientos del diseño

Los requerimientos necesarios para este diseño son:

- Cantidad de arroz cascara y cascarilla de arroz disponible en el Molino “El Misti”, cuya capacidad es de 72 ton/día.
- Valorización de los componentes de la cascarilla de arroz.
- Definir y calcular los parámetros de combustión.
- Selección de tipo de lecho y selección de materiales.
- Selección de intercambiador de que satisfaga las temperaturas

requeridas por la secadora.

2.2. Bases teóricas científicas

2.2.1. Combustión

La combustión es una reacción química en la que el combustible se oxida y libera una cierta cantidad de energía (exotermia). Por un lado, la mayoría de los combustibles se componen principalmente de hidrógeno y carbono. Por otro lado, el oxidante más utilizado es el oxígeno en el aire (oxidante).[2]

Por tanto, para que se produzca este proceso químico deben confluír cuatro circunstancias:

- Debe existir una cantidad suficiente de combustible, es decir, de biomasa.
- Debe poseer una cantidad suficiente de aire comburente, que contiene el oxígeno necesario para oxidar o reaccionar con el combustible.
- La temperatura debe ser la suficiente como para que se produzca y se mantenga la reacción. Si la temperatura no supera un determinado valor, denominado temperatura de inflamación, comburente y combustible no reaccionan.
- Debe instalarse un iniciador de la combustión, normalmente una llama preexistente. Esto significa que en el encendido del sistema de combustión participan normalmente otros elementos, incluso otros combustibles. [3]

En general una reacción de combustión es en la que interviene un combustible y un oxidante y se libera energía.

- **Combustión Completa:** En esta se exige que haya oxígeno suficiente como para que todo el carbono y todo el hidrógeno del combustible se conviertan en CO_2 y H_2O .
- **Combustión incompleta:** Aparecerán otros productos, siendo el monóxido de carbono (CO) el producto principal.

En la práctica industrial, la combustión de los combustibles se efectúa normalmente

empleando aire como oxidante. Por lo cual se obtiene esta relación: [3]

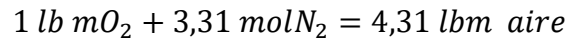
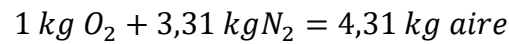
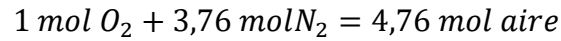
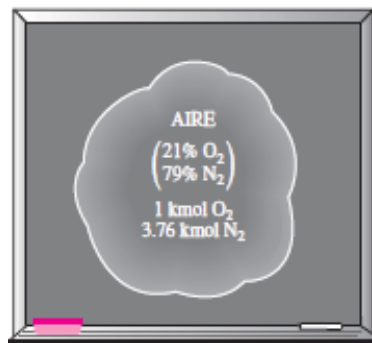


Figura 1: Composición elemental del aire



Fuente: Y. Cengel y M. Boles. Termodinámica. 5ta Edición

Por otro lado, un aspecto básico en un proceso de combustión es la reacción teórica o estequiométrica de un combustible dado. Por definición, la reacción estequiométrica tiene lugar cuando es completa y no hay exceso de oxígeno en los productos de la combustión. Sin embargo, es muy importante conocer la cantidad de aire a utilizar. [3]

Durante un proceso de combustión los componentes que existen antes de la reacción reciben el nombre de reactivos, y los componentes que existen después de la reacción se denominan productos. Considérese, por ejemplo, la combustión de 1 kmol de carbón con 1 kmol de oxígeno puro, que forma dióxido de carbono. [3]

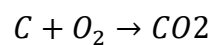
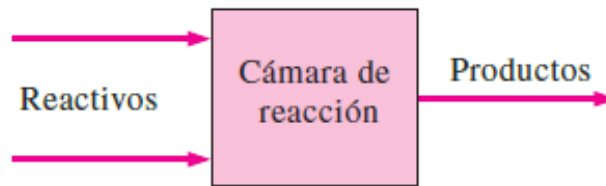


Figura 2: Proceso de combustión



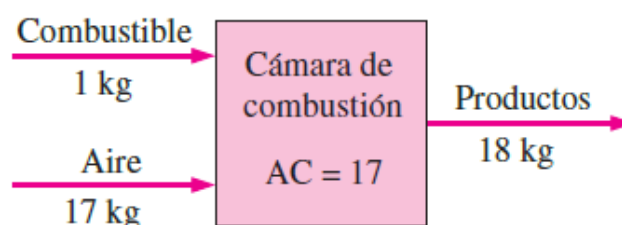
Fuente: Y. Cengel y M. Boles. Termodinámica. 5ta Edición [3]

Cabe mencionar que poner el combustible en estrecho contacto con el oxígeno no es suficiente para comenzar a arder. (De otro modo, el mundo se incendiaría) El combustible debe estar por encima de su temperatura de ignición para comenzar a arder. La temperatura mínima de ignición más baja de varias sustancias en la atmósfera es: gasolina 260 ° C, carbón 400 ° C, hidrógeno 580 ° C, monóxido de carbono 610 ° C y metano 630 ° C. [2] [3]

Una cantidad utilizada frecuentemente en el análisis de procesos de combustión para cuantificar las cantidades las cantidades de combustible y aire es la **relación aire-combustible**, AC. Suele expresarse en una base de masa y se define como la relación entre la masa del aire y la masa de combustible en un proceso de combustión. Es decir, [3]

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}}$$

Figura 3: Proceso de combustión en kg



Fuente: Y. Cengel y M. Boles. Termodinámica. 5ta Edición [3]

La masa m de una sustancia se relaciona con el número de moles N por medio de la relación $m = NM$, donde M es la masa molar.

La relación aire-combustible puede expresarse también en una base molar como la proporción entre el número de moles de aire y el número de moles del combustible. Pero aquí se utilizará la primera definición. El recíproco de la relación aire-combustible se conoce como relación combustible-aire.

Otro punto a determinar es el Punto de rocío, que es la temperatura de saturación correspondiente a la presión parcial del vapor de agua en los productos. [2]

$$p_v = y_v p_m (\text{kpa})$$

2.2.2. Tecnología de la combustión para la industria

Estos hornos son generalmente equipados con sistemas de alimentación de combustible mecánico o neumático.

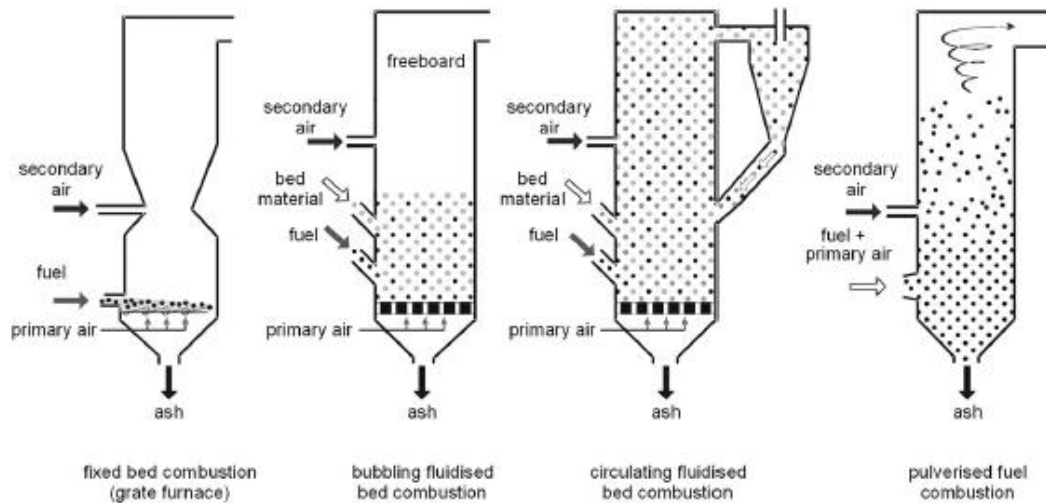
La alimentación manual de combustible no es acostumbrada debido al alto costo del personal y a los estrictos límites de emisión. Por otra parte, las instalaciones modernas de combustión industrial están provistas con sistemas de control de proceso que apoyan el funcionamiento del sistema completamente automático. [4]
[5]

En principio, las tecnologías siguientes de la combustión pueden ser distinguidas:

- Combustión en lecho fijo
- Combustión en lecho fluidizado
- Combustión pulverizada del combustible

Los principios básicos de estas tres tecnologías se demuestran en la figura:

Figura 4: Principales Tecnologías para la combustión de biomasa



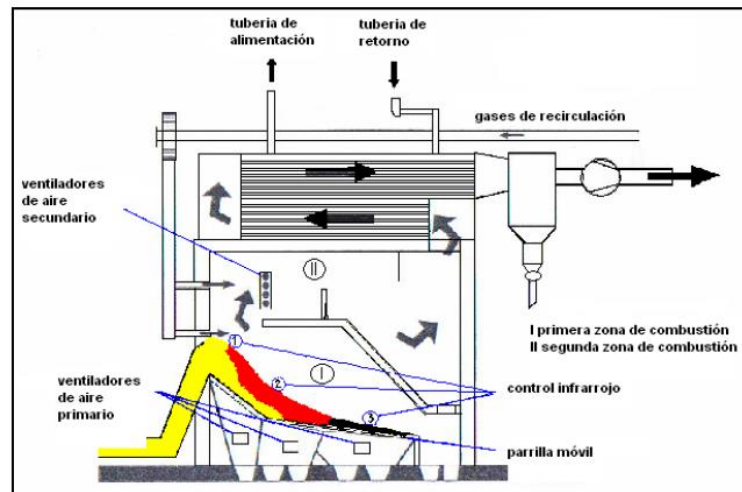
Fuente: S. Van Loo y J. Koppejan, *The Handbook of Biomass and Co-firing*, London: Earthscan, 2008. [4]

Combustión en Lecho Fijo:

El sistema de combustión de lecho fijo incluye un horno de parrilla y un horno de alimentación inferior. El aire primario pasa a través del lecho fijo y, después del secado, se produce la gasificación y la combustión de la biomasa. Después de que se produce el gas secundario, el gas combustible producido normalmente se quema en una zona de combustión separada del lecho de combustible. [4] [5]

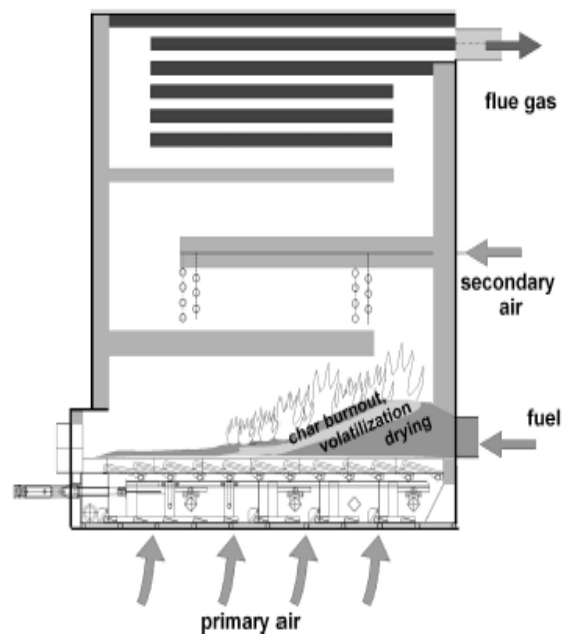
- Hornos de Parrilla:
 1. Parrillas Transportadoras
 2. Sistemas de Parrillas Fijas
 3. Parrillas móviles inclinadas.
 4. Parrillas móviles horizontales
 5. Parrillas vibrantes
 6. Quemador de Cigarro
 7. Parrillas giratorias de alimentación por debajo

Figura 5: Horno Moderno de parrilla móvil inclinada con sistema de control infrarrojo



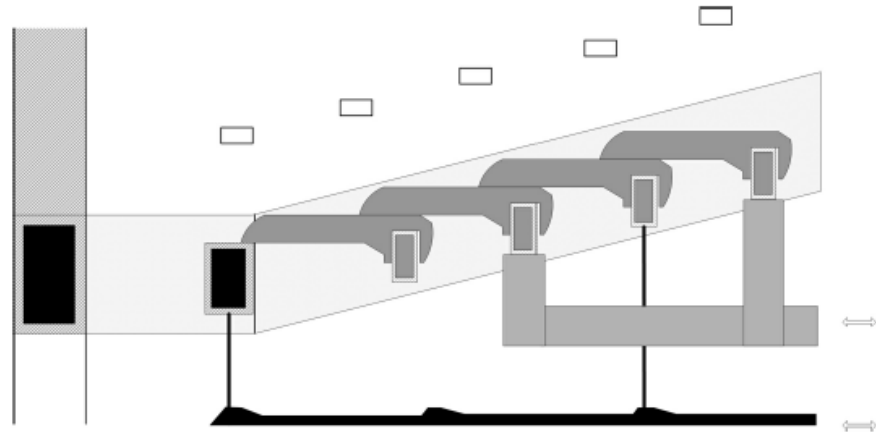
Fuente: S. Van Loo y J. Koppejan, The Handbook of Biomass and Co-firing, London: Earthscan, 2008. [4]

Figura 6: Diagrama de un Horno de Parrilla Móvil Horizontal



Fuente: S. Van Loo y J. Koppejan, The Handbook of Biomass and Co-firing, London: Earthscan, 2008. [4]

Figura 7: Parrilla Móvil Inclínada



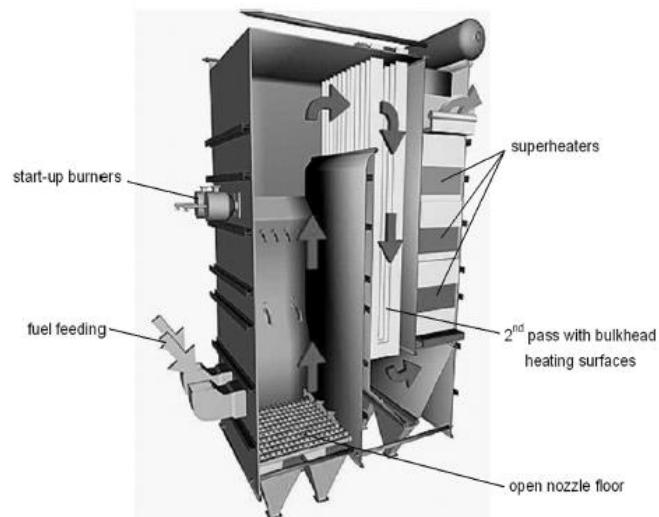
Fuente: S. Van Loo y J. Koppejan, *The Handbook of Biomass and Co-firing*, London: Earthscan, 2008. [4]

Combustión en Lecho Fluidizado

En el horno de lecho fluidizado, el combustible de biomasa se quema en la misma mezcla de gases y la suspensión del lecho de material sólido, y el aire de combustión ingresa a la cámara de combustión desde abajo. Según la tasa de fluidización, se puede distinguir un lecho de burbujas (LFB) y un lecho fluidizado circulante (LFR). [4] [5]

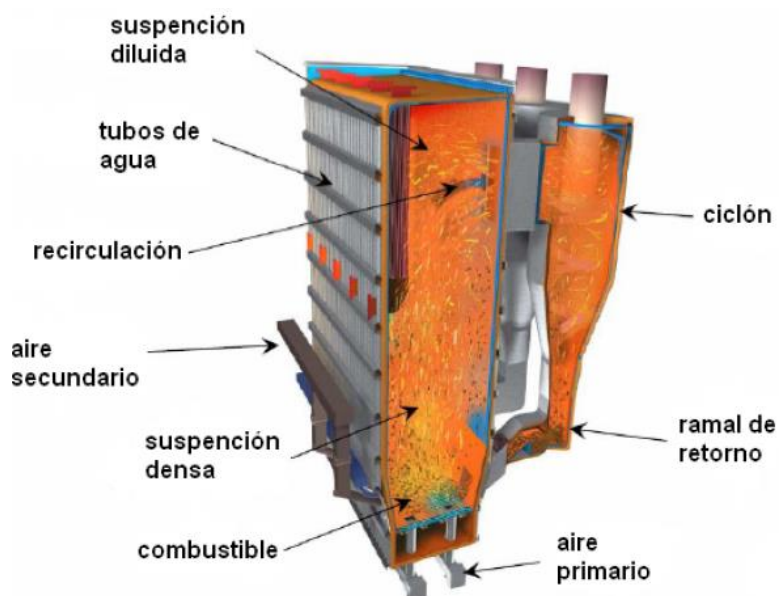
- Combustión en Lecho fluidizado burbujeante (LFB)
- Combustión en Lecho fluidizado de recirculación (LFR)

Figura 8: Horno de LFB



Fuente: S. Van Loo y J. Koppejan, The Handbook of Biomass and Co-firing, London: Earthscan, 2008. [4]

Figura 9: Horno de LFR

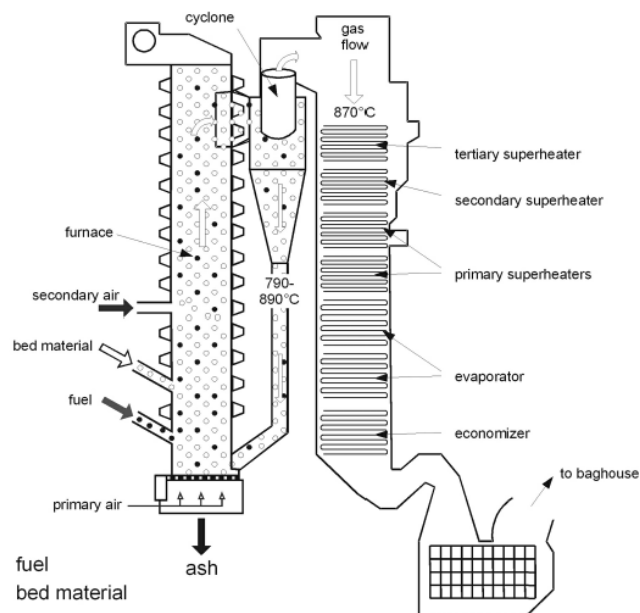


Fuente: Libro Prabir Basu [6]

Combustión pulverizada del combustible

Cuando se dispone de partículas pequeñas (menos de 2 mm de diámetro), la combustión en polvo del combustible es muy conveniente. Primero, se inyecta una mezcla de combustible y aire de combustión en la cámara de combustión. La combustión ocurre cuando el combustible está en suspensión y la combustión del gas se logra después de la adición de aire secundario. Hay variaciones de estas tecnologías disponibles. Un ejemplo es un sistema de combustión con fogoneros de esparcidor y quemadores ciclónicos. [4] [6]

Figura 10: Horno de Combustion pulverizada de Combustible



Fuente: S. Van Loo y J. Koppejan, *The Handbook of Biomass and Co-firing*, London: Earthscan, 2008. [4]

2.2.3. Ecuaciones Termodinámicas de la Combustión

Aunque la combustión de combustibles sólidos es extremadamente compleja, muchos cálculos básicos de ingeniería se pueden realizar fácilmente basándose en el balance de masa y la termodinámica. Estos cálculos se centran en la reacción total de conversión de combustible y la eficiencia térmica que se producen. [7]

Los parámetros importantes son, por ejemplo:

- ✓ El flujo de los humos y su composición.
- ✓ El flujo de aire y la proporción de exceso de aire.
- ✓ El poder calorífico del combustible.
- ✓ Temperaturas de combustión factibles.
- ✓ Eficacia de combustión y eficacia térmica.

2.2.4. Características de la ceniza de biomasa

La extensa literatura técnica sobre la naturaleza y el desempeño de los componentes inorgánicos de los combustibles sólidos se remonta a más de un siglo. Este trabajo se refiere principalmente a las características y comportamiento de las cenizas producidas por la combustión de carbón, lignito y turba, que han sido ampliamente utilizados como combustibles sólidos domésticos e industriales. A lo largo de los años, mediante el uso de combustión y otros equipos de prueba, se han llevado a cabo las últimas actividades de investigación y desarrollo sobre la tecnología de caracterización de cenizas de biomasa para el estudio de combustibles fósiles y la comprensión de las reacciones detalladas de especies inorgánicas en la reacción, combustibles sólidos en combustión y otros procesos de alta temperatura. En términos generales, la mayoría de los materiales inorgánicos en los combustibles sólidos (incluida la biomasa) se pueden dividir en dos categorías: [4] [7]

2.2.4.1. El material inorgánico inherente

Existe como parte de la estructura orgánica del combustible y se asocia más comúnmente con los grupos funcionales oxígeno, azufre y nitrógeno en la estructura orgánica. Estos grupos funcionales pueden proporcionar

sitios adecuados para la asociación química de sustancias inorgánicas en forma de cationes o quelatos. Los materiales de biomasa son a menudo ricos en oxígeno en estos lugares, y la mayoría de los materiales inorgánicos en la mayoría de los combustibles de biomasa existen en esta forma. Por otro lado, ciertas sustancias inorgánicas también pueden existir en la estructura orgánica de ciertos combustibles en forma de partículas extremadamente finas y son componentes esencialmente inherentes al combustible. [4]. [7]

2.2.4.2. El material inorgánico extraño.

El cual se ha agregado al combustible por procesos geológicos o durante la cosecha, la manipulación y el procesamiento del combustible. Los combustibles de la biomasa, por ejemplo, se contaminan comúnmente con el suelo y otros materiales, que han llegado a ser mezclados con el combustible durante la recolección, la manipulación o el almacenaje. [4] [7]

Un listado de las principales especies inorgánicas encontrada en las plantas de generación de alta potencia, y por lo tanto el material inorgánico inherente en la mayoría de los materiales de la biomasa. Los datos en esta tabla proporcionan una descripción global cuantitativa del mayor de los elementos en la biomasa, la tabla está dividida en tres categorías útiles: [4] [7]

- ✓ Soluble en agua, es decir en forma iónica libre.
- ✓ Orgánicamente asociado.
- ✓ Precipitado como compuestos relativamente puros, en formas cristalinas o amorfas.

Está claro que a partir de los datos presentados en el que mucho del material inorgánico inherente en biomasa está bajo la forma de sales inorgánicas simples, y principalmente como los óxidos y los hidróxidos de silicio, y los nitratos, sulfatos, cloruros, fosfatos y oxalatos de álcali y de los metales de tierra alcalina. Está también claro que a partir de estos datos que una fracción significativa del material inorgánico, y particularmente de metales alcalinos, está en forma soluble en agua. [4] [7]

El material inorgánico extraño puede estar en muchas formas. En la mayoría de los casos, sin embargo, toma la forma de contaminación con la arena, el suelo u otros materiales minerales, componentes de metal vagabundo, etc. [4] [7]

2.2.5. Aspectos medio ambientales de la combustión de biomasa

La combustión de biomasa influye en el ambiente principalmente a través de emisiones a la atmósfera. Dependiendo del componente de la emisión, influenciará en el ambiente local, regional y global. El ambiente local es afectado principalmente por las emisiones de partículas y otros componentes causados por la combustión incompleta. [4] [7]

El ambiente regional es afectado por la precipitación ácida que se origina principalmente por el NO_x y de las emisiones de SO₂, mientras que el ambiente global es afectado por las emisiones de los gases de efecto invernadero directo o indirecto y a través del agotamiento de la capa de ozono.

