

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL  
CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA, INFORMATICA Y  
MECANICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA**



**TESIS**

---

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y  
TÉRMICA DE 25 KW DE POTENCIA A PARTIR DEL USO DE UN GASIFICADOR  
DE BIOMASA”**

---

**PRESENTADO POR:**

Bachiller Barazorda Ramos, Benjamín

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

Ingeniero Mecánico

**ASESOR:**

Dr. Edgar A. Catacora Acevedo

**CUSCO-PERU**

**2020**

## PRESENTACIÓN

La presente tesis titulada “DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA DE 25 KW DE POTENCIA A PARTIR DEL USO DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA” busca presentar una alternativa de aprovechamiento de los residuos agrícolas provenientes del cultivo de café, como es la pulpa de café.

El aprovechamiento de la pulpa de café seca con 15% de humedad es mediante un proceso termoquímico denominado gasificación, el proceso de gasificación consiste en la combustión de la pulpa de café en presencia de oxígeno de forma controlada (25% de una combustión estequiométrica) en un gasificador tipo downdraft, de la cual se obtiene un gas denominado gas pobre.

El gas pobre está compuesto de  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  y  $N_2$ , de ellos el  $CO$ ,  $H_2$  y  $CH_4$  son los que le confieren poder calorífico al gas, siendo  $5332.07 \text{ KJ}/\text{Nm}^3$ .

El gas pobre es enfriado en un intercambiador de calor coraza-tubos antes de su ingreso al generador eléctrico, de la cual se recupera 5.2 KW de energía térmica.

Se genera energía eléctrica empleando como combustible el gas pobre en un generador eléctrico, la potencia eléctrica es de 3.9 KW.

El sistema consta de un sistema de tuberías y ventiladores para el movimiento del flujo de gas y aire. Posee con un punto de acceso para la recarga de combustible biomásico hacia la tolva del gasificador y otro punto de acceso hacia la compuerta del gasificador para la limpieza correspondiente.

*DEDICATORIA:*

*A Dios por su amor y su bondad que no tiene fin, por darme la oportunidad de tener esta vida y por darme la fuerza necesaria para seguir adelante.*

*A mi padre Alejandro Barazorda y a mi madre Alejandrina Ramos, el ejemplo y la pareja perfecta, mi motivo, mi anhelo y mi inspiración en la vida. No son las palabras, sino el ejemplo.*

*A mis hermanos Elizabeth, Abel, Jaime, Rosa, Edwar, Juel y Alex, por esa unión de siempre, por la amistad, la confianza y por siempre estar conmigo sin importar las circunstancias.*

*A mis sobrinos, sobrinas y familia en general, por ser parte de mi vida.*

*AGRADECIMIENTO:*

*A mis docentes de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, mi reconocimiento y gratitud por la experiencia y el conocimiento compartido. A mi escuela profesional de Ingeniería Mecánica, por ser el motivo de muchos sueños y anhelos en mi vida.*

*A mi asesor, el Ing. Dr. Edgar A. Catacora Acevedo, por su constante apoyo moral, académico, por compartir sus experiencias y por su motivación en mi desarrollo profesional.*

*Al Ing. Rene Rosado y a la Ing. Paola Triveño, por su permanente guía en la elaboración de mi trabajo.*

*A mis amigos, por el compartir de 5 años en las aulas universitarias, las experiencias vividas quedan grabadas en el recuerdo y en nuestros corazones.*

*Benjamín Barazorda Ramos.*

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad la gran preocupación de académicos, gobiernos, empresarios y personas naturales es el cambio climático, que inevitablemente a medida transcurren los años se presencia con mayor intensidad. El gran causante del cambio climático son las industrias, ya que éstas emplean como fuentes energéticas combustibles fósiles, las mismas que son extraídas desde el interior de la tierra, siendo resultado de la formación de hace millones de años, de restos de plantas y animales muertos. La combustión de los combustibles fósiles genera emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y otros gases que contribuyen al efecto invernadero, lluvia ácida, contaminación del aire, agua y suelo.

La mejor alternativa de solución permanente a los combustibles fósiles, son las energías renovables. Existen diferentes tecnologías de energías renovables como la solar, geotérmica, mareomotriz, hidráulica y biomásica. El aprovechamiento de la energía biomásica por procesos de gasificación es poco divulgada y conocida en nuestro país, es de ello y como planteamiento de una nueva alternativa de energía, que se realiza la presente tesis titulado “DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA DE 25 KW DE POTENCIA A PARTIR DEL USO DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA”.

Por medio de la presente tesis se estudia y plantea una nueva alternativa energética para el fomento, desarrollando el diseño mecánico y térmico del sistema de generación eléctrica y térmica, además se analiza la competitividad de esta nueva alternativa frente a las existentes y ofertadas en el mercado actual.

La intención es poner en conocimiento la existencia y viabilidad de estos sistemas, para que puedan ser consideradas como políticas y alternativas de desarrollo energético.

## RESUMEN

El desarrollo del trabajo de tesis tiene por objetivo el diseño de un sistema de suministro de energía térmica y eléctrica de 25 KW de potencia a partir del uso de un gasificador de biomasa. El gasificador de 25 KW de potencia es el equipo encargado de transformar el combustible sólido biomásico (pulpa de café) en un combustible gaseoso, este combustible gaseoso (gas pobre) será dirigida hacia un motor de combustión interna para la generación eléctrica de 3.9 KW, previamente a su ingreso al generador eléctrico el gas pobre pasará por un intercambiador de calor, proceso en el que se recupera energía térmica de 5.2 KW.

En el capítulo I, Generalidades; se describe y plantea el problema, objetivos, hipótesis, justificación, alcances y limitaciones, sistema de variables y la metodología.

En el capítulo II, Marco teórico; se desarrolla los conceptos teóricos de biomasa y del sistema de gasificación.

En el capítulo III, Análisis y selección del combustible para Gasificación, se estudia entre varias alternativas de residuos agrícolas, y se selecciona la más adecuada para la gasificación.

En el capítulo IV, Diseño conceptual; se describe el procedimiento de obtención de los conceptos de solución, mediante la directriz del VDI 2221.

En el capítulo V, Diseño mecánico; se dimensiona, se determina materiales y se realizan cálculos para el gasificador, ciclón y generador eléctrico.

En el capítulo VI, Diseño térmico; se realiza calculo térmico para el gasificador y el intercambiador de calor.

En el capítulo VII, Especificaciones técnicas; se describen detalles sobre parámetros de construcción y parámetros de operación.

En el capítulo VIII, Evaluación de costos; se analiza la competitividad del costo de KW instalado y del costo KWh generado del sistema de gasificación.

Obteniéndose los siguientes resultados; para el gasificador; el flujo volumétrico de gas producido es de  $16.88Nm^3/h$  a temperatura de  $338.758\text{ }^{\circ}C$  a partir de un flujo másico de  $6.33\text{ Kg/h}$  a temperatura ambiente de pulpa de café que ingresa, la temperatura en la superficie externa es de  $27.89\text{ }^{\circ}C$ . Para el intercambiador de calor; coraza-tubos, con fluido caliente (gas pobre) que fluye por el interior de los tubos, con temperatura de entrada de  $338.758^{\circ}C$  y temperatura de salida de  $30^{\circ}C$ , con flujo másico de  $0.00455Kg/s$  y con el fluido frío (aire) que fluye por la coraza, con una temperatura de entrada de  $25^{\circ}C$  y temperatura de salida de  $55^{\circ}C$ , con flujo másico de  $0.173\text{ Kg/s}$ . Además, el costo por KW instalado del sistema de generación de energía térmica y eléctrica es competitivo a partir de las 277.8 horas de operación frente a los generadores eléctricos gasolineros.

## ABSTRACT

The objective of the thesis work is to design a thermal and electrical energy supply system based on the use of a 25 KW biomass gasifier. The 25 KW gasifier is the equipment in charge of transforming the biomass solid fuel (coffee pulp) into a gaseous fuel, this gaseous fuel (poor gas) will be directed towards an internal combustion engine for the 3.9 KW power generation, before entering the electric generator, the poor gas will pass through a heat exchanger, a process in which thermal energy of 5.2 KW is recovered.

In Chapter I, Generalities; The problem, objectives, hypothesis, justification, scope and limitations, system of variables and methodology are described and posed.

In Chapter II, Theoretical Framework; The theoretical concepts of biomass and the gasification system are developed.

In Chapter III, Analysis and Selection of Fuel for Gasification, several agricultural waste alternatives are studied, and the most suitable for gasification is selected.

In chapter IV, Conceptual design; The procedure for obtaining the solution concepts is described by means of the VDI 2221 guideline.

In Chapter V, Mechanical Design; It is sized, materials are determined and calculations are made for the gasifier, cyclone and electric generator.

In Chapter VI, Thermal Design; Thermal calculation is performed for the gasifier and heat exchanger.

In Chapter VII, Technical Specifications; details about construction parameters and operation parameters are described.

In Chapter VIII, Cost Evaluation; The competitiveness of the installed KW cost and the generated KWh cost of the gasification system is analyzed.

Obtaining the following results; for the gasifier; The volumetric flow of gas produced is  $16.88Nm^3/h$  at a temperature of  $338.758\text{ }^\circ\text{C}$  from a mass flow of  $6.33\text{ Kg/h}$  at room temperature of coffee pulp entering, the temperature at the external surface is  $27.89\text{ }^\circ\text{C}$ . For the heat exchanger; shell-tubes, with hot fluid (poor gas) flowing inside the tubes, with an inlet temperature of  $338.758^\circ\text{C}$  and an outlet temperature of  $30^\circ\text{C}$ , with a mass flow of  $0.00455\text{Kg/s}$  and with the cold fluid (air) flowing through the shell, with an inlet temperature of  $25^\circ\text{C}$  and an outlet temperature of  $55^\circ\text{C}$ , with a mass flow of  $0.173\text{ Kg/s}$ . In addition, the cost per installed KW of the thermal and electric power generation system is competitive after  $277.8$  hours of operation compared to gas-powered electric generators.