La cantidad de agentes contaminantes emitidos a la atmósfera desde diferentes tipos de aplicaciones de la combustión de biomasa es alta, depende de la tecnología de combustión aplicada, las características del combustible, las condiciones del proceso de la combustión, y de las medidas de reducción de emisión primaria y secundaria que se hayan implementado. [4] [7]

Debido a la gran diversidad de los combustibles de biomasa, con alta variación de la composición elemental, contenido de agua, densidad y comportamiento termoquímico, diversos tipos de aplicaciones de la combustión de biomasa se ha desarrollado. Estas aplicaciones de la combustión de biomasa cubren una amplia gama, desde unidades a pequeña escala para la calefacción de habitaciones, hasta de gran escala como las centrales eléctricas. [4] [7]

Por lo tanto, las tecnologías del control de contaminación atmosférica se deben seleccionar con cuidado, y la economía será siempre un factor limitado. Sin embargo, la puesta en práctica de límites de emisión más rigurosos fuerza el desarrollo de sistemas de combustión de biomasa de baja emisiones.

Generalmente las medidas de reducción de emisiones desarrolladas para la

combustión de combustibles fósiles pueden también ser aplicadas para los usos de la combustión de biomasa. Todas las aplicaciones de la combustión de biomasa se benefician de un proceso optimizado de la combustión, que reduce emisiones de la combustión incompleta. Sin embargo, reducir las emisiones es mucho más o para reducir las emisiones de la combustión completa, las medidas secundarias deben generalmente ser aplicadas. [4] [7]

Para las aplicaciones a pequeña escala de la combustión de biomasa, las medidas de reducción de emisión secundaria no son a menudo rentables, y las regulaciones de las emisiones usualmente no son tan estrictas como para las aplicaciones a grande escala de la combustión de biomasa. [4] [7]

Para las aplicaciones de la combustión de biomasa que usan biomasa virgen como combustible, las regulaciones de las emisiones son generalmente aplicadas para las emisiones de la combustión incompleta, tal como algunas clases de partículas y CO en algunos casos, las regulaciones de las emisiones también se aplican al NOx, que se puede también reducir hasta cierto punto por medidas primarias de reducción de emisión. Sin embargo, en casos especiales puede ser necesario aplicar medidas secundarias de reducción de emisión de NOx. [4] [7]

Las emisiones de SO₂ no son generalmente significativas para las aplicaciones de la combustión de la madera debido al bajo contenido de azufre en la madera. Sin embargo, para el combustible de biomasa por ejemplo miscanthus, hierba y paja, la emisión de SO₂ puede ser significativa y las medidas de reducción de la emisión de SO₂ deben ser aplicadas. [4] [7]

Las emisiones de las aplicaciones de la combustión de biomasa se pueden dividir en dos grupos importantes:

Emisiones de la combustión completa y emisiones de la combustión incompleta. Debe ser observado que las emisiones de partículas pueden ser resultado de la combustión completa e incompleta. [4] [7]

Emisión de la combustión completa:

Los componentes siguientes se emiten a la atmósfera como resultado de la combustión completa en aplicaciones de la combustión de biomasa. [4] [7]

- ✓ Dióxido de carbono CO₂

- ✓ Óxidos de nitrógeno NO_x
- ✓ Óxido nitroso N₂O
- ✓ Óxidos de azufre SO_x
- ✓ Cloruro de hidrógeno HCl
- ✓ Partículas
- ✓ Metales pesados

Emisión de la combustión incompleta:

Las emisiones causadas por la combustión incompleta son principalmente o un resultado de:

- ✓ Mezcla inadecuada del aire y del combustible en la cámara de combustión, que produce zonas locales de combustión rica en combustible.
- ✓ Una carencia total del oxígeno disponible.
- ✓ Temperaturas demasiado bajas de la combustión.
- ✓ Tiempos de residencia demasiado cortos.
- ✓ Concentraciones radicales demasiado bajas, en casos especiales, por ejemplo en el estadio final del proceso de la combustión (la fase de la combustión del carbón de leña) en un proceso de combustión discontinua.

Estas variables todas se ligan juntas con las expresiones de la tasa de la reacción para las reacciones elementales de la combustión. Sin embargo, en los casos en los cuales el suficiente oxígeno está disponible, la temperatura es la variable más importante debido a su influencia exponencial en las tasas de la reacción. Una optimización de estas variables, en general, contribuirá a reducir los niveles de todas las emisiones de la combustión incompleta. [4] [7]

Los siguientes componentes se emiten a la atmósfera como resultado de la combustión incompleta en aplicaciones de la combustión de biomasa:

- ✓ Monóxido de carbono CO
- ✓ Metano CH₄
- ✓ Non Methane Volatile Organic Components NMVOC
- ✓ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons PAH
- ✓ Partículas

- ✓ Polychlorinated Dioxins and Furans PCDD/PCDF=PCD/F
- ✓ Amoníaco NH₃
- ✓ Ozono O₃ (a nivel del suelo)

2.2.6. Reacción Química

Es un proceso por el cual una o más sustancias, llamadas reactivos, se transforman en otra u otras sustancias con propiedades diferentes, llamadas productos. En una reacción química, los enlaces entre los átomos que forman los reactivos se rompen. Recuerde que una sustancia pura es definida como aquella que es químicamente homogénea y también químicamente invariante con respecto al tiempo. Por lo tanto, las sustancias presentes antes que ocurra una reacción son llamadas Reactantes y las que se presentan después de que ha ocurrido la reacción se llaman productos. [3] [4]

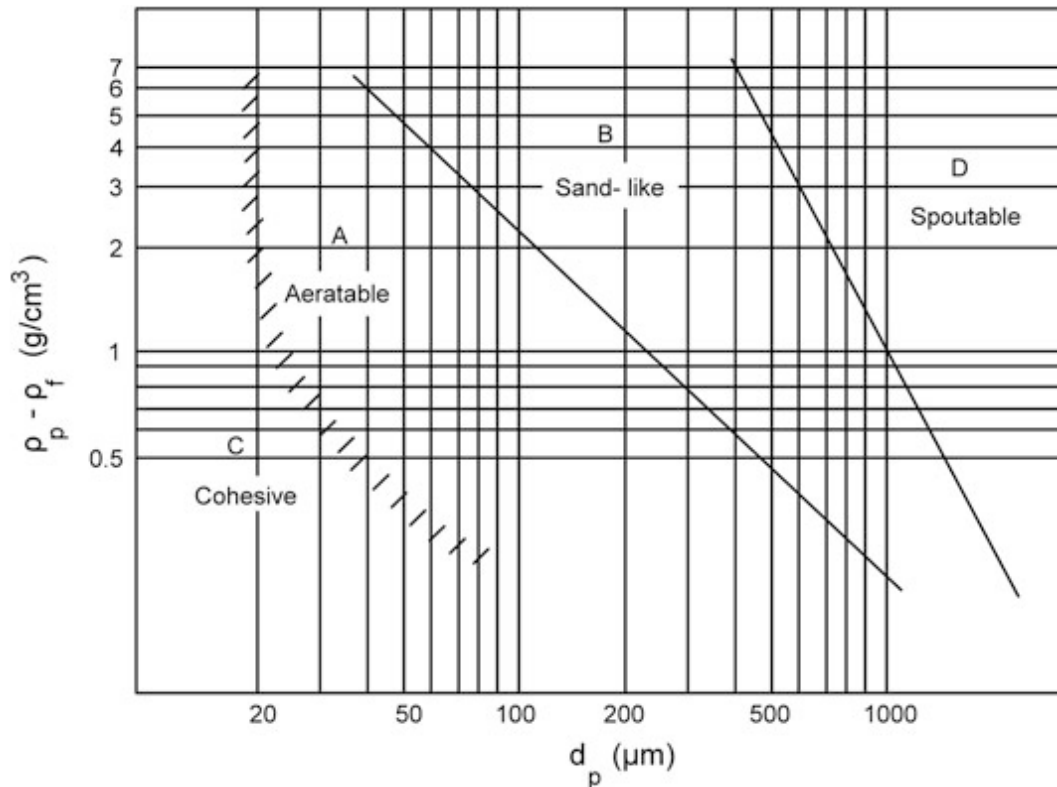
2.2.7. Partículas Sólidas

Las partículas sólidas son rígidas y tienen una forma, mayormente una esfera es una elección natural para definirla, muchas de ellas en la vida real tienen formas distintas y se caracterizan por su grado de desviación de la forma esférica. [4] [6]

2.2.6.1. Clasificación de las Partículas Sólidas

Se clasifican en 4 grupos(A, B, C, D) en función a la diferencia de densidad entre el sólido y el gas fluidizante. En condiciones operativas similares las partículas de diferentes grupos pueden comportarse de manera diferente.

Figura 11. Clasificación en polvo de Sólidos Granulares



Fuente: Libro Prabir Basu [6]

Grupo C

Tienen un diámetro menor a $30\mu m$, son muy difíciles de fluidificar es por eso que se requieren técnicas especiales.

Grupo A

Tienen un diámetro de $30\mu m - 100\mu m$, fluidizan bien y se expanden al sobrepasar la velocidad mínima de fluidización.

Grupo B

Tienen un diámetro de $100\mu m - 500\mu m$, aparecen burbujas inmediatamente se sobrepase la velocidad mínima de fluidización. La mayoría de calderas de lecho fluidizado circulante utilizan este grupo de partículas.

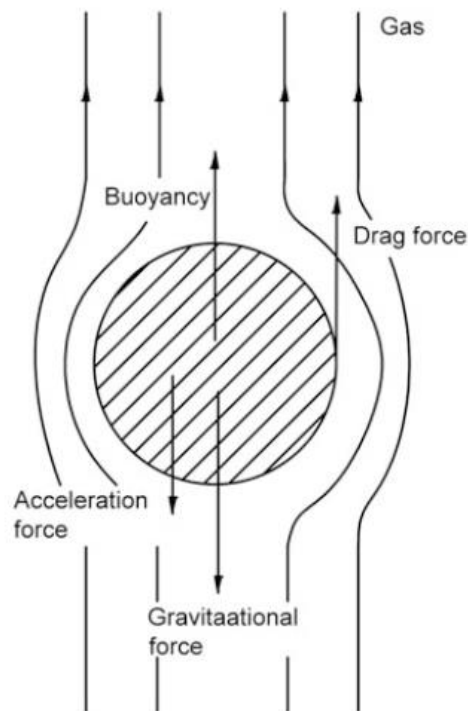
Grupo D

Tienen un diámetro mayor a $500\mu m$, requieren una alta velocidad para fluidificarlas, mayormente se utilizan en los lechos de chorro.

2.2.6.2. Velocidad Terminal de la Partícula:

Si una partícula cae libremente del reposo bajo la gravedad en un medio infinito y estacionario, la partícula se acelera bajo la acción de la gravedad. La fuerza de flotación y la resistencia del fluido se oponen al efecto de la gravedad. La partícula acelera hasta alcanzar una velocidad de equilibrio llamada velocidad terminal. [4] [6]

Figura 12. Fuerzas que actúan sobre una partícula suspendida en un gas ascendente.



Fuente: Libro Prabir Basu

2.2.8. Transferencia de Calor

Es el proceso de transporte de energía en presencia de gradiente de temperaturas en el sistema. Lo que se transporta, denominado calor, no se puede observar o medir de manera directa. Sin embargo, sus efectos se pueden identificar y cuantificar mediante mediciones y análisis. El flujo de calor, al igual que la realización de trabajo, es un proceso mediante el cual se cambia la energía interna de un sistema. [7] [8]

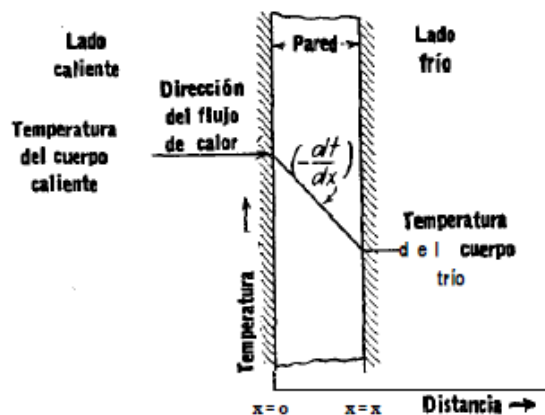
- **Mecanismos de Transferencia de Calor:** Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las

aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son, conducción, convección y radiación. [8]

a) Conducción

Es la transferencia de calor que se produce a través de un medio material por contacto directo entre sus partículas, cuando existe una diferencia de temperatura y en virtud del movimiento de sus micro partículas. La cantidad de calor que se transfiere por conducción viene dada por la ley de Fourier. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo. [3] [8]

Figura 13: Pared estacionaria y componentes de la conducción



Fuente: Donald.Q Kern. Procesos de Transferencia de Calor [8]

b) Convección:

Es la transferencia de calor a través del fluido en la mezcla entre las fracciones más frías y calientes. Por otro lado, existen dos tipos de convección: convección forzada y convección natural.

Para medir la cantidad de calor transferido es indispensable el uso de la Ley de enfriamiento de Newton: [3] [8]

$$dQ = hA dt$$

c) Radiación:

Es la transferencia de energía radiante de la fuente al receptor. En ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor radiante entre las dos superficies a diferentes temperaturas, porque todas las superficies con temperatura limitada emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. La ley de Stefan-Boltzmann da el calor emitido por la superficie por unidad de tiempo: [8]

$$dQ = \sigma \epsilon dA T^4$$

2.2.9. Intercambiadores de calor

Es el dispositivo cuyo propósito principal es transferir el calor entre dos fluidos. Normalmente se emplean tres categorías para clasificar los intercambiadores de calor: [9] [3]

- a) **Regeneradores:** son intercambiadores en donde un fluido caliente fluye y un fluido frío interactúan en un mismo espacio de forma alternada, con tan poca mezcla física como sea posible entre las dos corrientes. En este dispositivo, la superficie que recibe y libera energía térmica alternativamente es muy importante.
- b) **Intercambiadores tipo abierto:** son dispositivos en los que las corrientes de fluido de entrada huyen hacia una cámara abierta, y ocurre una mezcla física completa de las dos corrientes. Las corrientes de aire frío y caliente que entran en el intercambiador se mezclan. El análisis del intercambiador abierto involucra la ley de conservación de la masa y la primera ley de la termodinámica. [3] [8]
- c) **Intercambiadores tipo cerrado:** Un intercambiador de calor cerrado es un intercambiador que transfiere calor entre dos corrientes de fluido que no están mezcladas ni en contacto. Las corrientes de fluido implicadas de esta manera están separadas entre sí por la pared del tubo o cualquier otra superficie que pueda estar relacionada con la trayectoria de transferencia de calor. [3] [8]

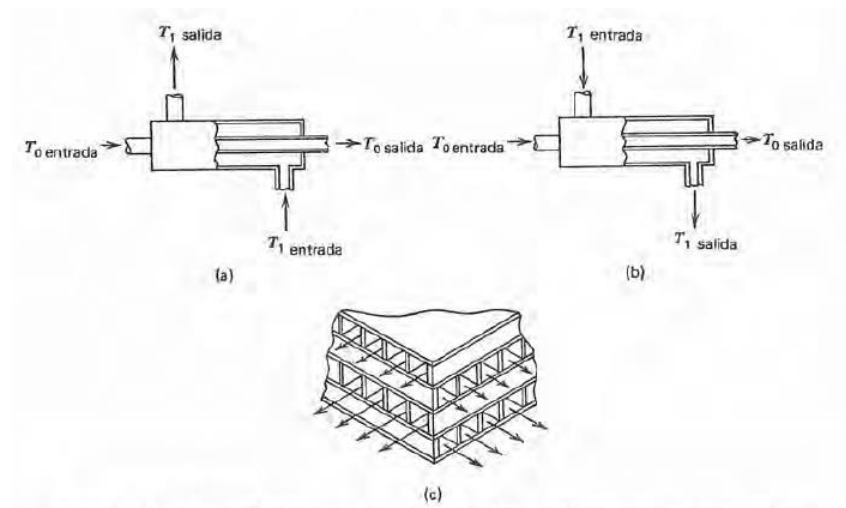
Aunque se aplica a las tres categorías mencionadas antes, el término intercambiador de calor se emplea en el resto de este capítulo para designar el intercambiador de tipo cerrado.

- **Clasificación del intercambiador de calor:** [2]

Los recicladores se clasifican según su configuración. Las principales características que llevan a esta clasificación son: la dirección relativa del flujo de las dos corrientes de fluido y el número de veces que cada fluido pasa por el intercambiador, por ejemplo: [10]

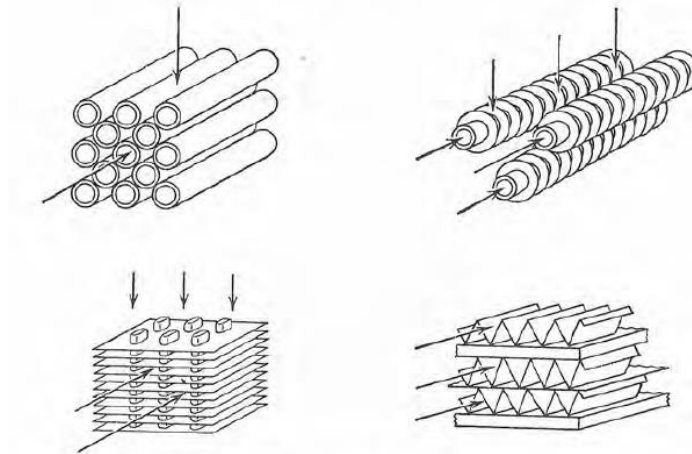
- Contraflujo
- Flujo Paralelo
- Flujo Cruzado
- Compactos de calor
- Coraza y Tubo

Figura 14: Configuraciones de intercambiadores de calor sencillo de una sola pasada. a) contraflujo, b) flujo paralelo, c) flujo cruzado



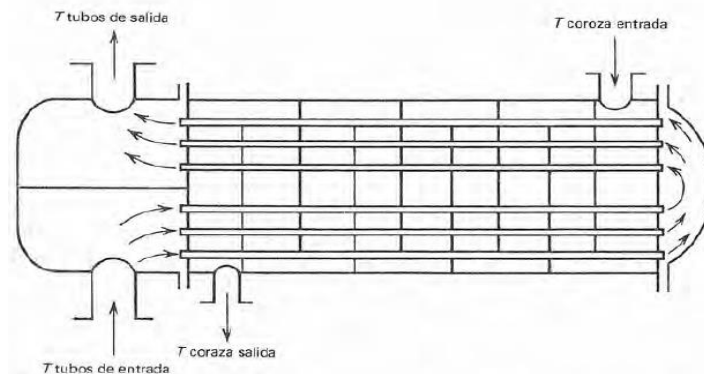
Fuente: R. Welty. Transferencia de Calor aplicada a la ingeniería

Figura 15: Ejemplos de configuraciones de intercambiadores compactos de calor



Fuente: R. Welty. Transferencia de Calor aplicada a la ingeniería

Figura 16: Diagrama Esquemático de un intercambiador de calor de coraza y tubo



Fuente: R. Welty. Transferencia de Calor aplicada a la ingeniería

Definición de términos básicos:

Materia Prima: Sustancia natural o artificial que se transforma industrialmente para crear un producto. Cosa que potencialmente sirve para crear algo.

Horno: Dispositivo que genera calor y que lo mantiene dentro de un comportamiento cerrado.

Intercambiador de Calor: Es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fluidos, o entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento. Son

elementos fundamentales en los sistemas de calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico.

Biomasa: Es la cantidad de materia acumulada en un individuo, un nivel trófico, una población o en ecosistema.

Poder calorífico: Es la cantidad de energía por unidad masa o unidad de volumen de materia que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.

Cascarilla de arroz: Es un subproducto de la industria molinera, que resulta abundantemente en las zonas arroceras de muchos países y que ofrece buenas propiedades para ser usado como biomasa.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Metodología

La metodología que se empleara en la siguiente tesis cuenta con las siguientes partes:

Recolección de Datos: Recolectar los datos suficientes y necesarios para la sustentabilidad del proyecto.

Datos de producción del Molino “El Misti”: Se recopiló la cantidad de arroz cascará y sus productos correspondientes del proceso de pilado en un intervalo de años entre 2011 y 2016

Datos de la cascarilla de arroz: Se obtuvo las cantidades de cascarilla de arroz diarias que posee el molino brindadas por el promedio en la producción entre los años 2011 y 2016.

Determinación y análisis de las características de la cascarilla de arroz: Se determinó los valores de calentamiento superiores e inferiores, la relación de aire-combustible en la combustión, la temperatura flama adiabática para el diseño del horno y los datos restantes de los gases de combustión.

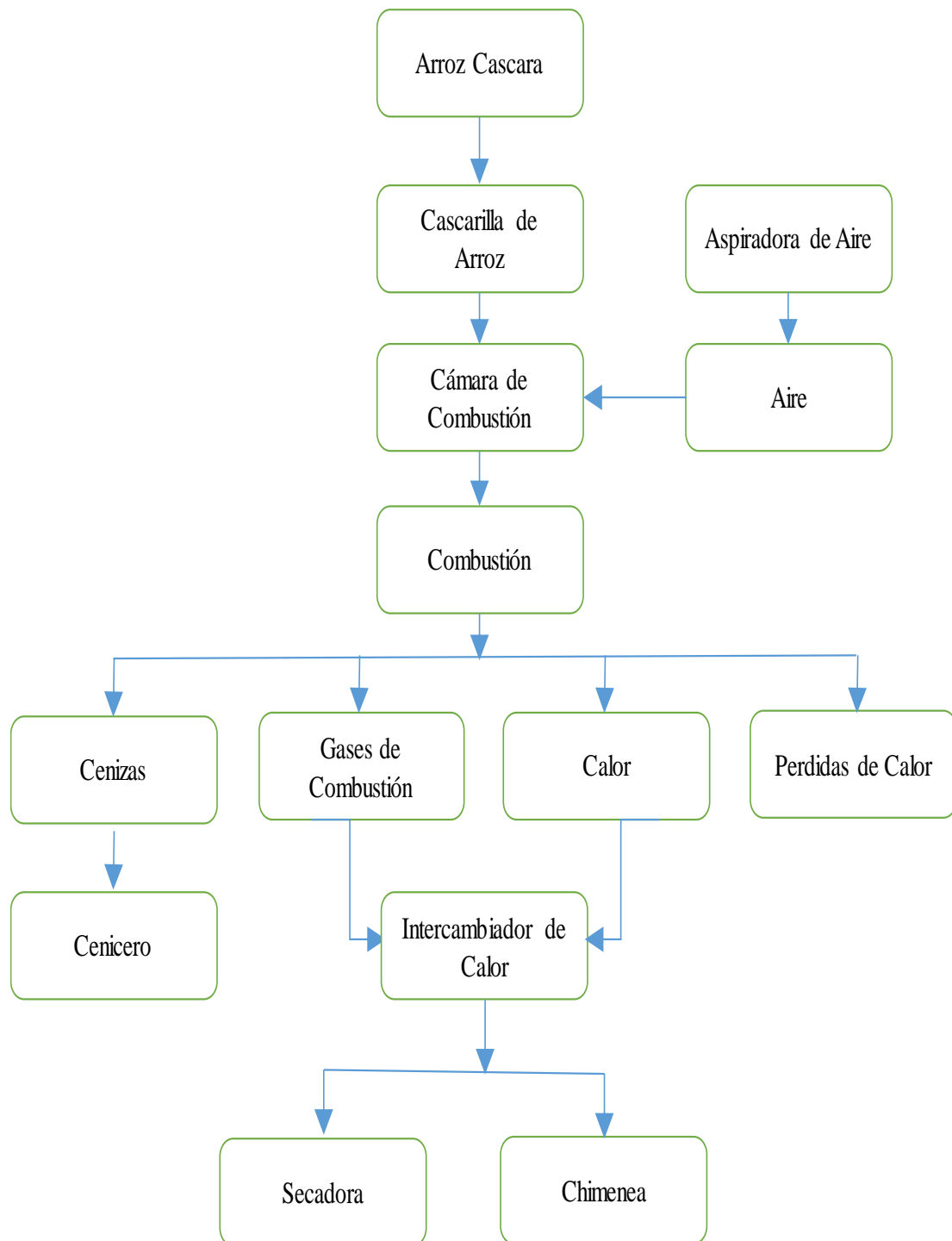
Diseño del Horno: Se seleccionó el tipo de horno adecuado para la combustión de biomasa. Adicionalmente, los parámetros adicionales para su correcto funcionamiento y una temperatura de operación adecuada al sistema. Posteriormente los parámetros de transferencia de calor en el horno e intercambiador de calor.