## INDICE GENERAL

PRESENTACIÓN.....	II
INTRODUCCIÓN .....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	V
INDICE GENERAL.....	VII
INDICE DE TABLAS .....	XIV
INDICE DE FIGURAS.....	XVII
NOMENCLATURAS Y SIMBOLOS.....	XXI
LISTADO DE SIGLAS .....	XXVIII
CAPITULO I.....	1
Generalidades .....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Formulación de Problemas.....	2
1.2.1 Problema general.....	2
1.2.2 Problemas específicos técnicos. ....	2
1.2.3 Problema específico económico.....	2
1.3 Planteamiento de Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general. ....	3
1.3.2 Objetivos específicos técnicos. ....	3
1.3.3 Objetivo específico económico. ....	3
1.4 Justificación.....	4
1.5 Alcances y limitaciones.....	4
1.5.1 Alcances. ....	4
1.5.2 Limitaciones.....	5

1.6 Formulación de hipótesis .....	5
1.6.1 Hipótesis general.....	5
1.7 Sistema de Variables .....	5
1.7.1 Variables independientes.....	5
1.7.2 Variables dependientes.....	5
1.7.3 Variables intervinientes.....	5
1.8 Metodología .....	6
1.8.1 Tipo, nivel y estrategia de la investigación.....	6
1.8.2 Población y muestra.....	6
1.8.3 Técnicas de recolección de datos .....	6
1.8.4 Procesamiento y análisis de datos.....	6
CAPITULO II .....	8
Marco Teórico .....	8
2.1 Antecedentes .....	8
2.2 Biomasa.....	10
2.2.1 Tipos de biomasa.....	12
2.2.2 Transformación de la biomasa.....	14
2.2.3 Características de la biomasa como combustible.....	16
2.2.4 Ventajas y desventajas de utilizar biomasa.....	19
2.3 Gasificación.....	20
2.3.1 Etapas o fases de la gasificación.....	22
2.3.2 Reacciones químicas en el proceso de gasificación.....	23
2.3.3 Parámetros del proceso de gasificación.....	25
2.3.4 Tipos de gasificadores.....	29
2.3.5 Ventajas y desventajas de cada tipo de gasificador.....	35

2.4 Otros Conceptos Importantes.....	36
2.4.1 Ciclón.....	36
2.4.2 Eficiencia térmica.....	37
2.4.3 Ventilador.....	38
2.4.4 Intercambiador de calor.....	38
CAPITULO III.....	39
Análisis y Selección del Combustible para Gasificación.....	39
3.1 Producción Agrícola en el Perú.....	39
3.2 Producción Agrícola en el Cusco.....	41
3.3 Características Evaluados de Residuos Agrícolas para Selección como Fuente Combustible .....	42
3.3.1 Densidad aparente.....	42
3.3.2 Humedad.....	43
3.3.3 Granulometría.....	43
3.3.4 Poder calorífico.....	44
3.3.5 Triturado.....	44
3.3.6 Secado.....	44
3.3.7 Producción.....	45
3.3.8 Necesidad de cultivo energético.....	45
3.4 Valoración de los Residuos Agrícolas como Fuente Combustible para Gasificación ...	45
3.5 Residuos Agrícolas del Cultivo de Café, Alternativa para la Gasificación .....	47
3.5.1 Proceso de producción del café.....	47
3.5.2 Estadísticas de producción del café pergamino y pulpa de café (broza de café). ...	51
3.5.3 Análisis inmediato y elemental de la pulpa del café.....	54
3.5.4 Cálculo del poder calorífico de la pulpa de café.....	56

3.5.5 Composición del gas producido a partir de la pulpa de café.....	58
3.5.6 Cálculo del poder calorífico del gas pobre.....	58
CAPITULO IV .....	60
Diseño Conceptual .....	60
4.1 Lista de Exigencias .....	60
4.1.1 Caja negra.....	63
4.1.2 Estructura de funciones .....	64
4.2 Matriz Morfológica de Funciones .....	65
4.3 Conceptos de Solución.....	66
4.3.1 Concepto de solución N° 1.....	66
4.3.2 Concepto de solución N° 2.....	67
4.3.3 Concepto de solución N° 3.....	68
4.4 Evaluación de proyectos .....	70
4.4.1 Valoración técnica.....	70
4.4.2 Valoración económica.....	71
CAPITULO V .....	74
Diseño Mecánico.....	74
5.1 Selección y Cálculo del Sistema de Generación Eléctrica.....	74
5.1.1 Evaluación de diagrama de carga típico eléctrico.....	74
5.1.2 Cálculo del consumo de gas pobre.....	81
5.2 Diseño Mecánico del Gasificador .....	86
5.2.1 Parámetros de diseño del gasificador.....	86
5.2.2 Dimensionamiento del gasificador.....	91
5.2.3 Análisis de resistencia de materiales en el gasificador. ....	100
5.2.4 Análisis de gasificador como tanque a presión. ....	106

5.3 Diseño del Ciclón.....	109
5.3.1 Caída de presión en el ciclón. ....	117
5.4 Caída de Presión en Tuberías de Conducción de Gas y Aire.....	117
5.4.1 Caídas de presión en tuberías y accesorios. ....	118
5.4.2 Tramo recorrido de gas pobre. ....	120
5.4.3 Tramo recorrido de aire.....	125
5.5 Selección de Ventiladores .....	128
5.5.1 Selección del ventilador V1. ....	128
5.5.2 Selección del ventilador V2. ....	129
5.5.3 Selección del ventilador V3. ....	132
5.6 Evaluación de Eficiencias Térmicas .....	134
5.6.1 Eficiencia térmica del sistema de gasificación con respecto a la potencia nominal. .....	134
CAPITULO VI.....	136
Diseño Térmico .....	136
6.1 Diseño Térmico del Gasificador .....	136
6.1.1 Balance de masa en el gasificador.....	136
6.1.2 Balance de energía en el gasificador.....	138
6.1.3 Análisis de transferencia de calor en el gasificador.....	140
6.2 Diseño Térmico para el Intercambiador de Calor .....	151
6.2.1 Normativa aplicable al diseño de intercambiadores de calor.....	152
6.2.2 Calculo del calor específico del gas pobre.....	153
6.2.3 Condiciones térmicas de intercambio de calor (gas pobre-aire). ....	154
6.2.4 Balance global de energía en el intercambiador de calor.....	156

6.2.5 Coeficiente de transferencia de calor por convección del lado de tubos (fluido caliente).....	157
6.2.6 Coeficiente de transferencia de calor por convección del lado de la coraza (fluido frío). .....	158
6.2.7 Calculo de la longitud de tubos. ....	160
6.2.8 Caída de presión del lado de los tubos. ....	166
6.2.9 Caída de presión del lado de la coraza. ....	167
CAPITULO VII .....	171
Especificaciones Técnicas.....	171
7.1 Especificación Técnica Tolva de Gasificador .....	171
7.2 Especificación Técnica Pulpa de Café .....	172
7.3 Especificación Técnica Gas Pobre Producido.....	173
7.4 Especificación Técnica de Gasificador .....	174
7.5 Especificación Técnica de Ciclón .....	175
7.6 Especificación Técnica Intercambiador de Calor.....	177
7.7 Especificación Técnica del Generador Eléctrico .....	177
CAPITULO VIII .....	178
Evaluación de Costos .....	178
8.1 Costo de Equipo .....	178
8.1.1 Costo del sistema de gasificación. ....	178
8.1.2 Costo del intercambiador de calor.....	186
8.1.3 Costo de equipos complementarios.....	186
8.1.4 Costo total de sistema.....	187
8.2 Evaluación de Costos .....	188
8.2.1 Costos.....	188

8.2.2 Evaluación de Costos en sistemas de generación. ....	190
8.2.3 Horas de Operación del Sistema de gasificación. ....	201
CONCLUSIONES .....	204
RECOMENDACIONES .....	206
BIBLIOGRAFÍA.....	207
APÉNDICE .....	211
APÉNDICE 1: Producción de principales cultivos en el Perú 2017 .....	211
APÉNDICE 2. Producción de principales cultivos en el cusco, 2017 .....	215
APÉNDICE 3. Características morfológicas de los principales cultivos en el Cusco. ....	217
APÉNDICE 4. Composición aproximada de los gases a la salida del gasificador .....	226
APÉNDICE 5. Energía eléctrica consumida.....	234
APÉNDICE 6. Planos .....	235
ANEXOS.....	236
ANEXO 1. Ficha técnica de equipos consumidores de energía eléctrica. ....	236
ANEXO 2. Ficha técnica del acero inoxidable C-304L.....	241
ANEXO 3. Ficha técnica del acero inoxidable C-310S.....	243
ANEXO 4. Informe técnico de datos, ventilador V1 .....	244
ANEXO 5. Informe técnico de datos, ventilador V2 .....	246
ANEXO 6. Informe técnico de datos, ventilador V3 .....	248
ANEXO 7. Eficiencia de soldaduras.....	251
ANEXO 8. Tasa de interés anual para el crédito del sistema .....	252
ANEXO 9. Cotización del intercambiador de calor.....	253

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Fuentes de producción de diferentes biocombustibles.....	14
<b>Tabla 2</b> Parámetros físicos, químicos y energéticos de la biomasa .....	17
<b>Tabla 3</b> Ventajas y desventajas de cada tipo de gasificador .....	35
<b>Tabla 4</b> Comparación de diferentes gasificadores de lecho fijo. ....	36
<b>Tabla 5</b> Producción de Principales Cultivos en el Perú 2017 .....	40
<b>Tabla 6</b> Producción de principales cultivos en el cusco, 2017.....	41
<b>Tabla 7</b> Valoración de los residuos agrícolas en el Cusco como fuente de combustible para gasificación .....	46
<b>Tabla 8</b> Composición del grano de café en base seca .....	51
<b>Tabla 9</b> Producción de la pulpa de café en el Perú .....	52
<b>Tabla 10</b> Producción de la pulpa de café en el Cusco.....	53
<b>Tabla 11</b> Análisis elemental e inmediato de la pulpa de café .....	55
<b>Tabla 12</b> Composición elemental de residuos de café en base seca libre de cenizas .....	56
<b>Tabla 13</b> Otros parámetros de la pulpa de café.....	56
<b>Tabla 14</b> Composición aproximada de los gases a la salida del gasificador.....	58
<b>Tabla 15</b> Poder calorífico del gas pobre obtenido de la pulpa de café.....	59
<b>Tabla 16</b> Lista de exigencias.....	60
<b>Tabla 17</b> Valoración técnica .....	70
<b>Tabla 18</b> Valoración económica .....	71
<b>Tabla 19</b> Calificación de las alternativas de solución .....	72
<b>Tabla 20</b> Valoración técnica - económica de las alternativas de solución.....	72
<b>Tabla 21</b> Producción mensual de café en el Cusco.....	75
<b>Tabla 22</b> Equipos requeridos para el beneficio húmedo del café, pequeña productividad .....	77
<b>Tabla 23</b> Especificaciones técnicas del generador seleccionado .....	79
<b>Tabla 24</b> Potencia real del generador eléctrico .....	79
<b>Tabla 25</b> Resumen de potencias para para la microcentral térmica.....	81
<b>Tabla 26</b> Cálculo de la cantidad de aire necesario para una combustión estequiométrica del gas pobre .....	82
<b>Tabla 27</b> Peso por material requerido .....	102