- Equipos: Se implementará los correctos equipos complementarios para el funcionamiento continuo del horno como ventiladores, chimenea y tolva de alimentación.
- Materiales: Para la elección de materiales adecuados se basó en la experiencia

y recomendación del ingeniero a cargo de la asesoría.

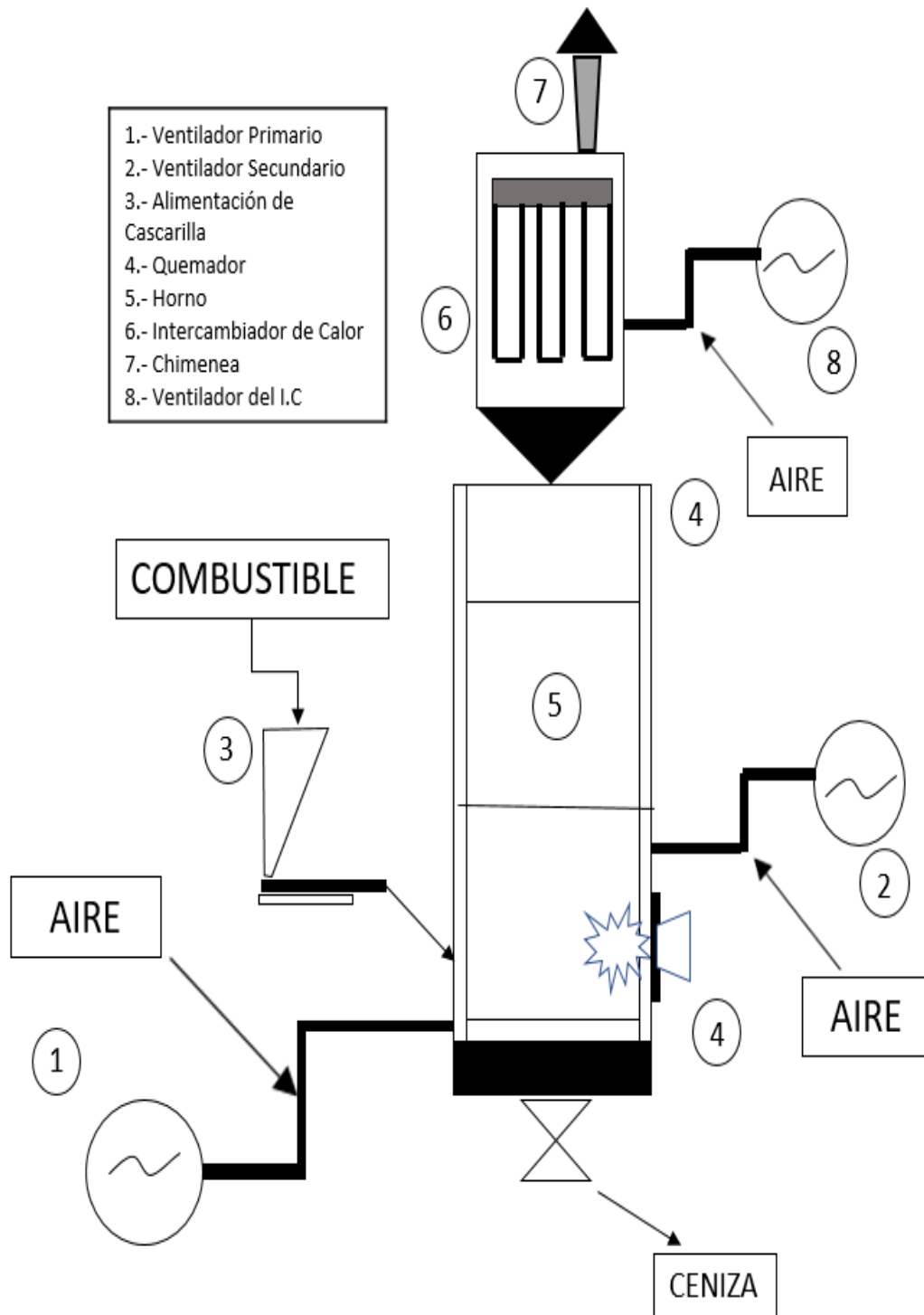
Intercambiador de Calor y Equipos: Se diseñará el intercambiador de calor y seleccionará equipos complementarios del horno para su mayor eficiencia y desempeño de sistema.

Figura 17: Diagrama de Flujo del Diseño del Horno con intercambiador de Calor



Fuente: Elaboración Propia

Figura 18: Esquema de los componentes del diseño



Fuente: Elaboración Propia

3.2. Recolección de datos

3.2.1. Datos del Molino “El Misti”

✓ **Datos Principales:**

RUC: 20395132696

Razón social: Piladora El Misti S.A.C

Fecha de Fundición: 01 de Junio de 1998

Sector económico de Desempeño: servicios agrícolas, ganaderas.

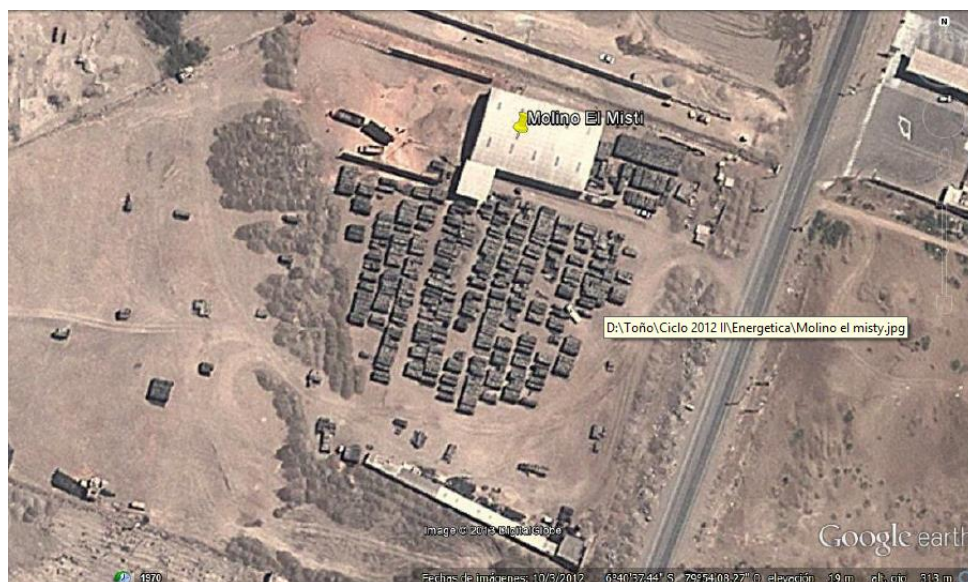
✓ **Ubicación:**

Dirección legal: Carretera Lambayeque –Mochumi. km 1 mocce (frente cementerio Lambayeque).

Distrito/Ciudad: Lambayeque

Departamento: Lambayeque

Figura 19: Ubicación Satelital del Molino “El Misti”



Fuente: Google Earth

Tabla 1: Producción en kg del año 2012

Producción 2012 Molino Misti en kg					
	A. Despuntado	Descarte	Arrocillo	Nielen	Polvillo
Enero	259866	11275	29332	3438.5	27882
Febrero	243782	12285	24997	2818.5	27104
Marzo	406396	21505.5	45954	5456	44610
Abril	173212.5	11783	21840.5	2099.5	19320
Mayo	419770.5	30307	51946.5	5419.5	48491
Junio	506068	25064	33361	5172	48180
Julio	579304	31179.5	47314	6285	57450
Agosto	721146.5	55041.5	71634.5	10328.5	73176
Setiembre	964497	73622	90616.5	12400	98267
Octubre	660640.5	49135	56866.5	8061	66866
Noviembre	892997.5	70692.5	78881.5	12901.5	91830
Diciembre	513276	49249	42999	7688	50376
Promedio	528413	36761.58	49645.3	6839.0	54462.7

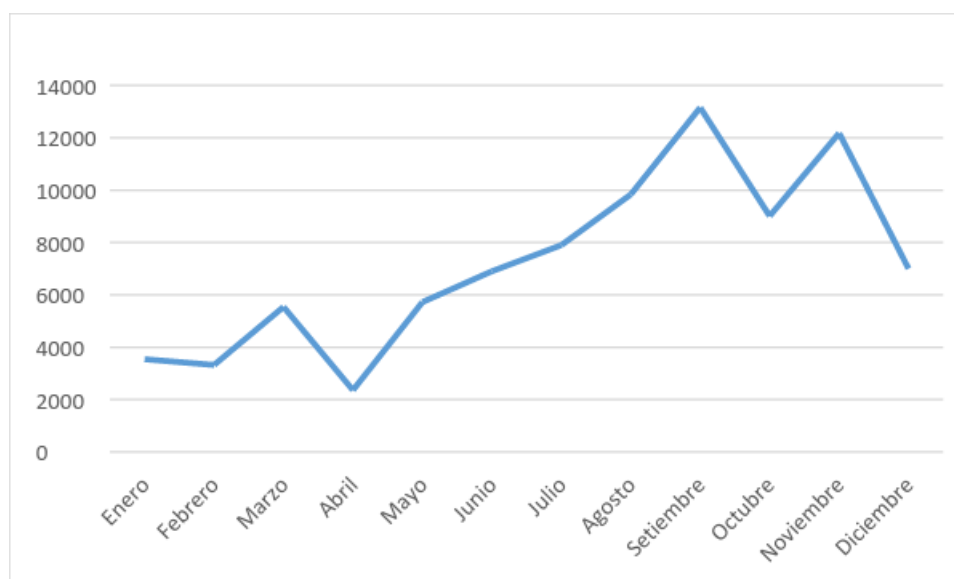
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2: Producción en kg (cascarilla de arroz diaria) del año 2012

Producción 2012 Molino "El Misti" en kg			
	A. Despuntado	Arroz Cascará	Cascarilla de arroz diaria
Enero	259866	371237	3544
Febrero	243782	348260	3324
Marzo	406396	580566	5542
Abril	173212,5	247446	2362
Mayo	419770,5	599672	5724
Junio	506068	722954	6901
Julio	579304	827577	7900
Agosto	721146,5	1030209	9834
Setiembre	964497	1377853	13152
Octubre	660640,5	943772	9009
Noviembre	892997,5	1275711	12177
Diciembre	513276	733251	6999
Promedio	528413	754876	7206

Fuente: Elaboración Propia

Figura 20: Diagrama de producción mensual en kg del año 2012



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3: Producción en kg del año 2013

Producción 2013 Molino Misti en kg					
	A. Despuntado	Descarte	Arrocillo	Nielen	Polvillo
Enero	290099,5	24365	23050	4482	28582
Febrero	87098,5	9189,5	7953,5	1316,5	9060
Marzo	428724	33084	42755,5	6954,5	44449
Abril	322627	20691,5	33780	5214	34253
Mayo	183797,25	6250,65	16311,45	1982,85	16749,6
Junio	428860,25	14584,85	38060,5	4626,65	39082,4
Julio	639145	21147,5	60188	8481,5	58501
Agosto	629105,5	23235	61670,5	8275,5	58980
Setiembre	627628	26912	64037,5	9131,5	58774
Octubre	512572	23262,5	52781	8238,5	47188
Noviembre	414780,5	20819	45439,5	6473	39056
Diciembre	65638	4336	9542	1000	6373
Promedio	385840	18989,79	37964,1	5514,7	36754

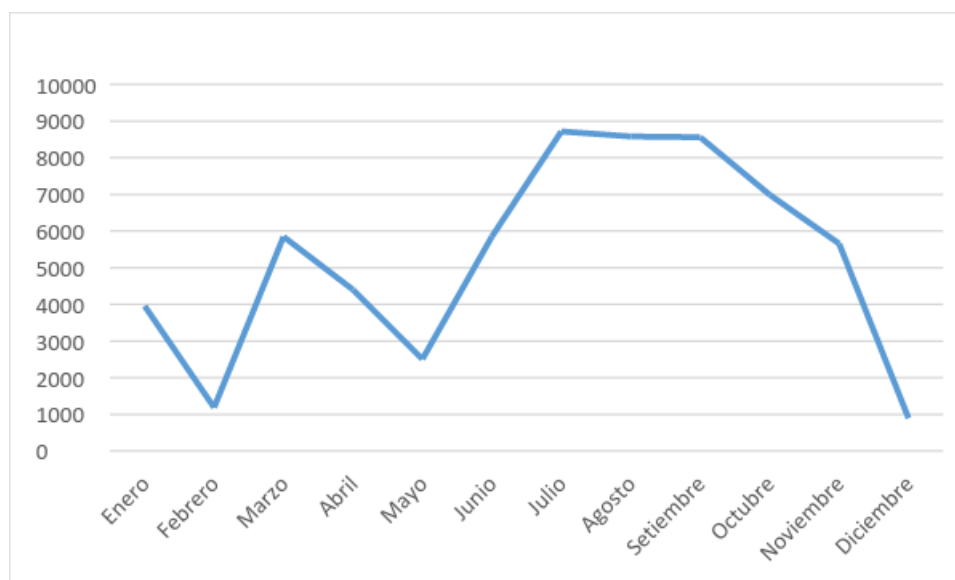
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4: Producción en kg (cascarilla de arroz diaria) del año 2013

Producción 2013 Molino "El Misti" en kg			
	A. Despuntado	Arroz Cascará	Cascarilla de arroz diaria
Enero	290099,5	414428	3956
Febrero	87098,5	124426	1188
Marzo	428724	612463	5846
Abril	322627	460896	4399
Mayo	183797,25	262568	2506
Junio	428860,25	612658	5848
Julio	639145	913064	8716
Agosto	629105,5	898722	8579
Setiembre	627628	896611	8559
Octubre	512572	732246	6990
Noviembre	414780,5	592544	5656
Diciembre	65638	93769	895
Promedio	385840	551199	5261

Fuente: Elaboración Propia

Figura 21: Diagrama de producción mensual en kg del año 2013



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5: Producción en kg del año 2013

Producción 2014 Molino Misti en kg					
	A. Despuntado	Descarte	Arrocillo	Nielen	Polvillo
Enero	301337	16072	29390.5	4611	28944
Febrero	29577,15	1419,75	3557,025	562,5	3020,4
Marzo	36149,85	1735,25	4347,475	6875	3691,6
Abril	124214	4281	12684	1857	12151
Mayo	259123	13784	10531	4748	33468
Junio	604621	32164	23738	6331	44624
Julio	758799	48562,5	18189	9033,5	70877
Agosto	474331	29854,5	11928	6795,5	44138
Setiembre	333164,5	21112	11499	4548	29738
Octubre	358544,5	21636,5	14389,5	5172,5	32063
Noviembre	93534	5848	4232	1235,5	8418
Diciembre	251857,5	12678,5	15028	3255	23223
Promedio	302104	17429,00	13292,8	4069,7	27863,0

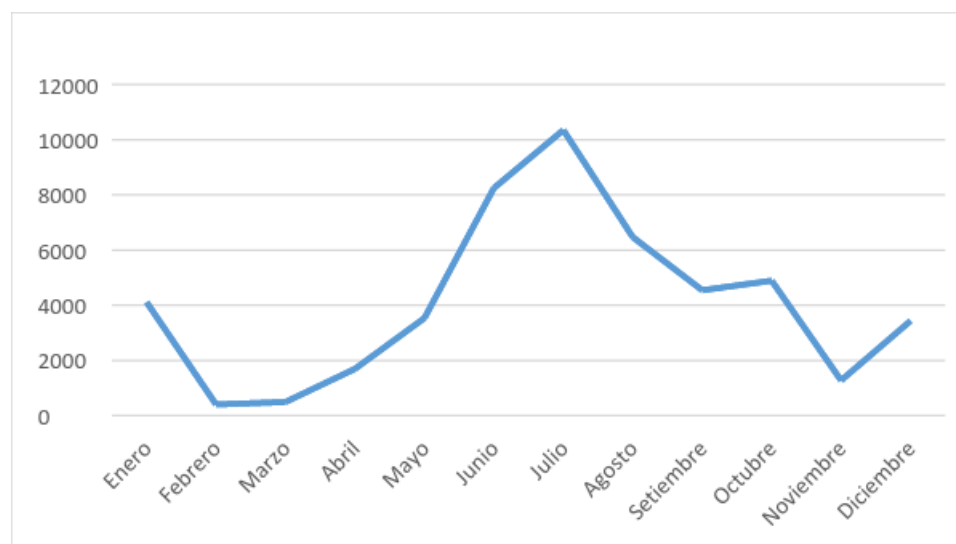
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6: Producción en kg (cascarilla de arroz diaria) del año 2014

Producción 2014 Molino "El Misti" en kg			
	A. Despuntado	Arroz Cascará	Cascarilla de arroz diaria
Enero	301337	430481	4109
Febrero	29577,15	42253	403
Marzo	36149,85	51643	493
Abril	124214	177449	1694
Mayo	259123,35	370176	3534
Junio	604621,15	863745	8245
Julio	758799	1083999	10347
Agosto	474331	677616	6468
Setiembre	333164,5	475949	4543
Octubre	358544,5	512206	4889
Noviembre	93534	133620	1275
Diciembre	251857,5	359796	3434
Promedio	302104	431578	4120

Fuente: Elaboración Propia

Figura 22: Diagrama de producción mensual en kg del año 2014



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7: Producción en kg del año 2015

Producción 2015 Molino Misti en kg					
	A. Despuntado	Descarte	Arrocillo	Nielen	Polvillo
Enero	177636	8740	12777	2678	17411
Febrero	198753	11215	13198	2777	19716
Marzo	113344	6829	7765	1822	11348
Abril	64186	3955	6047	1284	6885
Mayo	221147	9226	12095	2304	19710
Junio	516010	21526	28223	5376	45991
Julio	513957	27558	34242	6005	47210
Agosto	497219	34387	36820	6423	46388
Setiembre	558173	4055	33480	37437	4440
Octubre	228706	14279	15807	3102	21240
Noviembre	466895	27084	29850	6190	43663
Diciembre	103233	5920	6583	1384	9831
Promedio	304938	1456450	19740,6	63985	24486,1

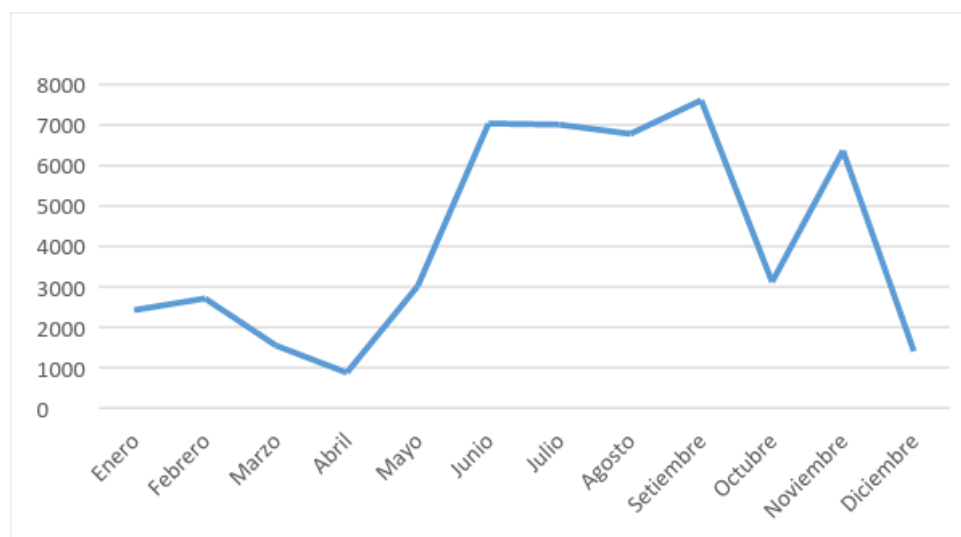
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8: Producción en kg (cascarilla de arroz diaria) del año 2015

Producción 2015 Molino "El Misti" en kg			
	A. Despuntado	Arroz Cascará	Cascarilla de arroz diaria
Enero	177636	253766	2422
Febrero	198753	283933	2710
Marzo	113344	161920	1546
Abril	64186	91694	875
Mayo	221147.1	315924	3016
Junio	516009.9	737157	7036
Julio	513957	734224	7009
Agosto	497219	710313	6780
Setiembre	558173	797390	7611
Octubre	228706	326723	3119
Noviembre	466895	666993	6367
Diciembre	103233	147476	1408
Promedio	304938,25	435626	4158

Fuente: Elaboración Propia

Figura 23: Diagrama de producción mensual en kg del año 2015



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9: Producción en kg del año 2016

Producción 2016 Molino Misti en kg					
	A. Despuntado	Descarte	Arrocillo	Nielen	Polvillo
Enero	127809	7543	10688,5	1789,5	13273
Febrero	110114	6405	8011	1865,5	10950
Marzo	45366	1564,5	2837,5	543	4290
Abril	55878	4318	5278,5	988,5	5370
Mayo	229126	9910	15796,05	2721,75	22065,3
Junio	534626,4	23122,05	36857,45	6350,75	51485,7
Julio	266230	12245	17839	3659	25048
Agosto	471500	18326	30084,5	7933	44278
Setiembre	363830	11951	30453	6497	42142
Octubre	360350	11621	30847,5	5444	47728
Noviembre	102592	4209	8175,5	1609	11744
Diciembre	140510	4395,5	90585	1769,5	15516
Promedio	233994	9634,17	23954,5	3430,9	24490,8

Fuente: Piladora "El Misti SAC"

Tabla 10: Producción en kg (cascarilla de arroz diaria) del año 2016

Producción 2016 Molino "El Misti" en kg			
	A. Despuntado	Arroz Cascará	Cascarilla de arroz diaria
Enero	127809	182584	1743
Febrero	110114	157306	1502
Marzo	45366	64809	619
Abril	55878	79826	762
Mayo	229126	327323	3124
Junio	534626	763751	7290
Julio	266230	380329	3630
Agosto	471500	673571	6430
Setiembre	363830	519757	4961
Octubre	360350	514786	4914
Noviembre	102592	146560	1399
Diciembre	140510	200729	1916
Promedio	233994	334278	3191

Fuente: Piladora "El Misti SAC"

Figura 24: Diagrama de producción mensual en kg del año 2016



Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Resumen de información de la cascarilla de arroz a utilizar

Se presenta las cantidades promedio de cascarilla de arroz en kg por día del Molino “El Misti” entre los años 2012 y 2016, que se utilizar como combustible como para el cámara de combustión del Horno con intercambiador de Calor.

Tabla 11: Cantidad de cascarilla de arroz promedio por años en el Molino “El Misti”

Cascarilla de Arroz por años Molino "El Misti" en kg/día	
2012	7206
2013	5261
2014	4120
2015	4158
2016	3191
Promedio	4787

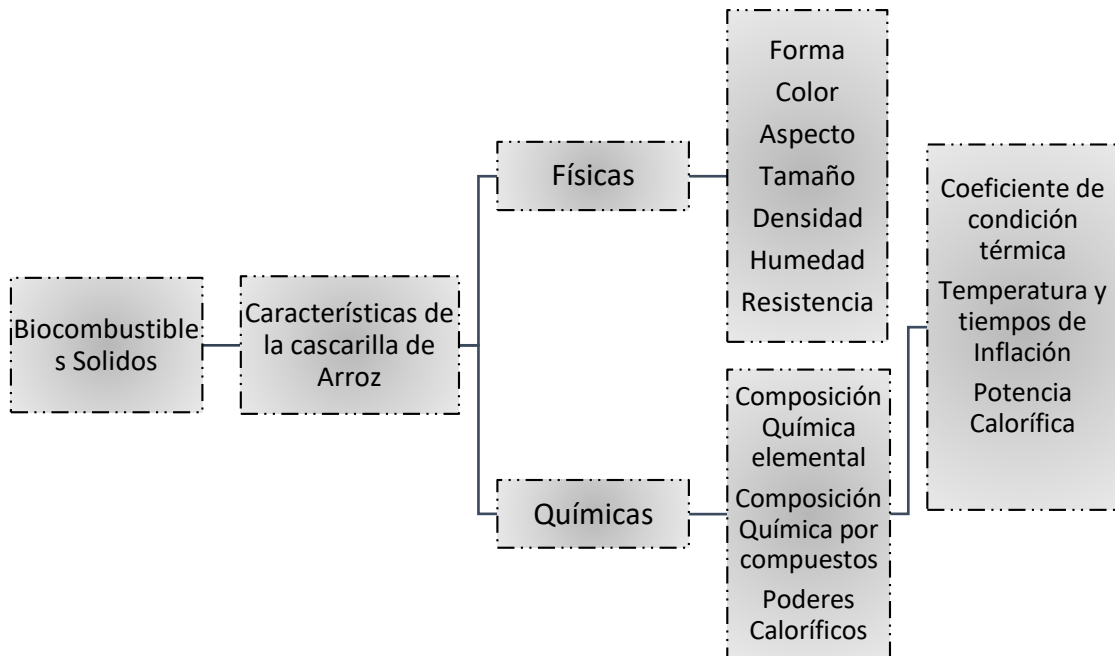
Fuente: Elaboración Propia

El promedio de kg de cascarilla de arroz diaria del molino “El Misti” es 4787 kg/día. Sin embargo, para efecto de cálculo y pérdidas de cascarilla que se presentaran, se trabajó con 4500 kg/día.

3.3. Definir las características de la cascarilla de arroz

Para la correcta utilización de los biocombustibles se debe conocer sus características físicas y químicas, que se mostrar a continuación por el siguiente gráfico.

Figura 25: Características de la cascarilla de Arroz



Fuente: CAMPS, Manual de Combustibles: energías renovables [7]

3.3.1. Características Físicas

Forma:

La cascarilla posee una forma de canoa, superficie rugosa y presenta un color amarillento. [1]

Longitud:

Esta magnitud varía dependiendo su variedad de arroz. Esta entre 8 a 10 mm de largo por 1 a 2 mm de ancho, que corresponde del 30 al 40% de su longitud. [1]

Peso:

Esta magnitud depende de la longitud, varía entre 2,5 y 4,8 mg. [1]

3.3.2. Densidad

- **Densidad Aparente:** Es la relación entre el volumen y el peso seco, incluyendo orificios o poros que contenga. [1]

- **Densidad a granel:** Es la relación entre la cantidad de masa de la cascarilla y el volumen de esta mayormente se considera los m^3 . Este parámetro es importante para los suministros de combustible. Por consiguiente, se han determinado estas variables: [1]

1. Cascarilla Suelta: $500 \frac{kg}{m^3}$
2. Posterior a la vibración: $142 \frac{kg}{m^3}$
3. Compactación Manual: $180 \frac{kg}{m^3}$

- **Densidad Especifica:** Es la diferencia entre la densidad aparte y los orificios o poros que contenga en la cascarilla. Obteniendo una densidad específica de 1420 kg/m^3 según el Ministerio de Minas. [1]

3.3.3. Conductividad Térmica

La conductividad térmica de la cascarilla de arroz es comparable con la fibra de vidrio y poliestireno expandido. Sin embargo, el material con mayor conductividad en el rango de esta tabla es el corcho Aglomerado con 0,0450 K. [1]

Tabla 12: Comparación de Materiales con similar conductividad térmica

Material	K (W/m*k)
Lana Mineral	0,0303
Poliestireno expandido	0,0330
Cascarilla de arroz	0,0360
Fibra de Vidrio	0,0380
Corcho Aglomerado	0,0450

Fuente: Cadena y Silvera, Carolina y Antonio. Estudio de la variación en la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales

3.3.4. Análisis Próximo

El análisis próximo de la cascarilla de arroz sirve para determinar los siguientes factores de combustión y características principales como el poder calorífico superior e inferior,

la humedad, material volátil, relación estequiométrica (aire combustible), flama adiabática y tiempo de residencia. [11]

Tabla 13: Análisis Próximo de las características de la cascara de arroz

Componente	Unidad	Porcentaje(%)
Humedad Residual	% Peso	11,4
Material Volátil	% Peso	48,2
Cenizas	% Peso	18,25
Carbón Fijo	% Peso	25
Poder Calorífico	Kj/Kg	13,400
Azufre Total	% Peso	0,04

Fuente: H. Haykiri-Acma, S. Yaman, S. Kucukbayrak: Effect of biomass on temperatures of sintering and initial deformation of lignite ash. [11]

3.3.5. Valor de Calentamiento Inferior (LHV) y Valor de calentamiento Superior (HHV)

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una cantidad unitaria de combustible y los productos de combustión se enfrían a la temperatura ambiente. Este parámetro está muy relacionado con el rendimiento del equipo de combustión que por consiguiente se caracteriza por la eficiencia de combustión, la cual se define: [1]

$$\eta_{combustion} = \frac{Q}{HHV} = \frac{\text{Cantidad de calor liberado durante la combustion}}{\text{Poder calorifico del combustible quemado}}$$

Una eficiencia de combustión de 100 por ciento indica que el combustible se quema completamente y los gases residuales salen de la cámara de combustión a temperatura ambiente; en consecuencia, la cantidad de calor liberada durante un proceso de combustión es igual al poder calorífico del combustible.

Por otro lado, La mayor parte de los combustibles contienen hidrógeno, que forma agua durante la combustión. El poder calorífico de un combustible será diferente dependiendo de si el agua en los productos de la combustión se halla en forma líquida o de vapor.

- **Valor de Calentamiento Superior (HHV):** Es la cantidad total desprendido en la combustión completa de 1kg de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión esta condensado y se contabiliza, por consiguiente, el calor desprendido está en cambio de fase. [1] [7]

$$HHV = 0.34X_C + 1.1783X_H + 0.11X_S - 0.015X_N - 0.103X_O - 0.021X_{cenizas}; \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

$$HHV = 0,34(42,3) + 1.17(6,1) + 0,11(0,04) - 0,015(1,1) - 0,1034(37,5) - 0,021(12,96)$$

$$HHV = 17,791014 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

- **Valor de Calentamiento Inferior (LHV):** Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1kg de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor. [1] [7]

$$LHV = HHV \left(1 - \frac{w}{100} \right) - 2.444 \left(\frac{w}{100} \right) - 2.44(8.93) \left(\frac{H}{100} \right) \left(1 - \frac{w}{100} \right); \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

$$LHV = 17.79 \left(1 - \frac{9,4}{100} \right) - 2.444 \left(\frac{9,4}{100} \right) - 2.44(8.93) \left(\frac{6,1}{100} \right) \left(1 - \frac{9,4}{100} \right); \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

$$LHV = 14,682 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

Tabla 14: Valor de Calentamiento de distintos combustibles utilizados en la industria

Combustible	Valor de Calentamiento kJ/Kg
Bagazo Húmedo	10500
Bagazo Seco	19200
Cascara de Palta	17800
Cascarilla de Arroz	13800
Madera Seca	19000
Alcohol comercial	23860
Etanol	26790
Gasolina	43950
Petróleo	40895

Fuente: Juan L. Sanchez, Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando la cascarilla de arroz producido por las molineras de arroz de la región Lambayeque. [1]

3.3.6. Análisis Elemental de la cascarilla de arroz

Tabla 15: Análisis Elemental de la cascarilla de arroz

Componentes	Peso kg	Peso molecular
Carbono	42,3	12,0115
Hidrogeno	6,1	1,00797
Oxigeno	37,5	31,9988
Nitrógeno	1,1	28,0134
Azufre	0,04	32,64
Humedad	9,4	-
Ceniza	12,96	-

Fuente: L. Arnesto, L. Bahillo, K. Veijonen, A. Cabanillas , J Otero, «Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed,» *El savier* , vol. 23, n° 23, pp. 171-179, 2002. [5]

A partir de estos datos se pudo encontrar la cantidad de C, H, O que se presentan en la cascara de arroz.

3.3.7. Cantidad de Cascarilla de arroz disponible

La llegada de arroz cascara en el molino y su posterior procesamiento origina algunos subproductos como cascarilla de arroz, polvillo, nielen, arrocillo y grano de arroz. [1] La relación entre la cantidad de subproductos y el producto original se encuentra dada en porcentajes en la siguiente tabla:

Tabla 16: Porcentaje de Residuos de arroz

Residuo	Porcentaje(%)
Cascarilla	20-22
Polvillo	5-7
Nielen	0,7-1
Arrocillo	1-2
Grano de Arroz	68-73
Arroz Cáscara	100

FUENTE: APEMA-PERÚ

Para obtener la cantidad de cascarilla de arroz diaria se aplicó la siguiente ecuación:

$$\text{cascarilla diaria de arroz} = \frac{\text{arroz cascara mensual}}{21\% \times \text{dias de trabajo (22)}}$$

Tabla 17: Cuadro Comparativo de arroz cascara mensual y diaria

Producción Molino "El Misti"		
	Arroz Cascara Mensual	Cascara de Arroz diaria (Kg)
2012	754876	7206
2013	551199	5261
2014	431578	4120
2015	435626	4158
2016	334278	3191
Promedio	501511	4787

Fuente: Elaboración Propia

3.4. Cálculos de flujos y composiciones de la combustión

Tabla 18: Análisis Elemental de la cascarilla de arroz con ceniza

Componentes	%
Carbono	42,3
Hidrogeno	6,1
Oxigeno	37,5
Nitrógeno	1,1
Azufre	0,04
Humedad	9,4
Ceniza	12,96

Fuente: L. Arnesto, L. Bahillo, K. Veijonen, A. Cabanillas, J Otero, «Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed,» *El savier*, vol. 23, n° 23, pp. 171-179, 2002. [5]

Tabla 19: Análisis Elemental de la cascarilla de arroz sin ceniza

Componentes	% (Xi)
Carbono	48,6
Hidrogeno	7,00
Oxigeno	43
Nitrógeno	1,27
Azufre	0,05
Humedad	9,4

Fuente: Elaboración Propia

Proporción de exceso de aire asumida $\lambda = 2,5$ [8]

3.4.1. Oxígeno Necesario

$$\bar{m}_{O_2,aire} = \left(X_C \frac{M_{O_2}}{M_C} + \frac{X_H}{4} \frac{M_{O_2}}{M_H} + X_S \frac{M_{O_2}}{M_S} - X_O \right) (1 - X_{H_2O}) \lambda; \left[\frac{kg. O_2}{kg. cascarilla} \right]$$

$$\bar{m}_{O_2,aire} = \left(0,486 \frac{32}{12} + \frac{0,07}{4} \frac{32}{1} + 0,05 \frac{32}{32} - 0,43 \right) (1 - 0,094) (2,5)$$

$$\bar{m}_{O_2,aire} = 3,2181 \left[\frac{kg. O_2}{kg. cascarilla} \right]$$

3.4.2. Nitrógeno necesario

$$\bar{m}_{N_2,aire} = \bar{m}_{O_2,aire} \frac{Y_{N_2,aire} M_{N_2}}{Y_{O_2,aire} M_{O_2}}; \left[\frac{kg. N_2}{kg. cascarilla} \right]$$

$$\bar{m}_{N_2,aire} = 3,2181 \frac{(0,79)(28,0134)}{(0,21)(31,9988)}$$

$$\bar{m}_{N_2,aire} = 10,5984 \left[\frac{kg. N_2}{kg. cascarilla} \right]$$

3.4.3. Aire necesario

$$\bar{m}_{aire} = \bar{m}_{O_2,aire} + \bar{m}_{N_2,aire}; \left[\frac{kg. aire}{kg. cascarilla} \right]$$

$$\bar{m}_{aire} = 3,2181 + 10,5984$$

$$\bar{m}_{aire} = 13,8165 \left[\frac{kg. aire}{kg. cascarilla} \right]$$

3.4.4. Gases de combustión

$$\bar{m}_{FG} = \bar{m}_{aire} + 1; \left[\frac{kg. gas combustion}{kg. cascarilla} \right]$$

$$\bar{m}_{FG} = 13,8165 + 1$$

$$\bar{m}_{FG} = 14,8165 \left[\frac{kg. gas combustion}{kg. cascarilla} \right]$$

Tabla 20: Resultados LHV y relación de Gases/Combustible

LHV $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	\bar{m}_{FG} $\lambda = 2,5$
14682,21	14,8165

3.4.5. Masa de las especies de los gases de combustión

$$M_{CO_2} = 44.00995; M_{H_2O} = 18.01534; M_{H_2} = 2.01594; M_{SO_2} = 64.0628$$

$$\bar{m}_{CO_2} = X_C \frac{M_{CO_2}}{M_C} (1 - X_{H_2O}); \left[\frac{\text{Kg}CO_2}{\text{Kg.fuel}(waf)} \right]$$

$$\bar{m}_{CO_2} = 0,486 \frac{44,00995}{12,0111} (1 - 0,094)$$

$$\bar{m}_{CO_2} = 1,6133 \left[\frac{\text{kg}CO_2}{\text{kg.cascarilla}} \right]$$

$$\bar{m}_{H_2O} = X_H \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} (1 - X_{H_2O}) + X_{H_2O}; \left[\frac{\text{kg}H_2O}{\text{kg.cascarilla}} \right]$$

$$\bar{m}_{H_2O} = 0,07 \frac{18,01534}{2,01594} (1 - 0,094) + 0,094$$

$$\bar{m}_{H_2O} = 0,6607 \left[\frac{\text{kg}H_2O}{\text{kg.cascarilla}} \right]$$

$$\bar{m}_{SO_2} = X_S \frac{M_{SO_2}}{M_S} (1 - X_{H_2O}) \left[\frac{\text{kg}SO_2}{\text{kg.cascarilla}} \right]$$

$$\bar{m}_{SO_2} = 0,005 \frac{64.0628}{32.064} (1 - 0,094)$$

$$\bar{m}_{SO_2} = 0,000905 \left[\frac{kgSO_2}{kg.cascarilla} \right]$$

$$\bar{m}_{N_2} = \bar{m}_{N_2.aire} + X_N(1 - X_{H_2O}); \left[\frac{KgN_2}{kg.cascarilla} \right]$$

$$\bar{m}_{N_2} = 10,5984 + 0,0127(1 - 0,094)$$

$$\bar{m}_{N_2} = 10,6099 \left[\frac{KgN_2}{kg.cascarilla} \right]$$

$$\bar{m}_{O_2} = \frac{\bar{m}_{O_2.aire}}{\lambda} (\lambda - 1); \left[\frac{kg.O_2.aire}{kg.cascarilla} \right]$$

$$\bar{m}_{O_2} = \frac{3,2181}{2,5} (2,5 - 1)$$

$$\bar{m}_{O_2} = 1,93086 \left[\frac{kg.O_2}{kg.cascarilla} \right]$$

3.4.6. Fracciones de masa de los gases de la combustión

Las fracciones masa de las especies de los gases de combustión, X_{CO_2} , X_{H_2O} , X_{SO_2} , X_{N_2} y X_{O_2} fueron halladas normalizando la masa total de los gases de combustión.

$$X_{CO_2} = \frac{\bar{m}_{CO_2}}{\bar{m}_{CO_2} + \bar{m}_{H_2O} + \bar{m}_{SO_2} + \bar{m}_{N_2} + \bar{m}_{O_2}}$$

$$X_{CO_2} = \frac{1,6133}{1,6133 + 0,6607 + 0,000905 + 10,6099 + 1,93086}$$

$$X_{CO_2} = 0,108894$$

$$X_{H_2O} = \frac{\bar{m}_{H_2O}}{\bar{m}_{CO_2} + \bar{m}_{H_2O} + \bar{m}_{SO_2} + \bar{m}_{N_2} + \bar{m}_{O_2}}$$

$$X_{H_2O} = \frac{0,6606}{1,6133 + 0,6607 + 0,000905 + 10,6099 + 1,93086}$$

$$X_{H_2O} = 0,044597$$

$$X_{N_2} = \frac{\bar{m}_{N_2}}{\bar{m}_{CO_2} + \bar{m}_{H_2O} + \bar{m}_{SO_2} + \bar{m}_{N_2} + \bar{m}_{O_2}}$$

$$X_{N_2} = \frac{10,6099}{1,6133 + 0,6607 + 0,000905 + 10,6099 + 1,93086}$$

$$X_{N_2} = 0,7161$$

$$X_{S_2O} = \frac{\bar{m}_{SO_2}}{\bar{m}_{CO_2} + \bar{m}_{H_2O} + \bar{m}_{SO_2} + \bar{m}_{N_2} + \bar{m}_{O_2}}$$

$$X_{S_2O} = \frac{0,000905}{1,6133 + 0,6607 + 0,000905 + 10,6099 + 1,93086}$$

$$X_{S_2O} = 0,00006108$$

$$X_{O_2} = \frac{\bar{m}_{O_2}}{\bar{m}_{CO_2} + \bar{m}_{H_2O} + \bar{m}_{SO_2} + \bar{m}_{N_2} + \bar{m}_{O_2}}$$

$$X_{O_2} = \frac{1,93086}{1,6133 + 0,6607 + 0,000905 + 10,6099 + 1,93086}$$

$$X_{O_2} = 0,13032$$

3.4.7. Fracción volumétrica de los gases de la combustión

La fracción volumen de las especies de los gases de combustión puede ser encontrada, convirtiendo la fracción masa de las especies de los gases de combustión, que sigue:

$$Y_i = \frac{\frac{X_i}{M_i}}{\sum_i \frac{X_i}{M_i}}; \sum_i \frac{X_i}{M_i} = \frac{X_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{X_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{X_{SO_2}}{M_{SO_2}} + \frac{X_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{X_{O_2}}{M_{O_2}}$$

$$Y_{CO_2} = \frac{\frac{X_{CO_2}}{M_{CO_2}}}{\frac{X_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{X_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{X_{SO_2}}{M_{SO_2}} + \frac{X_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{X_{O_2}}{M_{O_2}}}$$

$$Y_{CO_2} = \frac{\frac{0,10889}{44,00995}}{\frac{0,10889}{44,00995} + \frac{0,044597}{18,01534} + \frac{0,00006108}{64,0628} + \frac{0,7161}{28,0134} + \frac{0,13032}{31,9988}}$$

$$Y_{CO_2} = 0,0715385$$

$$Y_{H_2O} = \frac{\frac{X_{H_2O}}{M_{H_2O}}}{\frac{X_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{X_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{X_{SO_2}}{M_{SO_2}} + \frac{X_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{X_{O_2}}{M_{O_2}}}$$

$$Y_{H_2O} = \frac{\frac{0,044597}{18,01534}}{\frac{0,10889}{44,00995} + \frac{0,044597}{18,01534} + \frac{0,00006108}{64,0628} + \frac{0,7161}{28,0134} + \frac{0,13032}{31,9988}}$$

$$Y_{H_2O} = 0,07157$$

$$Y_{SO_2} = \frac{\frac{X_{SO_2}}{M_{SO_2}}}{\frac{X_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{X_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{X_{SO_2}}{M_{SO_2}} + \frac{X_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{X_{O_2}}{M_{O_2}}}$$

$$Y_{SO_2} = \frac{\frac{0,00006108}{64,0628}}{\frac{0,10889}{44,00995} + \frac{0,044597}{18,01534} + \frac{0,00006108}{64,0628} + \frac{0,7161}{28,0134} + \frac{0,13032}{31,9988}}$$

$$Y_{SO_2} = 0,00002757$$

$$Y_{N_2} = \frac{\frac{X_{N_2}}{M_{N_2}}}{\frac{X_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{X_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{X_{SO_2}}{M_{SO_2}} + \frac{X_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{X_{O_2}}{M_{O_2}}}$$

$$Y_{N_2} = \frac{\frac{0,7161}{28,0134}}{\frac{0,10889}{44,00995} + \frac{0,044597}{18,01534} + \frac{0,00006108}{64,0628} + \frac{0,7161}{28,0134} + \frac{0,13032}{31,9988}}$$

$$Y_{N_2} = 0,7391$$

$$Y_{O_2} = \frac{\frac{X_{O_2}}{M_{O_2}}}{\frac{X_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{X_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{X_{SO_2}}{M_{SO_2}} + \frac{X_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{X_{O_2}}{M_{O_2}}}$$

$$Y_{O_2} = \frac{\frac{0,13032}{31,9988}}{\frac{0,10889}{44,00995} + \frac{0,044597}{18,01534} + \frac{0,00006108}{64,0628} + \frac{0,7161}{28,0134} + \frac{0,13032}{31,9988}}$$

$$Y_{O_2} = 0,1177$$

3.4.8. Masa molecular de los gases de combustión

$$M_{FG} = \sum_i Y_i M_i = Y_{CO_2} M_{CO_2} + Y_{H_2O} M_{H_2O} + Y_{SO_2} M_{SO_2} + Y_{N_2} M_{N_2} + Y_{O_2} M_{O_2}; \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

$$M_{FG} = (0,07153)(44,0995) + (0,07157)(18,01534) + (0,00002757)(64,0628) + (0,739105)(28,0034) + (0,11775)(31,9988)$$

$$M_{FG} = 28,9124 \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

3.4.9. Densidad del aire

$$\rho_{aire} = \frac{\rho_o}{\frac{R_u}{M_{aire}} T_{c,i}}; \left[\frac{kg}{Nm^3} \right]$$

Donde:

M_{aire} : Masa molecular del aire

$$M_{aire} = Y_{O_2,aire} M_{O_2} + Y_{N_2,aire} M_{N_2}; \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

$$M_{aire} = (0,21)(31,9988) + (0,79)(28,0034)$$

$$M_{aire} = 28,842; \left[\frac{kg}{kmole} \right]$$

Entonces:

$$\rho_{aire} = \frac{101325}{\frac{8314,32}{28,842} (298,15)}$$

$$\rho_{aire} = 1,1789 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

3.4.10. Flujo másico del aire

$$\dot{m}_{aire} = (\dot{m}_F)(\bar{m}_{aire}); \left[\frac{kg}{h} \right]$$

$$\dot{m}_{aire} = (70)(13,81)$$

$$\dot{m}_{aire} = 966,7 \left[\frac{kg}{h} \right]$$

3.4.11. Flujo volumétrico del aire

$$\dot{V}_{aire} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{aire}}; \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\dot{V}_{aire} = \frac{966,7}{1,1789}$$

$$\dot{V}_{aire} = 820 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

3.4.12. Caudal del aire

$$Q_{aire\ hornos} = \frac{M_{aire\ 1}}{\rho_{aire\ amb}}$$

Donde:

$$M_{aire\ 1}: \text{Flujo masico del aire} = 70 * 13,81 = 966,7 \frac{kg}{h}$$

$$\rho_{aire\ amb}: \text{Densidad de aire ambiental en Chiclayo} = 1,1274 \frac{kg}{m^3}$$

$$Q_{aire\ hornos} = \frac{966,7 \frac{kg}{h}}{1,1274 \frac{kg}{m^3}}$$

$$Q_{aire\ hornos} = 857,4 \frac{m^3}{h} = 0,238 \frac{m^3}{s}$$

3.4.13. Temperatura Adiabática de la llama

$$T_{\text{adiabática llama}} = T_{c,i} + \frac{PCI}{\bar{m}_{FG} C_{pg}}$$

Donde:

$T_{c,i}$: Temperatura del aire de entrada (25+273,15 K)

PCI : Poder calorífico inferior.