<b>Tabla 28</b>	Limitaciones del código ASME, evaluación del gasificador como tanque a presión.	107
<b>Tabla 29</b>	Parámetros de cálculo de espesor para el cilindro del gasificador.....	109
<b>Tabla 30</b>	Requerimiento del gas pobre para su uso en motores de combustión interna .....	110
<b>Tabla 31</b>	Flujo volumétrico real del gas pobre (338.758 °C) .....	111
<b>Tabla 32</b>	Datos requeridos del material particulado y del gas pobre para el diseño del ciclón .	112
<b>Tabla 33</b>	Dimensionamiento del ciclón .....	114
<b>Tabla 34</b>	Datos para el cálculo de velocidad en el tramo ciclón - intercambiador .....	121
<b>Tabla 35</b>	Datos para el cálculo de caída presión en el tramo ciclón - intercambiador.....	122
<b>Tabla 36</b>	Datos para el cálculo de velocidad en el tramo intercambiador – generador eléctrico	124
<b>Tabla 37</b>	Datos para el cálculo de caída de presión en el tramo intercambiador – generador eléctrico.....	125
<b>Tabla 38</b>	Datos para el cálculo de velocidad en tramo ventilador 3 – intercambiador. ....	126
<b>Tabla 39</b>	Datos para el cálculo de velocidad en tramo intercambiador – salida.....	127
<b>Tabla 40</b>	Parámetros para la selección del ventilador V1 .....	128
<b>Tabla 41</b>	Características del ventilador V1 seleccionado .....	129
<b>Tabla 42</b>	Flujo volumétrico del gas pobre a la salida del intercambiador de calor (30°C).....	131
<b>Tabla 43</b>	Parámetros para la selección del ventilador V2.....	131
<b>Tabla 44</b>	Características del ventilador V2 seleccionado .....	131
<b>Tabla 45</b>	Parámetros para la selección del ventilador V3.....	133
<b>Tabla 46</b>	Características del ventilador V3 seleccionado .....	133
<b>Tabla 47</b>	Datos para cálculo de la energía que entra al sistema de gasificación.....	135
<b>Tabla 48</b>	Datos para cálculo de la energía que sale del sistema de gasificación .....	135
<b>Tabla 49</b>	Resumen del balance de masa en el gasificador .....	138
<b>Tabla 50</b>	Calor específico molar a presión constante en función de la temperatura del gas pobre .....	140
<b>Tabla 51</b>	Longitudes medias de haz $Le$ para varias geometrías de gas.....	145
<b>Tabla 52</b>	Características del intercambiador de calor a diseñar .....	151
<b>Tabla 53</b>	Calor específico de cada componente del gas pobre en unidades de KJ/Kg*K .....	153
<b>Tabla 54</b>	Calor específico del gas pobre .....	154
<b>Tabla 55</b>	Datos y propiedades del fluido caliente (gas pobre).....	155
<b>Tabla 56</b>	Datos y propiedades del fluido frío (aire).....	156