\bar{m}_{FG} : Relación de Gases/combustible.

C_{pg} : Calor específico de los gases (temperatura del aire de entrada)

$$T_{\text{adiabática llama}} = 25 + 273,15 + \frac{14681}{14,816 * 1,0007}$$

$$T_{\text{adiabática llama}} = 1282,15 \text{ K}$$

$$T_{\text{adiabática llama}} = 1009 \text{ °C}$$

La temperatura obtenida fue de 1000°C. Sin embargo, la temperatura establecida para operación es de 850°C por motivo de pérdidas térmicas y por ser una temperatura óptima para lecho fluidizado burbujeante. Además de resultar una temperatura adecuada para el control adecuado de gases contaminantes de la combustión. [6]

3.4.14. Densidad de los gases de combustión

$$\rho_{FG} = \frac{\rho_o}{\frac{R_u}{M_{FG}} T_{c,i}}; \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{FG} = \frac{101325}{\frac{8314,32}{28,9124}(850 + 273,15)K}; \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_{FG} = 0,313 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

3.4.15. Flujo másico de los gases de combustión

$$\dot{m}_{FG} = (\dot{m}_F)(\bar{m}_{FG}); \left[\frac{kg}{h} \right]$$

Donde:

\dot{m}_F : Tasa de consumo del combustible en bases húmeda libre de ceniza $\left[\frac{kg. cascarilla}{h} \right]$

$$\dot{m}_{FG} = (70)(14,8165)$$

$$\dot{m}_{FG} = 1037,155 \left[\frac{kg}{h} \right]$$

$$\dot{m}_{FG} = 0,288 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

3.4.16. Capacidad calorífica de los gases de combustión

Para determinar el calor específico del gas de combustión se requiere conocer el calor específico de cada gas constituyente con su respectivo peso molecular, de tal forma que se obtiene el aporte de cada componente. En la siguiente ecuación y siguiente cuadro se presentan las constantes de cada componente, la cual depende de la Temperatura en Kelvin. [3] [12]

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \left(\frac{kJ}{kmol} \right)$$

Tabla 21. Constantes para la capacidad calorífica

Componente	a	b	c	d
CO_2	22,26	0,0598	-0,000035	7,5E-09
N_2	28,9	-0,0016	0,0000081	-2,9E-09
H_2O	32,24	0,001923	0,000011	-3,6E-09
O_2	26	-0,0014	0,0000052	-1,8E-09

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 22. Calor Especifico a 850°C

Componente	Cp (kJ/kmol)	Yi
CO ₂	52,4084	0,0715
N ₂	31,6113	0,7391
H ₂ O	39,6112	0,07157
O ₂	27,4616	0,1177
$\sum C_{pi} * Y_i$	33,1783	

Fuente: Elaboración Propia

$$C_p = 33,1783 \frac{kJ}{kmol} \div 28,9124 \frac{kg}{kmol}$$

$$C_p = 1,1475 \frac{kJ}{kg}$$

3.4.17. Viscosidad Absoluta de los gases de combustión

Para obtener la viscosidad absoluta de los gases de combustión, se calculó la viscosidad individual de cada componente, usando la ecuación Chapman-Enskog. [12]

$$\mu = 2,6693 \times 10^{-6} \frac{(PM \times T)^{0,5}}{\sigma^2 \Omega_\mu}$$

Donde:

σ : *diametro de colision (Lennard – Jones)(Anexo 3)*

PM : *Peso molecular del componente*

T : *Temperatura de los gases de combustion (850°C)*

Ω_μ : *función integral de colision (Lennard – Jones)(Anexo 4)*

Por ello usaremos las tablas de los Parámetros de Lennard-Jones y el integral de Colisión. (Anexo 3 y 4)

Tabla 23: Viscosidad de los Componentes a 850°C

Componente	σ	ε/k	$\frac{kT}{\varepsilon}$	Ω_μ	PM	Viscosidad
CO_2	3,941	195,2	4,354508197	0,95	44	$3,49862 \times 10^{-5}$
N_2	3,798	71,4	11,9047619	0,81	28	$3,52445 \times 10^{-5}$
H_2O	2,52	775	1,096774194	1,51	18	$3,44322 \times 10^{-5}$
O_2	3,467	106,7	7,966260544	0,85	32	$4,30879 \times 10^{-5}$
						$3,69377 \times 10^{-5}$

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, al obtener la viscosidad individual de cada componente, se procedió a promediar los resultados y obtener la viscosidad absoluta. [12]

$$\mu_g = 3,69377 \times 10^{-5} [Pa.s]$$

3.5. Potencia del Horno

$$Pot_{Horno} = LHV \times \dot{m}$$

$$Pot_{Horno} = 14,682 \frac{MJ}{kg} \times 70 \frac{kg}{h}$$

$$Pot_{Horno} = 1027,74 \frac{MJ}{h} = 285,483 kW$$

3.6. Selección de Tipo de Horno

Para la selección de Tipo de hornos de combustión de cascarilla de arroz, se basó en la tabla de ventajas y desventajas de los hornos más comunes en la actualidad. Por lo cual, la tabla es la siguiente:

Tabla 24: Ventajas y Desventajas de los principales Tipos de hornos

	Ventajas	Desventajas
Lecho Fluidizado Burbujeante	<p>Sin partes móviles en la cámara de combustión</p> <p>Reducción de NO_x mediante fases de aire</p> <p>Alta Flexibilidad en cuanto al contenido de humedad y tipo de combustible de biomasa utilizados</p> <p>Alto rango de uso de excesos de Oxígeno</p>	<p>Alto costos de inversión, recomendable para plantas mayores a >20 MW</p> <p>Flexibilidad reducida frente a diámetro de partículas (<80 mm)</p> <p>Costo de Operación Elevados</p> <p>Alta carga de polvo en los gases de combustión</p>
Lecho Fluidizado Circulante	<p>Sin partes móviles en la cámara de combustión</p> <p>Reducción de NO_x mediante fases de aire</p> <p>Excesos de oxígeno bajos Condiciones de combustión homogénea en el horno</p> <p>Condiciones de combustión homogéneas si es que se utilizan varios inyectores de combustible</p>	<p>Altos costos de inversión, recomendable para plantas mayores a >30 MW</p> <p>Costos de Operación elevados</p> <p>Alta carga de polvo en los gases de combustión</p> <p>Perdida de Material de la cama con la ceniza sin mezclas especiales</p>
Hornos de Rejillas	<p>Bajo costo inversión en plantas < 20 MW</p> <p>Bajo Costo de Operación</p> <p>Baja carga de polvo en los gases de combustión</p> <p>Menos sensible a la escoria que los hornos con fluidización</p>	<p>Requiere de tecnologías especiales para la disminución eficiente de NO_x.</p> <p>Excesos aire altos y condiciones de combustión deficiente en comparación a los lechos fluidizados</p> <p>Bajos niveles de emisiones contaminantes requiere controles especiales.</p>

Fuente: S. Van Loo y J. Koppejan, The Handbook of Biomass and Co-firing, London: Earthscan, [4]

Los motivos más determinantes para la selección del tipo de horno fueron la flexibilidad en el uso de biomasa como combustible, la reducción de emisiones de NO_x , el diseño de una planta mayor a 20 MW y una flexibilidad alta en el exceso de aire para una temperatura de llama adiabática recomendada. Por lo cual se conllevó a la elección de un

lecho fluidizado burbujeante. Además de una simplicidad de elaboración y cálculo de parámetros frente a un lecho fluidizado circulante.

3.7. Hidrodinámica en el Lecho

Tabla 25: Características físicas de la arena de río

Material de lecho Inerte	Arena de Río Seca
Densidad (kg/m^3)	1700
Diámetro de la partícula (d_p)(μm)	1200
Porosidad de la Partícula(ϵ)	0,46

Fuente: Arenas Industriales Sika Perú

Tabla 26: Características químicas de los gases a diferentes temperaturas

	Estados	
	A	B
Temperatura del Lecho ($^{\circ}C$)	850 $^{\circ}C$	25 $^{\circ}C$
Densidad del gas (kg/m^3)	0,3143	1,184
Viscosidad del Gas (kg)	44,83x10 $^{-6}$	18,49x10 $^{-6}$

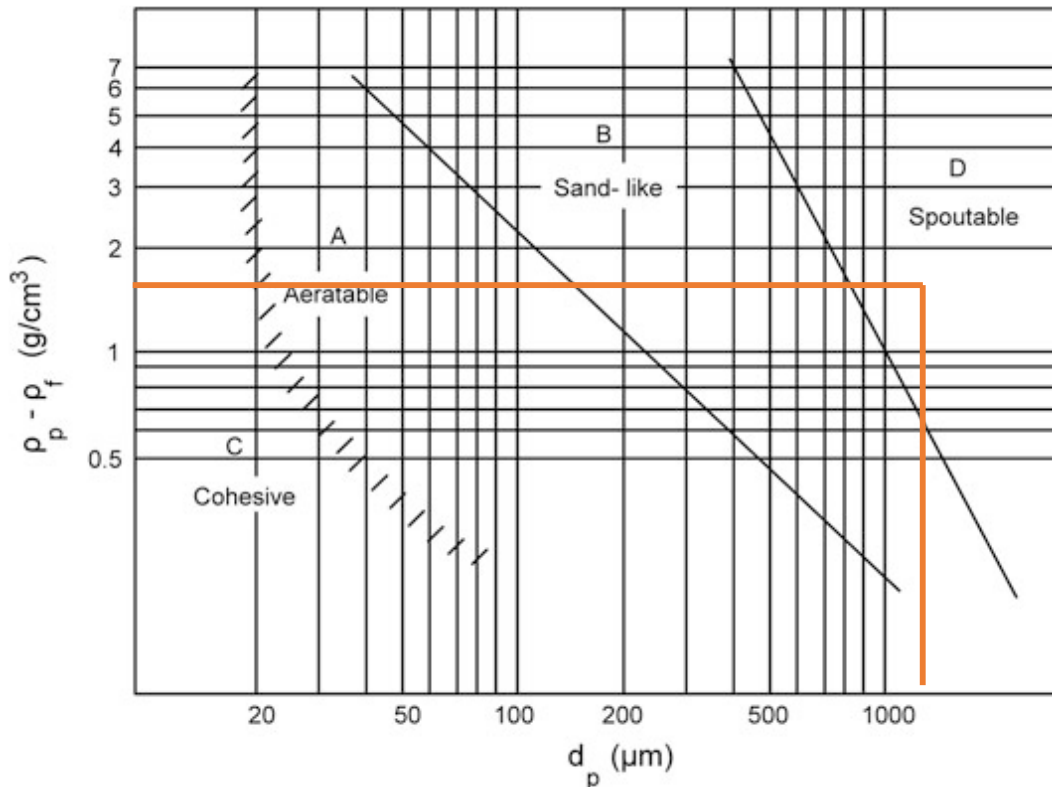
3.7.1. Determinación de Tipo de Partícula

$$\rho_p = 1700 \frac{kg}{m^3} = 1,7 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_p - \rho_{gA} = 1,7 - 0,0003143 = 1,6996857 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_p - \rho_{gB} = 1,7 - 0,001184 = 1,698816 \text{ g/cm}^3$$

Figura 26: Diagrama tipo de Partícula



Fuente: Libro Prabir Basu [6]

Considerando los datos obtenidos entre la diferencia de densidades y el diámetro medio de la partícula resulta una partícula Tipo D.

3.7.2. Número de Arquímedes

Para Estado A:

$$Ar = \frac{\rho_{gA}(\rho_p - \rho_{gA})gd_p^3}{\mu_A^2}$$

$$Ar = \frac{0,3143(1700 - 0,3143)(9,81)(0,0012)^3}{(44,83 \times 10^{-6})^2}$$

$$Ar = 4505,96$$

Para Estado B:

$$Ar = \frac{\rho_{gB}(\rho_p - \rho_{gB})gd_p^3}{\mu_B^2}$$

$$Ar = \frac{1,184(1700 - 1,184)(9,81)(0,0012)^3}{(18,49 \times 10^{-6})^2}$$

$$Ar = 99732,56$$

3.7.3. Número de Reynolds

$$Re_{mf} = (C_1^2 + C_2 Ar)^{0,5} - C_1$$

Donde:

C_1 : Constante (27,2)

C_2 : Constante (0,0408)

Para Estado A:

$$Re_{mf} = (27,2^2 + 0,0408 \times 4505,96)^{0,5} - 27,2$$

$$Re_{mf} = 3,1847$$

Para Estado B:

$$Re_{mf} = (27,2^2 + 0,0408 \times 99732,56)^{0,5} - 27,2$$

$$Re_{mf} = 42,0744$$

3.7.4. Velocidad Mínima de Fluidización (U_{mf})

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \mu}{d_p \rho_g}$$

Para Estado A:

$$U_{mf} = \frac{(3,1847) \times 44,83 \times 10^{-6}}{0,0012 \times 0,3143}$$

$$U_{mf} = 0,3785 \text{ m/s}$$

Para Estado B:

$$U_{mf} = \frac{(42,0744) \times 18,49 \times 10^{-6}}{0,0012 \times 1,184}$$

$$U_{mf} = 0,5475 \text{ m/s}$$

3.7.5. Velocidad Mínima de la Burbuja (U_{mb})

Como las partículas son de tipo D, se cumple la ecuación:

$$U_{mb} = U_{mf} = 0,5475 \frac{m}{s} \quad (25^\circ C)$$

3.7.6. Velocidad Terminal de la Partícula de tamaño d_p

Debido a que , $\rho_p d_p = 1700 \times 0,0012 = 2,04$, está en un intervalo mayor 0,7. Se usó las siguientes ecuaciones:

$$U_t = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \left[\frac{Ar}{7,5} \right]^{0,666}$$

Para estado A:

$$U_t = \frac{44,83 \times 10^{-6}}{0,0012 \times 1,184} \left[\frac{4505,97}{7,5} \right]^{0,666}$$

$$U_t = 8,427 \frac{m}{s}$$

Para estado B:

$$U_t = \frac{18,5 \times 10^{-6}}{0,0012 \times 0,3143} \left[\frac{99732,56}{7,5} \right]^{0,666}$$

$$U_t = 7,248 \frac{m}{s}$$

3.7.7. Velocidad Mínima de Slugging ($25^\circ C$)

$$U_{sl} = U_{mf} + 0,07(gD)^{0,5}$$

D : diámetro del lecho

$$U_{sl} = 0,3785 + 0,07(9,81 \times 0,914)^{0,5}$$

$$U_{sl} = 0,607 \text{ m/s}$$

3.7.8. Burbujeo en régimen turbulento

3.7.6.1. Velocidad de inicio para la fluidización turbulenta (25°C)

$$Re_c = 0,936 Ar^{0,472}$$

$$u_c = \frac{Re_c \mu}{d_p \rho_g}$$

Ar : 99732,56

$$Re_c = 0,936 (99732,56)^{0,472}$$

$$Re_c = 214,15$$

$$u_c = \frac{214,15 \times 18,5 \times 10^6}{1200 \times 1,184}$$

$$u_c = 2,786 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.7.6.2. Velocidad para completar la transición a la fluidización turbulenta (850°C)

$$Re_k = 1,41 Ar^{0,472}$$

$$u_k = \frac{Re_k \mu}{d_p \rho_g}$$

$$Re_k = 1,41 (4505,97)^{0,472}$$

$$Re_k = 77,43$$

$$u_k = \frac{77,43 \times 44,8 \times 10^6}{1200 \times 0,3143}$$

$$u_k = 9,2041 \frac{m}{s}$$

3.8. Área de sección transversal del lecho

El área de la sección transversal del lecho también se pudo determinar por la velocidad de fluidización:

$$A_{lecho} = \frac{G_g}{\rho_{FG} * U_f}$$

Donde:

G_g : flujo masico de los gases de combustion ($\frac{kg}{s}$)

ρ_{FG} : densidad de los gases de combustion ($\frac{kg}{m^3}$)

U_f : Velocidad de fluidizacion en el lecho ($\frac{m}{s}$)

$$A_{lecho} = \frac{1037,15}{3600 * 0,3132 * 1,5}$$

$$A_{lecho} = 0,6132 m^2$$

Teniendo en cuenta el área circular del lecho, se considero:

$$\pi r^2 = 0,6132 m^2$$

$$r = 0,441 m$$

$$D = 0,882 m$$

3.9. Rejilla de distribución de aire

3.9.1. Porosidad o Vacío de la cama del lecho

$$\varepsilon = \frac{U + 1}{U + 2}$$

U : velocidad de fluidizacion ($1,5 \frac{m}{s}$)

$$\varepsilon = \frac{1,5 + 1}{1,5 + 2}$$

$$\varepsilon = 0,714$$

3.9.2. Caída de presión en la cama del lecho

Se calculó la caída de presión en la cama del lecho. Considerando una profundidad de 1 m.

$$\Delta P_b = \rho_p(1 - \varepsilon)Hg = \rho_p(1 - \varepsilon_{mf})H_{mf}g$$

$$\Delta P_b = \rho_p(1 - \varepsilon)H_g$$

$$\Delta P_b = 1700(1 - 0,714) \times 1 \times 9,81$$

$$\Delta P_b = 4764 \text{ Pa}$$

Tomando en cuenta la porosidad de mínima fluidización de la arena $\varepsilon_{mf} = 0,46$.

3.9.3. Altura Mínima de Fluidización

Hallamos la altura de mínima fluidización:

$$H_{mf} = \frac{H(1 - \varepsilon)}{1 - \varepsilon_{mf}}$$

$$H_{mf} = \frac{1(1 - 0,714)}{1 - 0,46}$$

$$H_{mf} = 0,529 \text{ m}$$

Asumiendo el diámetro del orificio de 1,5 mm(d_o) (Basado en la experiencia del autor del Libro Prabir)

3.9.4. Caída de Presión en Plato distribuidor

Para una uniforme fluidización se cumple la siguiente ecuación en la caída de presión de la rejilla.

$$\Delta P_d = \left\{ \frac{H}{H_{mf}} - 1 \right\} \times \Delta P_b$$

$$\Delta P_d = \left\{ \frac{1}{0,617} - 1 \right\} \times 4764$$

$$\Delta P_d = 4240,72$$

Velocidad del Orificio:

$$U_0 = C_D \left[\frac{2\Delta P_d}{\rho_{gor}} \right]$$

C_D : Constante (0,8)(Zenz, 1981)

ρ_{gor} : densidad del gas que atraviesa el orificio

Es muy probable que el gas que atraviesa el orificio sea calentado por conducción desde el distribuidor del plato. Suponiendo que la temperatura se eleva a 300°C. Por lo cual la temperatura promedio del gas es:

$$25 + \frac{300}{2} = 175 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De las tablas de propiedades del aire:

$$\rho_{gor} = 0,788 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$U_0 = 0,8 \left[\frac{2 \times 4240,72}{0,788} \right]$$

$$U_0 = 82,99 \text{ m/s}$$

Esto es más alto que el valor óptimo, pero menor que el valor máximo permitido de 90 m/s.

3.9.5. Numero de Orificios

Para una temperatura de lecho 850°C ($\rho_g = 0,31 \text{ kg/m}^3$)

$$N = \frac{U\rho_g}{U_0\rho_{gor} \frac{\pi}{4} (d_o)^2}$$

$$N = \frac{1,5 \times 0,31}{82,99 \times 0,788 \left(\frac{\pi}{4}\right) (0,0015)^2}$$

$$N = 4023 \text{ orificios/m}^2$$

Con un área del plato de distribuidor:

$$A_{lecho} = A_{plato \text{ distribuidor}}$$

$$A_{plato \text{ distribuidor}} = 0,9198 \text{ m}^2$$

3.9.6. Distancia entre orificios

Se supuso que los orificios están en paso triangular:

$$N = \frac{2}{\sqrt{3}P^2}$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}N}}$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}(4023)}}$$

$$P = 0,0169 \text{ m} = 17 \text{ mm}$$

Con un área del plato de distribuidor:

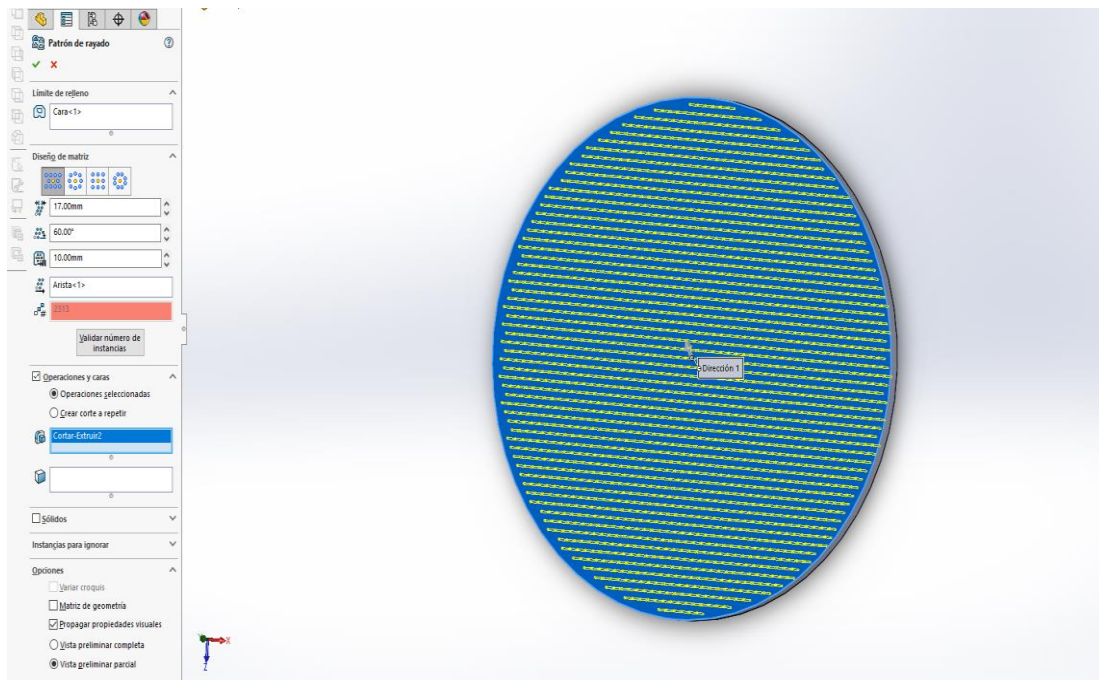
$$N^\circ \text{ de orificios} = N \times A_{plato \text{ distribuidor}}$$

$$N^\circ \text{ de orificios} = 4023 \times 0,632$$

$$N^\circ \text{ de orificios} = 2542$$

Y se consideró un margen de 10 mm con un grosor de 40 mm en el plato distribuidor de aire.

Figura 27: Platillo distribuidor de Aire diseñado



Fuente: Elaboración Propia

3.10. Altura del lecho fluidizado burbujeante

El lecho fluidizado burbujeante este compuesto por 2 partes, una de ella es la cama o lecho y el otro es el francobordo.

$$H_{Horno} = H_{cama} + H_{francobordo}$$

3.10.1. Altura de la cama

La altura general para estos tipos de lechos es de un rango entre 0,4 a 1,5 m. Sin embargo, es muy importante que el tiempo de residencia para capturar el óxido de azufre sea mínimo de 2 a 3 segundos. [4]

$$\frac{H - H_{mf}}{H_{mf}} = \frac{U - U_{mf}}{U_{mf}}$$

$$\frac{H - 0,529}{0,529} = \frac{1,5 - 0,5475}{0,5475}$$

$$H_{cama} = 1,449 \text{ m}$$

3.10.2. Altura del francobordo

Debido a que esta sección está ausente de cambios drásticos de fluidización y combustión,

se asumió en 1 m.

$$H_{Horno} = H_{cama} + H_{francobordo}$$

$$H_{Horno} = 1,45 + 1$$

$$H_{Horno} = 2,45 \text{ m}$$

3.11. Volumen del lecho fluidizado

$$V = H * A_{lecho}$$

$$V = 2,45 * 0,632$$

$$V = 1,5484 \text{ m}^3$$

3.12. Tiempo de residencia

$$t_r = \frac{V_C \rho_{FG}}{\dot{m}_F \bar{m}_{FG}} * 3600$$

$$t_r = \frac{(1,5484)(0,3132)}{(70)(14,8165)} * 3600$$

$$t_r = 1,63 \text{ s} \approx 2 \text{ seg}$$

3.13. Transferencia de Calor en lecho fluidizado burbujeante

3.13.1. Coeficiente de transferencia de calor en convección y radiación en el interior del lecho

$$h_r + h_c = C_d C_T C_u C_{pd}$$

Donde:

C_d : Coeficiente del diametro de la particula del Anexo 5 (1,035)

C_T : Coeficiente de Temperatura del lecho del Anexo 5 ($265 \frac{W}{m^2 K}$)

C_u : Coeficiente de velocidad superficial del Anexo 5 (1,03)

C_{pd} : Coeficiente particula – densidad del Anexo 5 (0,95)

$$h_r + h_c = C_d C_T C_u C_{pd}$$

$$h_r + h_c = 1,035 * 265 * 1,03 * 0,95$$

$$h_r + h_c = 268,37 \frac{W}{m^2K}$$

3.13.2. Refractario y aislamiento

La capa protectora para el aislamiento térmico del horno está compuesta por castable, ladrillo refractario, lana mineral y acero galvanizado. Debido a la complejidad de la ecuación y las incógnitas por resolver, se optó por usar estos materiales comerciales y sus características físicas como térmicas [9] [13] [14] [14]

- **Castable Repsa**

Su conductividad térmica del castable a 850°C es : $k_{12} = 0,93 \frac{W}{m.K}$ y la aplicación de 10 mm de este material

$$\text{Radio interior: } R_{1Horno} = 0,441 m + 0,01 m = 0,451 m$$

- **Ladrillo Refractario Repsa Harkon K-23**

Su conductividad térmica del ladrillo castable a 850°C: : $k_{23} = 0,5 \frac{W}{m.K}$ y sus dimensiones son de 228,6 mm × 114,3 mm × 63,5 mm (9×4" 1/2 × 2" 1/2)

$$\text{Radio interior: } R_{2Horno} = 0,451 m + 0,114 m = 0,565 m$$

- **Lana Mineral**

Su conductividad térmica de la lana mineral a 850°C: $k_{34} = 0,0225 \frac{W}{m.K}$ y la aplicación de 25,4 mm de espesor del material.

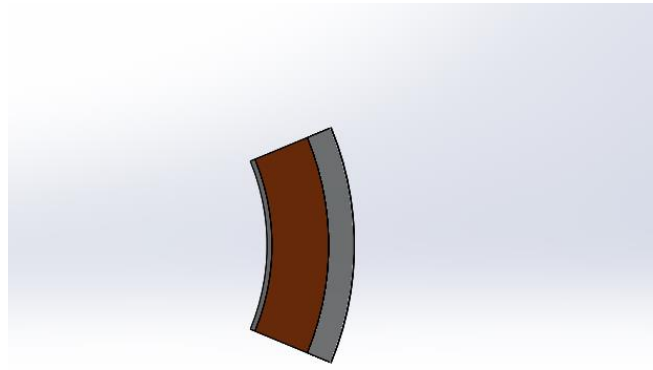
$$\text{Radio interior: } R_{3Horno} = 0,565 m + 0,0508 m = 0,6158 m$$

- **Acero galvanizado A-653**

Su conductividad térmica del acero galvanizado a 850°C: $k_{45} = 50 \frac{W}{m.K}$ y un espesor de 1 mm de este material.

$$\text{Radio interior: } R_{4Horno} = 0,6158 m + 0,001 m = 0,6168 m$$

Figura 28: Radios y materiales en el flujo de calor del sistema del horno



Fuente: Elaboración propia

3.13.3. Flujo de Calor del sistema

$$q = \frac{T_{1\infty} - T_{3\infty}}{\frac{1}{2\pi R_1 L h_1} + \frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right)}{2\pi k_{12} L} + \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_{23} L} + \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2\pi k_{34} L} + \frac{\ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right)}{2\pi k_{34} L} + \frac{1}{2\pi R_4 L h_2}}$$

Donde:

$T_{1\infty}$: Temperatura de operación del lecho fluidizado (850°C)

$T_{3\infty}$: Temperatura del ambiente (25°C)

h_1 : Coeficiente de convección en el lecho fluidizado

h_2 : Coeficiente de convección forzado en el diametro exterior del lecho

Para poder conseguir el h_2 , se recurrió a la relación del número de Reynolds, el número de Prandtl y el número de Nusselt. Considerándose las siguientes ecuaciones: [14]

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k} = C Re^n Pr^{1/3}$$

$$Re = \frac{u_\infty D}{\nu}$$

Donde:

u_∞ : Velocidad del aire en el ambiente (chiclayo) $\left(15 \frac{km}{h}\right)$

D : Diametro exterior del lecho (1,233 m)

C y n : Constantes de la Tabla

k : Conductividad termica del aire a 25°C $\left(0,02551 \frac{W}{m * K}\right)$

ν : viscosidad del aire a 25°C $\left(15,68 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}\right)$

Pr : Numero de Prandtl (0,7296)

Entonces:

$$Re = \frac{4 * 1,233}{15,68 * 10^{-6}} = 314540$$

Figura 29. Cuadro de constantes para Reynolds

Re	C	n
0.4 – 4	0.989	0.330
4 – 40	0.911	0.385
40 – 4 000	0.683	0.466
4 000 – 40 000	0.193	0.618
40 000 – 400 000	0.0266	0.805

Fuente: J. M. Valadez, «Trasferencia de Calor,» Alfaomega, México, 2002 [9]

Por lo tanto, correspondió una constante $C = 0,0266$ y un $n = 0,805$

$$\overline{Nu} = C Re^n Pr^{1/3}$$

$$\overline{Nu} = 0,0266 * 314540^{0,805} * 0,7296^{1/3}$$

$$\overline{Nu} = 631,71$$

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k}$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}k}{D}$$

$$\bar{h} = \frac{631,71 * 0,02551}{1,233}$$

$$\bar{h} = 13,4436 \frac{W}{m * K} = h_2$$

$$q = \frac{850 - 25}{\frac{1}{2\pi R_1 L h_1} + \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_{12} L} + \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2\pi k_{23} L} + \frac{\ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right)}{2\pi k_{34} L} + \frac{1}{2\pi R_4 L h_2}}$$

$$q = \frac{850 - 25}{\frac{1}{1821,87} + \frac{\ln\left(\frac{0,451}{0,441}\right)}{14,31} + \frac{\ln\left(\frac{0,565}{0,451}\right)}{7,69} + \frac{\ln\left(\frac{0,6158}{0,565}\right)}{0,346} + \frac{\ln\left(\frac{0,6168}{0,6158}\right)}{769,69} + \frac{1}{127,611}}$$

$$q = \frac{825}{5,488 \times 10^{-4} + 1,566 \times 10^{-3} + 0,02928 + 0,248574 + 2,108 \times 10^{-6} + 7,836 \times 10^{-3}}$$

$$q = 2866,5 \text{ W}$$

3.13.4. Temperatura de la pared Exterior

Por motivo de seguridad y operatividad del lecho fluidizado burbujeante es recomendable que la temperatura máxima de la pared exterior sea de 50°C. Por consiguiente, se calculó esta temperatura en base al flujo de calor en el sistema de aislamiento, la temperatura de ambiente y el radio hasta la última capa. [9]

$$q = \frac{T_{pared\ exterior} - 25}{\frac{1}{2\pi R_4 L h_2}}$$

$$2866,5 = \frac{T_{pared\ exterior} - 25}{\frac{1}{2\pi(0,6168)(2,45)(13,44)}}$$

$$T_{pared\ exterior} - 25 = 2866,5 \times 7,836 \times 10^{-3}$$

$$T_{pared\ exterior} - 25 = 22,46^\circ\text{C}$$

$$T_{pared\ exterior} = 47,46^\circ\text{C}$$

3.14. Diámetro Mínimo de la puerta de Alimentación de combustible

En lechos de fluidización burbujeantes es común el uso de tolvas de alimentación y rodillos sin fin. Por lo cual, la entrada de suministro tiende a ser circular.

Para el cálculo de esta entrada, se tomó en cuanto la densidad de la cascarilla, el flujo de alimentación por minuto y el espesor total de los aislamientos.

$$\rho_{cascarilla} = 500 \frac{kg}{m^3}$$

$$\dot{m} = 70 \frac{kg}{h} = \frac{1,16 kg}{min}$$

$$e_{total} = 0,6168 - 0,441 = 0,1758 m$$

Además, el flujo volumétrico mínimo en la entrada de cascarilla de arroz.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_{cascarilla}} = \frac{1,16}{500} = 2,32 \times 10^{-3} \frac{m^3}{min}$$

Por lo tanto, el área ocupada en un minuto es:

$$V = A \times e_{total}$$

$$2,32 \times 10^{-3} = A \times 0,1758$$

$$A = 0,0131 m^2$$

$$\pi \frac{D^2}{4} = 0,0131$$

$$D_{entrada\ combs.\ min} = 0,129 m$$

3.15. Selección Conceptual de equipos

3.15.1. Selección de Ventiladores

Para la selección de ventiladores, se basó en el caudal de aire ingresante en el horno y la proporcionalidad entre flujo de aire primario y secundario.

$$Q_{aire\ horno} = 0,238 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{aire\ horno} = 856,8 \frac{m^3}{h}$$

3.15.1.1. Aire Primario y Secundario

El flujo másico del aire primario, según la literatura revisada, varía entre 50 y 80% del aire requerido y calculado; para nuestros cálculos se trabajó con el 70%. [4] [5] [6]

$$Q_{aire\ primario} = Q_{aire\ horno} \times 0,7$$

$$Q_{aire\ primario} = 599,76 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{aire\ secundario} = Q_{aire\ horno} \times 0,3$$

$$Q_{aire\ secundario} = 257,04 \frac{m^3}{h}$$

Por lo tanto, se seleccionó los siguientes ventiladores:

- Ventilador Centrifugo GRE 160/62 R de $625 \frac{m^3}{h}$ para el aire primario
- Ventilador Centrifugo GRE 133/49R 255 $\frac{m^3}{h}$ para el aire secundario

3.15.1.2. Ventilador del Intercambiador de Calor

Para el ventilador del intercambiador de calor, se usó un ventilador axial monofásico Siemens de $3646 \frac{m^3}{h}$.

Elemento	Marca	Modelo	Voltaje	Caudal	Potencia	Característica
Ventilador Axial	Siemens	2CC2 354	220 V	$3636 \frac{m^3}{h}$	0,11 kW	Motor en Carcasa de acero, totalmente cerrado

3.15.2. Selección de Quemador

Para el quemador se seleccionó en base a la potencia del horno

$$Pot_{Horno} = 285,483 \text{ kW}$$

Elemento	Marca	Modelo	Potencia Mínima	Potencia Máxima	Dimensión	Característica
Boca de Fuego y Ventilador	EQA	76	139,5 kW	290,75kW	50,8 mm	Con cabeza de acero inoxidable 304- AISI 304

3.16. Diseño del intercambiador de Calor

Para el diseño el intercambiador de calor se definieron algunos parámetros que están sujetos a las especificaciones de las secadoras SUNCUE e intereses de la empresa Molino “El Misti”.

3.16.1. Parámetros de diseño y condiciones establecidas

- Tubos de acero inoxidable de 2" de diámetro. (ASTM A-192, ASTM A-249)
- El fluido exterior a los tubos es el aire impulsado por el ventilador.
- El fluido interior en los tubos es el gas proveniente del hogar de combustión.
- La distribución de los tubos será en arreglo escalonado triangular.

3.16.2. Separación transversal (ST) y longitudinal (SL)

Para determinar dichas separaciones se tomó como referencia la norma internacional T.E.M.A. (Tubular Exchanger Manufacturers Association) la cual indica que la separación transversal *mínima* es $1.25 * De$ y la *máxima* $2 * De$ para intercambiadores de tubos y coraza, donde De es el diámetro exterior de los tubos. Para determinar SL, depende si el arreglo es cuadrado o escalonado (triangular). [12]

Teniendo en cuenta dicha norma, *se tomó como criterio* el valor de ST $1.45 * De$ y SL igual a $1.1 * ST$, criterio para facilidad de construcción además de estar dentro de las recomendaciones bibliográficas. [12]

3.16.3. Número de Reynolds (Re)

El flujo por la parte externa de los tubos está determinado por diversos factores, entre los que podemos mencionar, espaciado y arreglo de los tubos. Basado en estas consideraciones, el primer parámetro que con frecuencia se desea determinar es el número de Reynolds, el cual está determinado por la siguiente relación. [12]

$$Re = \frac{\rho * V_{max} * De}{\mu}$$

Donde:

Re : Numero de Reynolds

ρ : densidad del fluido (25°C) $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

V_{max} : Velocidad maxima para un arreglo triangular

μ : Viscosidad del fluido (25°C) (pa * s)

De : Diametro externo del tubo (m)

$$V_{max} = \frac{v * S_T}{(S_T - De)}$$

Donde:

S_T : Espacio entre los centros de los tubos, Pitch (m)

v : Velocidad del fluido antes de ingresar al intercambiador ($15 \frac{km}{h}$) ($\frac{m}{s}$)

$$V_{max} = \frac{v * S_T}{(S_T - De)}$$

$$V_{max} = \frac{4,16 * 0,0736}{(0,0736 - 0,0508)}$$

$$V_{max} = 13,48 \frac{m}{s}$$

Por lo tanto:

$$Re = \frac{1,184 * 13,428 * 0,0508}{0,00001849}$$

$$Re = 43680$$

3.16.4. Coeficiente de Convección exterior

Para hallar el coeficiente de convección, se usó la correlación de Zhukaukas.

$$Nu = C * Re_{max}^m * Pr^{0,36} * \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0,25}$$

Donde (1000 < Re < 200000):

m y C : Constantes según el arreglo de tubos y numero de Reynolds

Pr : Número de Prandtl a la temperatura promedio del intercambio (350°C)

Pr_s : Número de Prandtl a la temperatura de salida del gas (25°C)

Nu : Número de Nusselt

k : conductividad térmica del fluido (350°C)

Por lo tanto:

$$m = 0,6$$

$$C = 0,35$$

$$Pr: T_M(350^{\circ}\text{C}) = 0,6937$$

$$Nu = 0,35 * 43680^{0,6} * 0,6937^{0,36} * \left(\frac{0,6937}{0,7296}\right)^{0,25}$$

$$Nu = 179,05$$

Conocido el número de Nusselt, se determinó el coeficiente de convección mediante la siguiente relación. [12]

$$h_o = \frac{Nu * k}{De}$$

$$h_o = \frac{179,05 * 0,04721}{0,0508}$$

$$h_o = 166,39 \frac{W}{m^2K}$$

3.16.5. Temperatura del gas a la salida del Intercambiador

3.16.5.1. Balance de Energía:

Para intercambiadores de calor por convección forzada se sabe que el calor que pierde el gas de combustión (fluido caliente), es el mismo que gana el aire (fluido frío) con lo cual el balance se determinó:

$$Q = m^{\circ}_f * Cp_f * (T_{f2} - T_{f1}) = m^{\circ}_c * Cp_c * (T_{c1} - T_{c2})$$

Además, también se pudo utilizar la correlación de diseño de intercambiadores:

$$Q = F * U * A * \Delta T_{ml}$$

Donde:

m°_f : flujo másico del aire brindado por el ventilador axial (fluido frío)

m°_c : flujo másico del gas (fluido caliente)

Cp_f : capacidad calorífica del aire (25°C)

Cp_c : capacidad calorífica de los gases de combustión

T_{f1} : Temperatura inicial del aire

T_{f2} : Temperatura final del aire

T_{c1} : Temperatura inicial del gas

T_{c2} : Temperatura final del gas

U : Coeficiente de transferencia Global

F : Factor de Corrección para intercambiadores

A : Área del intercambiador

ΔT_{mt} : diferencia de temperaturas media – logarítmica

$$Q = 1,1959 * 1007 * (343 - 298) = 0,288 * 1147,5 * (1123 - T_{c2})$$

$$Q = 54189,49 J$$

De la ecuación anterior todos los datos se conocen menos T_{c2} , de lo cual se despeja.

$$T_{c2} = T_{c1} - \frac{(m^{\circ}_f * Cp_f * (T_{f2} - T_{f1}))}{m^{\circ}_c * Cp_c}$$

$$T_{c2} = 1123 - \frac{1,1959 * 1007 * (343 - 298)}{0,288 * 1147,5}$$

$$T_{c2} = 959 K (686 ^{\circ}C)$$

Además, también podemos utilizar la correlación de diseño para intercambiadores:

$$Q = F * U * A * \Delta T_{ml}$$

3.16.6. Temperatura Media Logarítmica

Conocida la temperatura de salida del gas caliente, se procedió al cálculo de la temperatura media logarítmica dada por: [9]

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{c1} - T_{f1}) - (T_{c2} - T_{f2})}{\ln \left[\frac{(T_{c1} - T_{f1})}{(T_{c2} - T_{f2})} \right]}$$

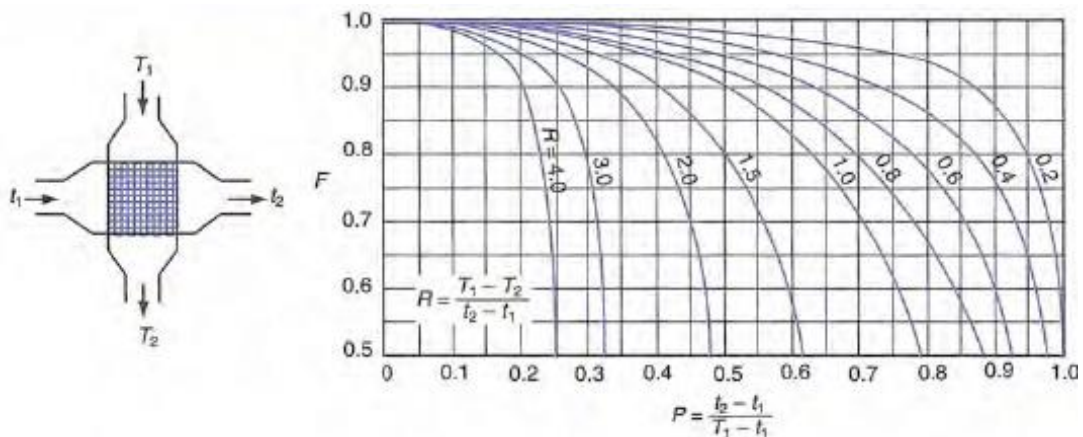
$$\Delta T_{ml} = \frac{(1123 - 298) - (959 - 343)}{\ln \left(\frac{1123 - 298}{959 - 343} \right)}$$

$$\Delta T_{ml} = 715,4 \text{ K}$$

3.16.7. Factor de Corrección

Para este tipo de intercambiadores de calor de flujo cruzado no mezclados, conociendo las temperaturas se calculó el factor de corrección utilizando la gráfica tomada de *Bowman, Mueller y Tagle*. [9]

Figura 30. Grafica del factor de corrección



Fuente: Libro "Transferencia de Calor aplicada a la ingeniería". J.R.Welty [10]

$$R = \frac{1123 - 959}{343 - 298} = 3,64$$

$$P = \frac{298 - 343}{298 - 959} = 0,068$$

$$\therefore F = 0,97$$

Para determinar el Área del intercambiador, se calculó el coeficiente global de transferencia el cual está dado por la relación siguiente: [9]

$$U = \frac{1}{\frac{de}{di * hi} + Ri + \frac{de * \ln\left(\frac{de}{di}\right)}{k} + R_0 + \frac{1}{ho}}$$

3.16.8. Coeficiente de Convección en el interior de los tubos

El gas que circulara por el interior de los tubos, proviene de la combustión completa de la cascarilla de arroz. Por lo tanto, se determinó el Numero de Nusselt.