<b>Tabla 57</b> Datos para cálculo del coeficiente convectivo del lado de los tubos .....	157
<b>Tabla 58</b> Datos para cálculo del coeficiente convectivo del lado de la coraza .....	158
<b>Tabla 59</b> Constantes para cilindro circular en flujo cruzado .....	159
<b>Tabla 60</b> Especificaciones técnicas tolva de gasificador .....	171
<b>Tabla 61</b> Especificaciones técnicas pulpa de café .....	172
<b>Tabla 62</b> Especificaciones técnicas gas pobre producido .....	173
<b>Tabla 63</b> Especificaciones técnicas del gasificador .....	174
<b>Tabla 64</b> Especificaciones técnicas del ciclón .....	175
<b>Tabla 65</b> Especificaciones Técnicas Intercambiador de Calor .....	177
<b>Tabla 66</b> Metrado de materiales.....	178
<b>Tabla 67</b> Consumibles.....	180
<b>Tabla 68</b> Horas hombre habilitado, fabricación y montaje .....	181
<b>Tabla 69</b> Horas maquina .....	184
<b>Tabla 70</b> Costo del sistema de gasificación .....	186
<b>Tabla 71</b> Costo de equipos complementarios .....	187
<b>Tabla 72</b> Costo total del sistema de gasificación .....	187
<b>Tabla 73</b> Datos para la evaluación de costos .....	191
<b>Tabla 74</b> Tabulación de costos de KW instalado.....	193
<b>Tabla 75</b> Tabulación de costos de KW instalado.....	194
<b>Tabla 76</b> Tabulación de costos por KWH generado .....	197
<b>Tabla 77</b> Tabulación de costos por KWH generado .....	198
<b>Tabla 78</b> Producción de principales cultivos en el Perú, 2017 .....	211
<b>Tabla 79</b> Producción de principales cultivos en el cusco, 2017.....	215
<b>Tabla 80</b> Datos para cálculo de flujo másico de aire en función de la pulpa seca de café .....	229
<b>Tabla 81</b> Datos para cálculo de la composición del gas pobre a la salida del gasificador.....	232
<b>Tabla 82</b> Composición porcentual del gas pobre obtenido de la pulpa de café a la salida del gasificador.....	233
<b>Tabla 83</b> Energía eléctrica consumida .....	234
<b>Tabla 84</b> Listado de planos .....	235

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Generación de biomasa. ....	11
<b>Figura 2.</b> Ciclo de la biomasa. ....	12
<b>Figura 3.</b> Diagrama de las fases existentes en los procesos de gasificación.....	21
<b>Figura 4.</b> Principio químico del proceso de gasificación.....	22
<b>Figura 5.</b> Objetivos y aplicaciones del gas obtenido por gasificación de la biomasa.....	22
<b>Figura 6.</b> Configuraciones de garganta. ....	28
<b>Figura 7.</b> Diferentes zonas de reacción en gasificador tipo updraft.....	30
<b>Figura 8.</b> Diferentes zonas de reacción en gasificador tipo downdraft.....	31
<b>Figura 9.</b> Diferentes zonas de reacción en gasificador tipo crossdraft. ....	32
<b>Figura 10.</b> Gasificador de tipo cama fluidizada burbujeante. ....	33
<b>Figura 11.</b> Gasificador de tipo flujo arrastrado.....	34
<b>Figura 12.</b> Configuración de un ciclón. ....	37
<b>Figura 13.</b> Diagrama energético.....	37
<b>Figura 14.</b> Tipos de intercambiadores.....	38
<b>Figura 15.</b> Proceso de producción del café. ....	47
<b>Figura 16.</b> Cereza de café. ....	48
<b>Figura 17.</b> Café pergamino húmedo ....	48
<b>Figura 18.</b> Estructura del grano de café. ....	48
<b>Figura 19.</b> Subproceso de beneficio húmedo del café. ....	49
<b>Figura 20.</b> Subproceso del beneficio seco del café.....	50
<b>Figura 21.</b> Subproceso de industrialización del grano de café. ....	50
<b>Figura 22.</b> Producción de la pulpa de café en el Perú en Kilogramos. ....	53
<b>Figura 23.</b> Producción de la pulpa de café en el Cusco en Kilogramos. ....	54
<b>Figura 24.</b> Caja negra.....	63
<b>Figura 25.</b> Concepto de solución N° 01.....	66
<b>Figura 26.</b> Concepto de solución N° 02.....	67
<b>Figura 27.</b> Concepto de solución N° 03.....	68
<b>Figura 28.</b> Gráfico de evaluación técnica - económica de las alternativas de solución.....	73
<b>Figura 29.</b> Producción mensual de café en el Cusco. ....	75

<b>Figura 30.</b> Diagrama de consumo de energía. ....	78
<b>Figura 31.</b> Diagrama general de carga típico eléctrico. ....	80
<b>Figura 32.</b> Temperaturas alcanzadas en diferentes zonas del gasificador. ....	92
<b>Figura 33.</b> Diseño general del gasificador. ....	92
<b>Figura 34.</b> Diámetro, velocidad superficial máxima y carga de hogar de varios gasificadores. .	94
<b>Figura 35.</b> Flujo volumétrico de gas, consumo máximo de combustible y velocidad de aire. ....	95
<b>Figura 36.</b> Dimensionamiento de la garganta. ....	96
<b>Figura 37.</b> Configuración del componente tolva externa del gasificador. ....	98
<b>Figura 38.</b> Configuración del componente tolva interna-reactor del gasificador. ....	98
<b>Figura 39.</b> Configuración de la envoltura del gasificador. ....	99
<b>Figura 40.</b> Configuración de la parrilla del gasificador. ....	100
<b>Figura 41.</b> Fuerza axial total sobre la cobertura exterior. ....	103
<b>Figura 42.</b> Sección transversal más pequeña en la cubierta exterior, a la altura de la abertura para la limpieza. ....	103
<b>Figura 43.</b> Viscosidad y densidad del gas pobre en función de la temperatura. ....	112
<b>Figura 44.</b> Configuración y dimensiones del ciclón. ....	113
<b>Figura 45.</b> Eficiencia del ciclón vs diámetro de partículas. ....	117
<b>Figura 46.</b> Distribución de ventiladores en el sistema de gasificación. ....	118
<b>Figura 47.</b> Relación longitud/diámetro en accesorios. ....	119
<b>Figura 48.</b> Tuberías tramo ciclón – intercambiador. ....	120
<b>Figura 49.</b> Tuberías tramo intercambiador - generador eléctrico. ....	123
<b>Figura 50.</b> Tramo ventilador 3 - intercambiador. ....	126
<b>Figura 51.</b> Tramo intercambiador - salida. ....	127
<b>Figura 52.</b> Grafica de selección de ventilador V1 ....	129
<b>Figura 53.</b> Grafica de selección de ventilador V2 ....	132
<b>Figura 54.</b> Grafica de selección de ventilador V3 ....	134
<b>Figura 55.</b> Configuración de la transferencia de calor en la sección circular del gasificador. ..	142
<b>Figura 56.</b> Circuito de transferencia de calor por la envoltura interna, aislante térmico y cubierta exterior. ....	143
<b>Figura 57.</b> Emisividad de dióxido de carbono en una mezcla con gases no radiantes a 1 atm de presión total y de forma hemisférica. ....	146