3.16.8.1. Numero de Nusselt

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000) * Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

Donde:

$$f = 0,316 * Re^{-0,25}$$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{D * \rho * v}{\mu}$$

Número de Prandtl:

$$Pr = \frac{Cp * \mu_g}{k}$$

Donde:

ρ : densidad de los gases de combustion

μ_g : viscosidad absoluta de los gases de combustion

C_p : Capacidad calorifica de la mezcla gaseosa

K : conductividad térmica de la mezcla $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

$$Re = \frac{0,0508 * 0,313 * 9,2043}{3,69377 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 3962$$

$$Pr = \frac{C_p * \mu_g}{k}$$

$$Pr = \frac{1,1475 * 3,6937 \times 10^{-5}}{0,0418}$$

$$Pr = 1,0135$$

$$f = 0,316 * Re^{-0,25}$$

$$f = 0,316 * 3962^{-0,25}$$

$$f = 0,03982$$

Por lo tanto:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000) * Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0,5} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

$$Nu = \frac{\left(\frac{0,03982}{8}\right) (3962 - 1000) * 1,013}{1 + 12,7 \left(\frac{0,03982}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (1,013^{\frac{2}{3}} - 1)}$$

$$Nu = 14,827$$

El coeficiente de convección se calcula a partir de:

$$h_i = \frac{Nu * k}{De}$$

$$h_i = \frac{14,287 * 0,0418}{0,0508}$$

$$h_i = 12,206 \frac{W}{m^2K}$$

3.16.9. Cálculo de Coeficiente global de Transferencia

$$U = \frac{1}{\frac{de}{di * hi} + Ri + \frac{de * \ln(\frac{de}{di})}{k} + R_0 + \frac{1}{ho}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{0,0508}{0,045 * 12,29} + 0,000352 + \frac{0,0508 * \ln(\frac{0,0508}{0,045})}{0,04182} + \frac{1}{166,39}}$$

$$U = 4,063 \frac{W}{m^2K}$$

3.16.10. Área de Transferencia de Calor

$$A_T = \frac{Q}{F * U * \Delta T_{ml}}$$

$$A_T = \frac{54189,489}{0,97 * 4,063 * 715,4}$$

$$A_T = 19,21 m^2$$

3.16.11. Numero de Tuberías

$$N = \frac{A_T}{\pi \times De \times L}$$

Donde:

L: Longitud de la tuberías

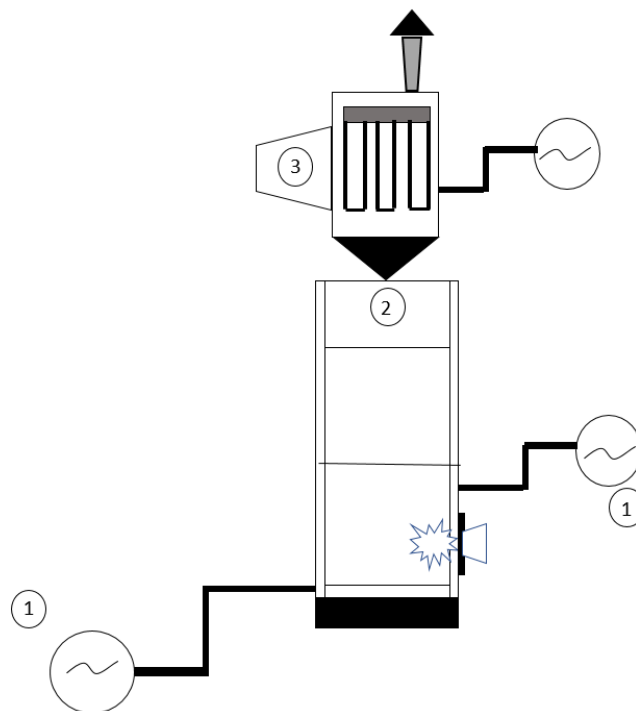
$$N = \frac{19,21}{\pi \times 0,0508 \times 1,5}$$

$$N = 80 \text{ tuberías}$$

3.17. Identificación y Control de los Parámetros de Operación

La identificación de los parámetros de operación nos permitió tener conocimiento de la decisión que se tomara frente a un hecho anormal durante el estado operativo del sistema, evitando de esa manera de perjudicar el secado del arroz cascara. A continuación

Figura 31. Diagrama del Sistema y ubicación de los parámetros de operación



Fuente: Elaboración Propia

1.- Cantidad de aire primaria y secundario insuflado al hogar de combustión

Actuador: Reguladores de frecuencia del Motor TECO L510 2P2

2.- Temperatura del gas de combustión a la entra del intercambiador de calor

Medidor: Termocupla tipo K con registrador de Temperaturas

3. Temperatura del aire a la salida del intercambiador de calor o a la entrada del sistema de secado.

Medidor: Termocupla tipo K con registrador de Temperaturas

Los gases de combustión salientes del hogar estarían a 850°C, sin embargo, existe la posibilidad que salgan a temperaturas mayores de 850°C, para ellos se tendría que controlar el ingreso del aire primero y secundario al hogar de combustión mediante un regulador de frecuencia del motor del ventilador. Si dicha Temperatura es menor a 850°C, como primera medida automática es reducir la cantidad de aire al ingreso del secador hasta verificar los parámetros establecidos de operación.

Si la temperatura al ingreso del secador excede los 70°, en primera instancia se regula el ingreso de la cantidad de aire primario en el hogar de combustión y en segunda instancia controlar el ingreso de aire secundario.

Caso contrario si la temperatura del aire al ingreso del secador disminuye, una acción primaria es disminuir la cantidad de aire al ingreso del secador (mediante un regulador de frecuencia del ventilador axial) y verificar los flujos de aire y cascarilla de arroz al ingreso del hogar de combustión [12]

3.18. Presupuesto de Materiales e implementos utilizados

COSTOS DEL LECHO FLUIDIZADO BURBUJEANTE									
ITEM	ESPESOR	MATERIAL	MEDIDAS		DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	SUBTOTAL	
PLANCHAS									
1	1 mm	Plancha de Acero Galvanizado A-653	1000 mm	2000 mm	Cuerpo del hogar de combustion, transicion de chimenea. Union entre caja de haz de tubos y hogar de combustion, base hogar de combustion.	5	S/.80,00	S/.600,00	
1.1	12 mm	Acero A-285	1828 mm	3658 mm	Placa del suministro piro tubular, compuerta de alimentacion	1	S/.1146,63	S/.1146,63	
1.2	5 mm	Acero A-36	1520 mm	6000 mm	Ducto de Entrada y Salida de Aire	1	S/.265,95	S/.265,95	
1.3	5 mm	Acero Corten- B	1520 mm	6000 mm	Ducto de Chimenea, bafles	1	S/.508,85	S/.508,85	
TUBERIAS PARA INTERCAMBIADOR DE CALOR									
2	0,0029 mm	Acero inoxidable A249	2 pulg	6000 mm	Tubos para intercambiadores con Costura	20	S/.360,00	S/.7200,00	
PLATINAS E(pulg), H (pulg), L(mm)									
3	3/16	3"	6000 mm		A-36	Deflectores	2	S/.25,00	S/.50,00
3.1	3/8	2" 1/2	6000 mm			Brida	5	S/.57,00	S/.285,00
ANGULOS									
4	1/4"	2" 1/2	2" 1/2	6000 mm	A.36	Hogar de Combustion	2	S/.31,29	S/.62,58
VARILLAS									
5	5/8	A-36	6000 mm		Ducto de Entrada		1	S/.47,40	S/.47,40
SUMINISTRO Y ACCESORIOS									
1	Lana Mineral					4	S/.150,00	S/.600,00	
2	Castable Super (BOLSA DE 5kg)					325	S/.15,00	S/.4875,00	
3	Ladrillo Refractario					682	S/.9,50	S/.6479,00	
4	Bolsa de Arena de Rio (45kg)					12	S/.3,00	S/.36,00	
5	Ventilador Centrifugo GRE 160/62RR					1	S/.578,00	S/.578,00	
6	Ventilador Centrifugo GRE 133/49R					1	S/.613,00	S/.613,00	
7	Ventilador Axial Siemens 2CC2 354					1	S/.1113,00	S/.1113,00	
	Termocupla Tipo K con registrador de Temperaturas					2	S/.110,00	S/.220,00	
	Variadores de Frecuencia L510 2P2					2	S/.790,00	S/.1580,00	
8	Quemador EQA mod 76					1	S/.23000,00	S/.23000,00	
							TOTAL	S/.49260,41	
MANO DE OBRA						DIAS DE FABRICACION			
A	SOLDADOR				S/. Por Dia	S/.101,00	36	S/.3636,00	
B	CALDERERO				S/. Por Dia	S/.211,30	1	S/.211,30	
C	ENCOFRADO DEL HORNO Y TERMOCOMPRESOR				S/. Por Dia	S/.500,00	1	S/.500,00	
D	AYUDANTE MULTIFUNCIONAL				S/. Por Dia	S/.50,00	36	S/.1800,00	
							Total	S/.6147,30	

El costo en relación al diseño del Horno (piezas y equipos) se estimó en 49260 nuevos soles y la mano de obra resulta 6147 nuevos soles.

El combustible utilizado es un subproducto gratuito que brinda el Molino el Misti, es por ello que no se considera en la lista de la cotización. Además, el combustible para el quemador solo se usó para prender o generar la chispa de la combustión, por lo q se consideró un precio muy ínfimo o despreciable.

Para la factibilidad del proyecto se elaboró de un plan de evaluación VAN y TIR. Por lo cual, se identificó en que año se recuperara lo invertido en el proyecto. Además de un factor anual de mantenimiento de 10% del costo de inversión.

$$Egresos Anual = 0,1 \times 49260,41 = S/.4926 \text{ Nuevos soles}$$

Por otro lado, con una inversión de 53607,71 soles y una tasa de interés del 13%. Además, el primer año solo se considera el gasto de fabricación y la mano de obra. Sin embargo, la capacidad del horno satisface a una secadora de 32 Ton. Por lo cual puede generar ganancias de servicio de secado:

$$Ganancias Anual = 5 \frac{\text{soles}}{\text{ton}} \times 32 \frac{\text{ton}}{\text{dia}} \times 255 \text{ dias}$$

$$Ganancias Anual = 40800 \text{ Nuevos Soles}$$

IV. RESULTADOS

Los resultados del presente Proyecto de investigación se realizaron en base a otros hornos existentes en el mercado. Por lo cual, esta tesis siguió una metodología a través de ecuaciones empíricas.

Para obtener la cantidad de cascarilla disponible se recolecto y realizo cuadros de producción por cada mes desde los años 2012 hasta 2016. Obteniéndose así, una disponibilidad de 4 ton/día. Sin embargo, debido al consumo de otros hornos existentes, solo se utilizó 70kg/h de cascarilla para el diseño del horno.

Para la determinación de temperatura de operación, se recurrió al cálculo de la temperatura de la flama adiabática con un exceso de aire 2,5. Obteniéndose así, una temperatura de operación de 850°C. Aquella que es recomendable para un lecho fluidizado burbujeante y para el control de gases contaminantes. También, se obtuvo parámetros importantes de combustión como la relación de aire combustible y valores de calentamiento.

Por otro lado, para una efectiva fluidización en el lecho, se utilizó arena de rio con una densidad de 1700 kg/m³ y un diámetro de partícula de 1,2 mm. Por lo cual, se trabajó con una velocidad de fluidización de 1,5 m/s.

Además, gracias a los parámetros de combustión y hidrodinámica de la partícula, el horno obtuvo dimensiones como el área de lecho (0,632 m²) y una altura de 2,45 m. Sin embargo, para un adecuado aislamiento de las paredes del Horno, se recurrió al uso de castable, ladrillo refractario y lana mineral. Por consiguiente, se determinó la temperatura optima de la pared exterior en 47,46°C.

Así mismo, se seleccionó 1 Ventilador Centrifugo GRE 160/62 R de $625 \frac{m^3}{h}$ para el aire primario , 1 Ventilador Centrifugo GRE 133/49R $255 \frac{m^3}{h}$ para el aire secundario

y un quemador EQA 76 d 290,75 kW para generar la chispa de la combustión.

Por ultimo para el diseño del intercambiador de calor, se determinó el uso de 80 tubos de acero inoxidable ASTM 249 con una longitud de 1,5 m. Además de un presupuesto por elaboración de S/. 51540 nuevos soles

V. CONCLUSIONES

- Con el proceso de recolección de datos se pudo identificar que la producción de cascarilla de arroz anual está entre 3 Ton/día y 7 Ton/día. Así mismo los meses de mayor producción son Junio y Julio.
- Las características física y químicas de la cascarilla de arroz más importantes son: Valor de Calentamiento Superior es 17,791 MJ/kg, Valor de Calentamiento Inferior es 14,682 MJ/kg, Humedad 9,4% y su composición química es Carbono 42,3%, Hidrógeno 6,1%, Oxígeno 37,5%, Nitrógeno 1,1%, Ceniza 12,96%
- Los parámetros más importante durante de la combustión usando 70 kg/h de cascarilla de arroz son: Exceso de aire es 2,5 ,Relación aire- Combustible es 13,8165 kg aire/kg combustible, Temperatura adiabática de la llama es 1000° C, Flujo másico ,densidad y masa molar de los gases de combustión es 1037,155 kg/h y 0,3132 kg/m³ , 28,124 kg/kmol correspondientemente. Por otro lado los parámetros de transferencia de calor en el horno son: coeficiente de convección y radiación en el interior del lecho fluidizado es: 268 $\frac{W}{m^2K}$ y el flujo de calor transmitido a través de las paredes de aislamiento es 2866,5 W.
- El material del lecho para la combustión es Arena de Río con una densidad de 1700 kg/m³ y un diámetro de partícula de 1200 μm . Por lo cual, se calculó una área de lecho 0,632 m² y una altura de 2,45 m. Por otro lado, los materiales de aislamiento en la transferencia de calor son Castable Super, Ladrillo Refractario Harkon K-23, Lana Mineral y Acero Galvanizado.
- El costo de inversión o presupuesto para la fabricación del horno ascendió a S/. 55407,71 nuevos Soles, con un valor actual neto(VAN) de 25924,6 nuevos soles y un TIR del 31 %.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Leyva Sánchez, «Diseño de un Sistema de generacion de energia electrica utilizando cascarilla de arroz producido por las molineras de arroz en la Región Lambayeque,» Chiclayo, 2015.
- [2] K. Wark y D. E. Richards, Termodinamica, Madrid: Mc.Graw Hill, 2001.
- [3] Y. A. Cengel y M. A. Boles, Termodinámica, Mexico: Mc. Graw Hill, 2006.
- [4] S. Van Loo y J. Koppejan, The Handbook of Biomass and Co-firing, London: Earthscan, 2008.
- [5] L. Arnesto, L. Bahillo, K. Veijonen, A. Cabanillas , J Otero, «Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed,» *El savier* , vol. 23, nº 23, pp. 171-179, 2002.
- [6] P. Basu, Combustion and Gasifitacion in fluidized Beds, Canada: Taylor & Francis Group. LLC, 2006.
- [7] J. D. M. Angel, «Evaluacion del rendimiento operacional de un gasificador para cascarilla de arroz en reactor de Lecho fluidizado a escala Piloto,» Universidad Pontifica Bolivariana , Medellin, 2005.
- [8] D. Kern, PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, Mexico: Continental, S.A de C.V, 1999.
- [9] J. M. Valadez, «Trasferencia de Calor,» Alfaomega, México, 2002.
- [10] J. R. Welty, Transferencia de calor Aplicada a la Ingenieria, Mexico: Limusa Noriega, 1996.
- [11] H. Haykiri-Acma, S. Yaman y S. Kucukbayrack, «Effect of biomass on temperatures of sintering and initial deformation of lignite ash,» *EISEVIER*, vol. 89, nº 10, pp. 3063-3068, 2010.
- [12] J. E. Pineda Esteves y C. R. Ramos Esquivel, «Diseño de un Sistema Continuo de Secado de Maíz para la empresa Agropecuaria Campo Verde,» Callao, 2015.

- [13] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Fundamentos de Transferencia de Calor 4ed, MEXICO: PRENTICE HALL, 1999.
- [14] F. Kreith, PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR 7° Edicion, CENGAGE LEARNING, 2013.
- [15] J. C. R. González, «Formulas, Tablas y Figuras de Transferencia de Calor,» de *Formulas, Tablas y Figuras de Transferencia de Calor*, España, Campus tecnologico de la Universidad de Navarra, 2007, p. 58.

VII. ANEXOS

Anexo 1: Tablas de ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de combustión

Table 5.1 Overview of advantages, disadvantages and fields of application of various biomass combustion technologies

Advantages	Disadvantages
<p>Grate furnaces</p> <ul style="list-style-type: none"> • low investment costs for plants < 20MW_{th} • low operating costs • low dust load in the flue gas • less sensitive to slagging than fluidized bed furnaces 	<ul style="list-style-type: none"> • usually no mixing of wood fuels and herbaceous fuels possible (only special constructions can cope with such fuel mixtures) • efficient NO_x reduction requires special technologies (combination of primary and secondary measures) • high excess oxygen (5–8vol%) decreases efficiency • combustion conditions not as homogeneous as in fluidized bed furnaces • low emission levels at partial load operation require a sophisticated process control
<p>Underfeed stokers</p> <ul style="list-style-type: none"> • low investment costs for plants < 6MW_{th} • simple and good load control due to continuous fuel feeding and low fuel mass in the furnace • low emissions at partial load operation due to good fuel dosing • low flexibility in regard to particle size 	<ul style="list-style-type: none"> • suitable only for biomass fuels with low ash content and high ash-melting point (wood fuels) (< 50mm)
<p>BFB furnaces</p> <ul style="list-style-type: none"> • no moving parts in the hot combustion chamber • NO_x reduction by air staging works well • high flexibility concerning moisture content and kind of biomass fuels used • low excess oxygen (3–4 Vol%) raises efficiency and decreases flue gas flow 	<ul style="list-style-type: none"> • high investment costs, interesting only for plants > 20MW_{th} • high operating costs • reduced flexibility with regard to particle size (< 80mm) • utilization of high alkali biomass fuels (e.g. straw) is critical due to possible bed agglomeration without special measures • high dust load in the flue gas • loss of bed material with the ash without special measures

Table 5.1 continued

Advantages	Disadvantages
<p>CFB furnaces</p> <ul style="list-style-type: none"> • no moving parts in the hot combustion chamber • NO_x reduction by air staging works well • high flexibility concerning moisture content and kind of biomass fuels used • homogeneous combustion conditions in the furnace if several fuel injectors are used • high specific heat transfer capacity due to high turbulence • use of additives easy • very low excess oxygen (1–2vol%) raises efficiency and decreases flue gas flow 	<ul style="list-style-type: none"> • high investment costs, interesting only for plants > 30MW_{th} • high operating costs • low flexibility with regard to particle size (< 40mm) • utilization of high alkali biomass fuels (e.g. straw) is critical due to possible bed agglomeration • high dust load in the flue gas • loss of bed material with the ash without special measures • high sensitivity concerning ash slagging
<p>Pulverized fuel combustion</p> <ul style="list-style-type: none"> • low excess oxygen (4–6vol%) increases efficiency • high NO_x reduction by efficient air staging and mixing possible if cyclone or vortex burners are used • very good load control and fast alteration of load possible 	<ul style="list-style-type: none"> • particle size of biomass fuel is limited (< 10–20mm) • high wear rate of the insulation brickwork if cyclone or vortex burners are used • an extra start-up burner is necessary

ANEXO 2: Tabla de propiedades del aire seco a presión atmosférica

Colección de tablas, gráficas y ecuaciones de Transmisión de Calor

Tablas 4.4: Propiedades de gases a presión atmosférica

Tabla 4.4.1: Propiedades del aire seco a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
-150	2.867	0.982	8.64	3.013	11.71	4.157	0.7246
-100	2.039	0.965	11.90	5.835	15.82	8.034	0.7263
-90	1.927	0.975	12.49	6.482	16.62	8.842	0.7330
-80	1.828	0.983	13.07	7.153	17.42	9.692	0.7381
-70	1.738	0.990	13.64	7.850	18.22	10.59	0.7414
-60	1.656	0.995	14.20	8.572	19.01	11.53	0.7433
-50	1.582	0.999	14.74	9.317	19.79	12.52	0.7440
-40	1.514	1.002	15.27	10.08	20.57	13.56	0.7436
-30	1.452	1.004	15.79	10.88	21.34	14.65	0.7425
-20	1.394	1.005	16.30	11.69	22.11	15.78	0.7408
-10	1.341	1.006	16.80	12.52	22.88	16.96	0.7387
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.80	0.7350
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.40	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.117	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.110	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228
55	1.076	1.007	19.86	18.46	27.72	25.59	0.7215
60	1.060	1.007	20.08	18.95	28.08	26.31	0.7202
65	1.044	1.007	20.30	19.45	28.45	27.05	0.7190
70	1.029	1.007	20.52	19.95	28.81	27.79	0.7177
75	1.014	1.008	20.74	20.45	29.17	28.55	0.7166
80	0.999	1.008	20.96	20.97	29.53	29.31	0.7154
85	0.986	1.008	21.17	21.48	29.88	30.07	0.7143
90	0.972	1.008	21.39	22.00	30.24	30.85	0.7132
95	0.959	1.009	21.60	22.52	30.60	31.63	0.7121
100	0.946	1.009	21.81	23.05	30.95	32.42	0.7111
110	0.921	1.010	22.23	24.12	31.65	34.02	0.7092
120	0.898	1.011	22.64	25.21	32.35	35.64	0.7073
130	0.876	1.012	23.05	26.32	33.05	37.30	0.7057
140	0.854	1.013	23.45	27.44	33.74	38.98	0.7041
150	0.834	1.014	23.85	28.59	34.43	40.68	0.7027
160	0.815	1.016	24.24	29.74	35.11	42.40	0.7014
170	0.797	1.017	24.63	30.92	35.79	44.15	0.7003
180	0.779	1.019	25.01	32.11	36.46	45.92	0.6992
190	0.762	1.021	25.39	33.32	37.13	47.71	0.6983
200	0.746	1.023	25.77	34.54	37.79	49.53	0.6974
210	0.7306	1.025	26.14	35.78	38.45	51.36	0.6967
220	0.7158	1.027	26.51	37.04	39.10	53.21	0.6960
230	0.7016	1.029	26.88	38.31	39.75	55.08	0.6955
240	0.6879	1.031	27.24	39.60	40.40	56.97	0.6950
250	0.6748	1.033	27.60	40.90	41.04	58.88	0.6946
260	0.6621	1.035	27.95	42.22	41.67	60.81	0.6942
270	0.6499	1.037	28.30	43.55	42.31	62.75	0.6940
280	0.6382	1.040	28.65	44.90	42.93	64.72	0.6938
290	0.6269	1.042	29.00	46.26	43.56	66.69	0.6936
300	0.6159	1.044	29.34	47.64	44.18	68.69	0.6935

Colección de tablas, gráficas y ecuaciones de Transmisión de Calor

Tabla 4.4.1: Propiedades del aire seco a presión atmosférica (cont.)

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
310	0.6054	1.047	29.68	49.03	44.79	70.70	0.6934
320	0.5951	1.049	30.01	50.43	45.40	72.73	0.6934
330	0.5853	1.051	30.35	51.85	46.01	74.77	0.6935
340	0.5757	1.054	30.68	53.29	46.61	76.83	0.6936
350	0.5665	1.056	31.01	54.73	47.21	78.90	0.6937
360	0.5576	1.059	31.33	56.19	47.81	80.99	0.6938
370	0.5489	1.061	31.65	57.67	48.40	83.09	0.6940
380	0.5405	1.064	31.97	59.16	48.99	85.21	0.6943
390	0.5323	1.066	32.29	60.66	49.57	87.34	0.6945
400	0.5244	1.069	32.61	62.18	50.15	89.49	0.6948
410	0.5167	1.071	32.92	63.71	50.72	91.65	0.6951
420	0.5093	1.073	33.23	65.25	51.29	93.83	0.6954
430	0.5020	1.076	33.54	66.80	51.86	96.02	0.6957
440	0.4950	1.078	33.84	68.37	52.42	98.22	0.6961
450	0.4882	1.081	34.15	69.95	52.98	100.4	0.6965
460	0.4815	1.083	34.45	71.54	53.54	102.7	0.6969
470	0.4750	1.085	34.75	73.15	54.09	104.9	0.6973
480	0.4687	1.088	35.04	74.77	54.64	107.2	0.6977
490	0.4626	1.090	35.34	76.40	55.18	109.4	0.6982
500	0.4566	1.093	35.63	78.04	55.72	111.7	0.6986
550	0.4289	1.104	37.07	86.44	58.37	123.3	0.7011
600	0.4043	1.115	38.46	95.12	60.93	135.2	0.7037
650	0.3824	1.125	39.81	104.1	63.41	147.4	0.7064
700	0.3628	1.135	41.11	113.3	65.81	159.8	0.7092
750	0.3450	1.145	42.39	122.8	68.12	172.5	0.7121
800	0.3290	1.153	43.62	132.6	70.37	185.5	0.7149
850	0.3143	1.162	44.83	142.6	72.54	198.7	0.7178
900	0.3009	1.169	46.00	152.9	74.65	212.2	0.7206
950	0.2886	1.177	47.15	163.4	76.70	225.8	0.7233
1000	0.2773	1.184	48.26	174.1	78.68	239.8	0.7260
1100	0.2571	1.196	50.42	196.1	82.48	268.2	0.7312
1200	0.2396	1.207	52.48	219.0	86.09	297.6	0.7360
1400	0.2110	1.226	56.35	267.1	92.81	358.8	0.7444
1600	0.1885	1.241	59.92	317.9	99.08	423.6	0.7506
1800	0.1703	1.253	63.22	371.3	105.10	492.5	0.7539
2000	0.1553	1.264	66.30	426.9	111.10	566.2	0.7539

Fuente: Todas las propiedades de Keenan, Chao, Keyes, "Gas Tables", Wiley, 1985.

Excepto:

Conductividad de Y.S. Touloukian, P.E. Liley, S.C. Saxena "Thermophysical Properties of Matter - Vol 3", IFI/Plenum, NY, 1970

Viscosidad de Y.S. Touloukian, S.C. Saxena, and P. Hestermans "Thermophysical Properties of Matter - Vol 11", IFI/Plenum, NY, 1970

ANEXO 3: Parámetros de Lennard-Jones para la viscosidad Absoluta

Sustancia	σ (Å)	ϵ / κ (K)	Sustancia	σ (Å)	ϵ / κ (K)
H ₂	2.827	59.7	UF ₆	5.967	236.8
He	2.551	10.22	Hg	2.969	750.0
Ne	2.820	32.8	CH ₄	3.758	148.6
Ar	3.542	93.3	C ₂ H ₆	4.443	215.7
Kr	3.655	178.9	C ₂ H ₄	4.163	224.7
Xe	4.047	231.0	C ₂ H ₂	4.033	231.8
aire	3.711	78.6	C ₃ H ₈	5.118	237.1
N ₂	3.798	71.4	CH ₂ =CH-CH ₃	4.678	298.9
O ₂	3.467	106.7	CH≡C-CH ₃	4.761	251.8
H ₂ O	2.649	356	n-C ₄ H ₁₀	4.687	531.4
CO	3.690	91.7	iso-C ₄ H ₁₀	5.278	330.1
CO ₂	3.941	195.2	n-C ₅ H ₁₂	5.784	341.1
COS	4.130	336.0	C(CH ₃) ₄	6.464	193.4
CS ₂	4.483	467.0	n-C ₆ H ₁₄	5.949	399.3
C ₂ N ₂	4.361	348.6	ciclopropano	4.807	248.9
NH ₃	2.900	558.3	ciclohexano	6.182	297.1
NO	3.492	116.7	benceno	5.349	412.3
N ₂ O	3.828	232.4	CH ₃ -OH	3.626	481.8
SO ₂	4.112	335.4	C ₂ H ₅ -OH	4.530	362.6
F ₂	3.357	112.6	CH ₃ -CO-CH ₃	4.600	560.2
Cl ₂	4.217	316.0	CH ₃ -O-CH ₃	4.307	395.0
Br ₂	4.296	507.9	C ₂ H ₅ -O-C ₂ H ₅	5.678	313.8
I ₂	5.160	474.2	CH ₃ Cl	4.182	350.0
HF	3.148	330.0	CH ₂ Cl ₂	4.898	356.3

ANEXO 4: Integral de Colisión para la viscosidad Absoluta

$$T^* = \frac{\kappa T}{\epsilon} \quad \text{o bien} \quad T^* = \frac{T}{\epsilon / \kappa}$$

Tabla 4. Integral de colisión (Lennard-Jones)

T^*	Ω_μ	T^*	Ω_μ	T^*	Ω_μ	T^*	Ω_μ
0.25	3.0353	1.30	1.4000	2.7	1.0700	4.8	0.9326
0.30	2.8458	1.35	1.3760	2.8	1.0591	4.9	0.9288
0.35	2.6791	1.40	1.3538	2.9	1.0489	5.0	0.9252
0.40	2.5316	1.45	1.3331	3.0	1.0394	6.0	0.8948
0.45	2.4003	1.50	1.3139	3.1	1.0304	7.0	0.8719
0.50	2.2831	1.55	1.2959	3.2	1.0220	8.0	0.8535
0.55	2.1781	1.60	1.2791	3.3	1.0141	9.0	0.8382
0.60	2.0839	1.65	1.2633	3.4	1.0066	10	0.8249
0.65	1.9991	1.70	1.2486	3.5	0.9995	12	0.8026
0.70	1.9226	1.75	1.2347	3.6	0.9927	14	0.7844
0.75	1.8535	1.80	1.2216	3.7	0.9864	16	0.7690
0.80	1.7909	1.85	1.2092	3.8	0.9803	18	0.7556
0.85	1.7341	1.90	1.1975	3.9	0.9745	20	0.7439
0.90	1.6825	1.95	1.1865	4.0	0.9690	25	0.7196
0.95	1.6354	2.00	1.1760	4.1	0.9637	30	0.7003
1.00	1.5925	2.1	1.1565	4.2	0.9587	35	0.6844
1.05	1.5533	2.2	1.1388	4.3	0.9539	40	0.6710
1.10	1.5173	2.3	1.1227	4.4	0.9493	50	0.6491
1.15	1.4843	2.4	1.1079	4.5	0.9448	75	0.6111
1.20	1.4539	2.5	1.0943	4.6	0.9406	100	0.5855
1.25	1.4259	2.6	1.0817	4.7	0.9365	150	0.5512

ANEXO 5: Tabla de valores para calcular el coeficiente de convección y radiación del lecho fluidizado burbujeante

TABLE 6.7

Particle-Diameter Coefficients (C_d)

Mean Particle Diameter d_p (mm)	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
C_d	1.035	1.020	1.000	0.980	0.965

TABLE 6.8

Bed-Temperature Coefficients (C_T)

T_{bed} (C)	800	850	900	950	1000	1050	1100
C_T (W/m ² sec K)	256	265	276	285	295	306	316

TABLE 6.9

Superficial-Velocity Coefficients (C_u)

U/U_{mf}	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
C_u	1.03	1.02	1.00	0.98	0.96

U : Superficial velocity through the bubbling fluidized bed (m/sec). U_{mf} : Minimum fluidization velocity (m/sec).

TABLE 6.10

Particle-Density Coefficients (C_{pd})

ρ_p (kg/m ³)	2000	2100	2200	2300	2400
C_{pd}	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02

ANEXO 6: Características del Castable Súper



REFRACTARIOS PERUANOS S.A.

ES-CID-001
Versión: 01
Última Rev.: Abril 2012

HOJA DE DATOS TÉCNICOS (HDT)

Teléfono: 51-1-5151100

Fax: 51-1-4641181

Mail: ventas@repsa.com.pe

www.repsa.com.pe

NOMBRE: CASTABLE SUPER**DESCRIPCIÓN:** Concreto de arcilla de superior refractariedad**PROPIEDADES FÍSICAS****Típico**

Máxima Temp. de Servicio, °C	1482	
°F	2700	
Peso Requerido para Vaciado, kg/m ³	2083	
lb/pie ³	130	
Cantidad de Agua Requerida (*), %	11.1	12.7 máx.
-Para consistencia de vaciado (por bolsa de 25 kg), ℓ	2.8	3.2 máx.
gal	0.73	0.84 máx.
(*) Comenzar a agregar agua con el 80% del valor típico, luego seguir agregando hasta que el material comience a brillar durante el mezclado. No agregar más agua si no es necesario, por que el concreto perderá sus propiedades.		
Densidad Global Después de Secar a 120 °C, kg/m ³	2179	2083 mín.
lb/pie ³	136	130 mín.
Res. a la Comp. Después de Secar a 120 °C, MPa	26.2	13.8 mín.
lb/plg ²	3800	2000 mín.
Cambio Lineal Permanente, %		
Después de Calentar a 815 °C	0.0	
Después de Calentar a 1300 °C	-0.3	

ANÁLISIS QUÍMICO (Aprox. base calcinada), %

SiO ₂	50.0
Al ₂ O ₃	39.7
FeO	1.7
Fe ₂ O ₃	2.7
CaO	5.2
MgO	0.2
Na ₂ O+K ₂ O	0.5



Marzo del 2017

Las propiedades mostradas en esta Hoja representan los promedios típicos de las pruebas realizadas según los métodos de ensayos de las Normas Técnicas Peruanas (NTP), a menos que se indique de otra manera. Los resultados de las pruebas se han obtenido bajo condiciones controladas y no deben ser consideradas como especificaciones de garantía. Las propiedades están sujetas a variaciones estadísticas normales y Refractorios Peruanos S. A. (REPSA) se reserva el derecho de modificar las propiedades y especificaciones en cualquier momento y sin aviso previo por lo que no tiene responsabilidad sobre cualquier garantía expresa o implícita que se pueda deducir de esta HDT. La fecha debajo de la data técnica es la fecha de emisión y, de aquí en adelante, solicite a su representante de ventas una hoja que pueda estar más actualizada.

ANEXO 7: Tabla de conductividades térmicas de algunos aislantes

Subtítulos			
Lana, mineral	9.4	86	0.0225
Lava .....	.....	.....	0.49
Lino .....	.....	86	0.05
Ladrillos			
Alúmina (9299% Al_2O_3 por peso) fundida .....	.....	801	1.8
Alúmina (6465% Al_2O_3 por peso) (Véase también Ladrillos, arcilla re- fractaria)	115	1472	0.62
.....	115	2 012	0.63
Ladrillo para construcción .....	.....	68	0.4
Ladrillo al cromo (32% Cr_2O_3 por peso)	200	392	0.67
.....	200	1202	0.85
.....	200	2 399	1.0
Tierra diatomácea, natural, perpen- dicular al estrato	27.7	399	0.051
.....	27.7	1600	0.077
Diatomácea, natural, paralelo al es- trato	27.7	399	0.081
.....	27.7	1600	0.106
Tierra diatomácea, moldeado y calci- cinado	38	399	0.14
.....	38	1600	0.18
Tierra diatomácea y arcilla, moldea- do calcinado	42.3	399	0.14
.....	42.3	1600	0.19
Tierra diatomácea, alto quemado, poroso	37	392	0.13
.....	37	1 832	0.34
Arcilla refractaria, Missouri .....	.....	392	0.58
.....	.....	1112	0.85
.....	.....	1832	0.95
.....	.....	2 552	1.02
Ladrillo aislante, caolin	27	932	0.15
.....	27	2 102	0.26
Ladrillo refractario aislante, caolin	19	392	0.050
.....	19	1400	0.113
Magnesita (86.8% MgO , 6.3% Fe_2O_3 , 3% CaO , 2.6% SiO_2 por peso)	158	399	2.2
.....	158	1202	1.6
.....	158	2 192	1.1

ANEXO 8: Tabla de propiedades del acero galvanizado

TABLAS DE PROPIEDADES

PROPIEDADES MECÁNICAS			
Calidad	Fluencia (MPa)	Resistencia (MPa)	Elongación %
CS Comercial	—	—	25 mín
SS G33 (230)	230	310	20 mín
SS G40 (275)*	275	380	16 mín
SS G50 (350)**	350	450	-

* a partir de material superior a 0.75 mm

** a partir de material superior a 1.20 mm

PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Material	Densidad(kg/m ³)	Calor específico(J/(kg·K))	Conductividad térmica(W/(m·K))	Difusividad térmica (m ² /s) (x10 ⁻⁶)
Acero galvanizado	7850	460	47-58	13,01-16,06

Propiedades eléctricas

Material	Conductividad eléctrica	Resistividad eléctrica
Acero	(19)*10 ⁶ s m ⁻¹	20* 10 ⁻⁸ [Ω/m]

ANEXO 9: Tabla de conductividad térmica y densidad de materiales de construcción y aislamiento

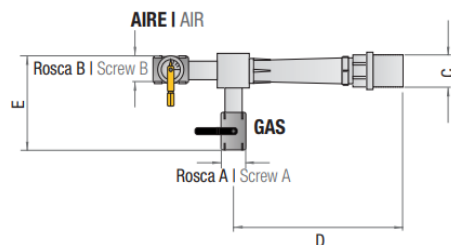
Densidad kg/m ³	Conductividad W/m °K	Material: Pastas y hormigones
305	0.09	Hormigón celular sin áridos
450	0.08	Hormigón de fibra de madera
500	0.12	Hormigón en masa arcilla expandida L
570	0.18	Enlucido de yeso con perlita
600	0.17	Hormigón con áridos ligeros L
800	0.30	Enlucido de yeso
1000	0.33	Hormigón con áridos ligeros M
1500	0.55	Hormigón en masa arcilla expandida P
1600	0.73	Hormigón en masa áridos ligeros
1600	0.87	Mortero de cal o bastardo
2000	1.16	Hormigón en masa sin vibrar
2000	1.40	Mortero de cemento
2100	0.93	Arcilla
2400	1.63	Hormigón en masa vibrado
2400	1.63	Hormigón armado normal

Fuente: NBE-CT-79

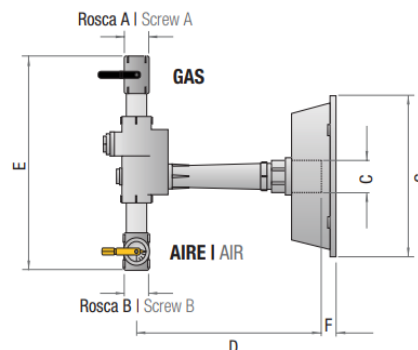
ANEXO 10: Selección del quemador

EQA 76 Dimensiones | Dimensions

- Modelo 76 - 1"
 - Model 76 - 1"



- Modelo 76 - 1.1/2" a 6"
 - Models 76 - 1.1/2" to 6"



DIMENSIONES EN MM | DIMENSIONS IN MM							
Dimensiones Dimensions	Medidas de Quemadores | Burner Sizes						
	1"	1.1/2"	2"	2.1/2"	3"	4"	6"
A	1/2"	1"	1.1/4"	1.1/2"	2"	2"	3"
B	1"	1.1/2"	2"	2.1/2"	3"	4"	4"
C	51	70	85	100	110	147	215
D	185	300	410	490	590	590	710
E	130	340	420	530	550	550	700
F	-	34	37	44	37	20	40
G	-	Ø255	Ø300	Ø365	Ø365	Ø387	Ø560

D : Largo sin Placa Frontal

D + F : Largo con Placa Frontal

D : Longitude without front plate

D + F : Longitude with front plate

Capacidades máximas aconsejadas para las bocas (cabezas) de fuego

Maximum capacities advised according to nozzles sizes

3/4"	15.000 Kcal/h	2.1/2"	450.000 Kcal/h
1"	20.000 kcal/h	3"	600.000 Kcal/h
1.1/4"	60.000 Kcal/h	4"	800.000 Kcal/h
1.1/2"	120.000 Kcal/h	6"	1.300.000 Kcal/h
2"	250.000 kcal/h	8"	2.000.000 Kcal/h

ANEXO 11: Selección de ventilador centrífugo



- Motor de rotor externo protegido por termocontacto
- Velocidad regulable 0-100%
- Turbinas equilibradas estática y dinámicamente según ISO 1940
- Bajo nivel sonoro
- Versión trifásica bajo demanda

[Ficha técnica](#)
[Solicitar más información](#)

Ventilador centrífugo GRE / GRF

Modelo	Tensión V (50 Hz)	Intensidad A	Potencia W	Velocidad rpm	Caudal m ³ /h	Presión Máxima Pa
2GRE15 133/49R	1x230V	0,33	75	2210	255	330
2GRE15 140/59R	1x230V	0,39	88	1245	340	400
2GRE20 140/59R	1x230V	0,56	125	1540	395	440
2GRE25 140/59R	1x230V	0,78	176	2050	515	450
2GRE35 160/62R	1x230V	0,72	165	1565	465	530
2GRE45 160/62R	1x230V	1,12	253	2110	625	610
2GRE43 120/62R	1x230V	0,27	58	1715	260	280
2GRF65 180/52R	1x230V	1,79	411	2145	685	900
4GRE25 160/62R	1x230V	0,34	70	1280	410	160

ANEXO 12: Selección de ventilador Axial

Con motor monofásico

- Diámetro desde 250mm hasta 500mm.
- Caudales desde 0.38 hasta 2.93 m³/s.
- Motor sin interruptor centrífugo, arranque por condensador.
- Tensiones de 110V o 220V a 60Hz.
- Velocidades de 1800 rpm.
- Motor en carcasa de acero, totalmente cerrado.
- Aspa Plástica.
- Pintura electrostática.
- Mallas de protección.
- Grado de protección IP44.

Con motor trifásico


- Diámetros desde 400mm hasta 710mm.
- Caudales desde 1.45 hasta 8.37 m³/s.
- Tensiones de 220/380/440V a 60Hz.
- Velocidades de 1800 y 1200 rpm.
- Motor en carcasa de acero, totalmente cerrado, IP44.
- Aspa Plástica para tipo 2CC2.
- Aspa Aluminio para tipo 2CC1.
- Mallas de protección.
- Grado protección IP44.
- Pintura electrostática.



Con motor monofásico - 110V o 220V - 4 polos - 1800rpm

Diámetro mm	Caudal			Potencia	Descargar PDF	
	m ³ /h	m ³ /s	cfm	kW		
250	1368	0.38	805.2	0.05	Ficha Técnica	Planos
310	2520	0.7	1 483	0.088	Ficha Técnica	Planos
350	3636	1.01	2 140	0.11	Ficha Técnica	Planos
400	5220	1.45	3 072	0.22	Ficha Técnica	Planos
500	10548	2.93	6 208	0.7	Ficha Técnica	Planos

ANEXO 13: Selección de tuberías para el intercambiador de calor




Tubos para Intercambiadores con Costura (WLD) Acero Inoxidable (TUBE) ASTM A249 / ASME SA249

SOLICITAR
COTIZACION

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

Tipo de Producto	Norma ASTM	Aplicación según la norma	Acabado	Longitud	OD (Pulg)	TP 304 / 304 L			TP 321
						1.5mm	0.7mm	0.9mm	
Tubo con costura	A-249	Calderas, supercalentadores, intercambiadores de calor y condensadores	AP (Industrial) BA (Recocido Brillante)	6.10 m	1 1/2"	*	*		
				8.00 m	1 1/2"	*	*		
				10.00 m	1 1/2"		*		
				6.10 m	2"			*	
				6.10 m	2 1/2"				*

ANEXO 14: Selección de variador de frecuencias para el ventilador primario y secundario



Model	200V Class: Single-phase				
	L510- -H1-N *				
	L510- -H1-F *				
	2P2	2P5	201	202	203
Horse Power (HP)	0,25	0,5	1	2	3
Suitable Motor Capacity (KW)	0,2	0,4	0,75	1,5	2,2
Rated Output Current (A)	1,8	2,6	4,3	7,5	10,5
Rated Capacity (KVA)	0,68	1,00	1,65	2,90	4,00
Input Voltage Range(V)	Single-phase 200-240V, 50/60HZ				
Allowable Voltage Fluctuation	-15%+10%				
Output Voltage Range(V)	Three-phase 0-240V				
Input Current (A)	4,9	7,2	11	15,5	21
Allowable Momentary Power Loss Time (Sec.)	1,0				2,0
Enclosure	IP20				
Frame Size	1			2	

ANEXO 15: Constantes para la correlación de Zhukaukas

banco de tubos.

Configuración	$Re_{D,máx}$	C	m
Alineado	$10 - 10^2$	0,80	0,40
Escalonado	$10 - 10^2$	0,90	0,40
Alineado	$10^2 - 10^3$	Se aproxima como un cilindro único	
Escalonado	$10^2 - 10^3$	Se aproxima como un cilindro único	
Alineado ($S_T / S_L > 0,7$)	$10^3 - 2 \cdot 10^5$	0,27	0,63
Escalonado ($S_T / S_L < 2$)	$10^3 - 2 \cdot 10^5$	$0,35(S_T / S_L)^{1/5}$	0,60
Escalonado ($S_T / S_L > 2$)	$10^3 - 2 \cdot 10^5$	0,40	0,60
Alineado	$2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	0,021	0,84
Escalonado	$2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	0,022	0,84

Para $S_T / S_L < 0,7$, la transferencia de calor es ineficiente y los tubos alineados no se deben usar.

ANEXO 16: Calculo de VAN y TIR

Egresos	Año					
	0	1	2	3	4	5
Costos de Fabricación	S/.49 260,41	0	0	0	0	0
Mano de Obra	S/.6 147,30	0	0	0	0	0
Mantemiento	S/.0,00	S/.4 926,04	S/.4 926,04	S/.4 926,04	S/.4 926,04	S/.4 926,04
Costos de Operación	S/.12 750,00	S/.12 750,00	S/.12 750,00	S/.12 750,00	S/.12 750,00	S/.12 750,00
Ingresos	S/.0,00	40800	40800	40800	40800	40800
Beneficio Neto	-S/.55 407,71	S/.23 123,96	S/.23 123,96	S/.23 123,96	S/.23 123,96	S/.23 123,96
Tasa de Intereses	13%					
VAN	S/.25 924,60					
TIR	31%					