<b>Figura 58.</b> Partes de un intercambiador tubos y coraza. ....	152
<b>Figura 59.</b> Factor de corrección para intercambiador de calor de coraza y tubo con una coraza y cualquier múltiplo de dos pasos de tubo (2,4, etc., paso de tubo). ....	161
<b>Figura 60.</b> Constantes C y m para el banco de tubos en flujo cruzado. ....	164
<b>Figura 61.</b> Configuración del intercambiador de calor. ....	166
<b>Figura 62.</b> Arreglos de tubos en un banco (escalonados). ....	167
<b>Figura 63.</b> Configuración del arreglo de tubos para el intercambiador de nuestro trabajo de tesis. ....	168
<b>Figura 64.</b> Factor de fricción $f$ y el factor de correlación $\chi$ . Arreglo de haces de tubos escalonados. ....	169
<b>Figura 65.</b> Costo por KW instalado. ....	194
<b>Figura 66.</b> Costo por KW instalado. ....	196
<b>Figura 67.</b> Costo por KWh generado ....	198
<b>Figura 68.</b> Costo por KWh generado ....	200
<b>Figura 69.</b> Evaluación de costo por KWh generado global ....	202
<b>Figura 70.</b> Morfología de la planta de papa. ....	217
<b>Figura 71.</b> Imagen de la alfalfa. ....	218
<b>Figura 72.</b> Imagen de la avena forrajera. ....	219
<b>Figura 73.</b> Partes de la planta del maíz. ....	220
<b>Figura 74.</b> Imagen de la planta de olluco. ....	221
<b>Figura 75.</b> Imagen de la planta del rye Grass. ....	222
<b>Figura 76.</b> Imagen de la planta del plátano. ....	223
<b>Figura 77.</b> Composición del grano del café húmedo. ....	224
<b>Figura 78.</b> Imagen de la planta de la yuca. ....	225
<b>Figura 79.</b> Ficha técnica de la despulpadora. ....	236
<b>Figura 80.</b> Ficha técnica de la maquina lavadora. ....	237
<b>Figura 81.</b> Ficha técnica de la maquina secadora. ....	238
<b>Figura 82.</b> Ficha técnica de foco ahorrador. ....	239
<b>Figura 83.</b> Ficha técnica del generador eléctrico. ....	240
<b>Figura 84.</b> Composición química y propiedades mecánicas del acero inoxidable C-304L. ....	241
<b>Figura 85.</b> Acabados del acero inoxidable C-304L. ....	242

<b>Figura 86.</b> Ficha técnica del acero inoxidable C-310S.....	243
<b>Figura 87.</b> Informe técnico de datos, ventilador 1 .....	245
<b>Figura 88.</b> Informe técnico de datos, ventilador 2 .....	247
<b>Figura 89.</b> Informe técnico de datos, ventilador 3 .....	250
<b>Figura 90.</b> Eficiencia de soldaduras.....	251
<b>Figura 91.</b> Cotización del intercambiador de calor.....	253

## NOMENCLATURAS Y SIMBOLOS

$Y_{CO}$ :	Fracción de C que se transforma en $CO$	%
$Y_{CO_2}$ :	Fracción de C que se transforma en $CO_2$	%
$\dot{m}_{O_2/CO_2}$ :	Oxígeno consumida para obtención del $CO_2$	$Kg/h$
$\dot{m}_{O_2/CO}$ :	Oxígeno consumida para obtención del $CO$	$Kg/h$
$\dot{m}_{O_2/gasi}$ :	Flujo másico de oxígeno requerido para la gasificación	$Kg/h$
$\dot{m}_{pcs}$ :	Flujo de másico de pulpa de café seca	$Kg/h$
$\dot{m}_{pch}$ :	Flujo de másico de pulpa de café húmeda	$Kg/h$
$\dot{m}_{aire}$ :	Flujo másico de aire requerido para la gasificación	$Kg/h$
$f_C$ :	Carbono presente en la composición elemental de la broza	%
$f_O$ :	Oxígeno presente en la composición elemental de la broza	%
$M_{aire}$ :	Peso molecular del aire	$Kg/Kmol$
$M_{O_2}$ :	Peso molecular del oxígeno	$Kg/Kmol$
$M_C$ :	Peso molecular del carbono	$Kg/Kmol$
$ER$ :	Relación de equivalencia	---
$f_H$ :	Hidrogeno presente en composición elemental de la broza	%
$M_{CO}$ :	Peso molecular del monóxido de carbono	$Kg/Kmol$
$M_{CO_2}$ :	Peso molecular del dióxido de carbono	$Kg/Kmol$
$M_{CH_4}$ :	Peso molecular del metano	$Kg/Kmol$
$M_{H_2}$ :	Peso molecular del hidrogeno	$Kg/Kmol$
$M_{N_2}$ :	Peso molecular del nitrógeno	$Kg/Kmol$
$\dot{m}_{CO}$ :	Flujo másico del monóxido de carbono	$Kg/h$
$\dot{m}_{CO_2}$ :	Flujo másico del dióxido de carbono	$Kg/h$
$\dot{m}_{CH_4}$ :	Flujo másico del metano	$Kg/h$
$\dot{m}_{H_2}$ :	Flujo másico del hidrogeno	$Kg/h$
$\dot{m}_{N_2}$ :	Flujo másico del nitrógeno	$Kg/h$
$PCS_{pc}$ :	Poder calorífico de la pulpa de café	$KJ/Kg$
$PCI_{pc}$ :	Poder calorífico de la pulpa de café	$KJ/Kg$

$h_g$ :	Calor de vaporización del agua	KJ/Kg
$M$ :	Porcentaje de humedad	%
$V_B$ :	Volumen de barrido	$m^3/s$
$rpm$ :	Régimen del motor	$rpm$
$r_{a/c}$ :	Relación aire/combustible	---
$\dot{V}_{gg}$ :	Flujo volumétrico de gas pobre al generador eléctrico	$m^3/s$
$\dot{V}_{mz}$ :	Caudal de mezcla aire combustible	$m^3/s$
$\lambda$ :	Coefficiente de exceso de aire	---
$L_0$ :	Relación aire-combustible	$(m^3/m^3)$
$V_H$ :	Cilindrada del motor	$L$
$n$ :	Máxima velocidad del motor	$rpm$
$\eta_v$ :	Eficiencia volumétrica del motor	%
$Q_g$ :	Potencia del gasificador	$KW$
$\dot{V}_g$ :	Flujo volumétrico de gas producido por el gasificador	$Nm^3/s$
$PC_g$ :	Poder calorífico del gas pobre	$KJ/Nm^3$
$\dot{V}_g$ :	Flujo volumétrico de gas producido por el gasificador	$Nm^3/s$
$Q_g$ :	Potencia del gasificador	$KW$
$PC_g$ :	Poder calorífico del gas pobre	$KJ/Nm^3$
$\dot{V}_{gg}$ :	Flujo volumétrico de gas consumido por el generador	$Nm^3/s$
$P$ :	Presión	$Kpa$
$V$ :	Volumen	$m^3$
$R$ :	Constante universal de los gases (8.314)	$\frac{Kpa \cdot m^3}{Kmol \cdot ^\circ K}$
$T$ :	Temperatura	$K$
$\dot{m}_x$ :	Flujo másico de componente x	$Kg/h$
$M_x$ :	Peso molecular de componente x	$Kg/Kmol$
$\eta_m$ :	Eficiencia mecánica de la gasificación	%
$\dot{m}_{aire}$ :	Flujo másico de aire necesario para la gasificación	$Kg/h$
$\dot{V}_a$ :	Flujo volumétrico de aire necesario para la gasificación	$Nm^3/h$
$T_{cpc}$ :	Tiempo requerido para consumo de pulpa de café	$h$



$\rho_{pc}$ :	Densidad de la pulpa de café	$Kg/m^3$
$V_g$ :	Volumen de almacenamiento del gasificador	$m^3$
$A_g$ :	Área de la garganta	$cm^2$
$\dot{V}_g$ :	Flujo volumétrico de gas producido por el gasificador	$Nm^3/h$
$B_h$ :	Velocidad específica de gasificación	$Nm^3/cm^2 * h$
$D_g$ :	Diámetro de la garganta	$mm$
$d_{iea}$ :	Diámetro interior para entrada de aire	$m$
$\dot{V}_a$ :	Flujo volumétrico del aire	$m^3/s$
$v_e$ :	Velocidad de entrada del aire	$m/s$
$\dot{m}_{H_2O}$ :	Flujo másico de agua	$Kg/h$
$\dot{m}_{cen\ total.}$ :	Flujo total de cenizas	$Kg/h$
$\Delta H$ :	Variación de la entalpia	$KW$
$c_p$ :	Capacidad calorífica molar a presión constante	$KJ/Kmol * K$
$\Delta T$ :	Variación de temperatura	$K$
$T_{SR}$ :	Temperatura del gas pobre a la salida del reactor	$^{\circ}C$
$R_{ii}$ :	Radio interno de la envoltura interna	$m$
$R_{ei}$ :	Radio externo de la envoltura interna	$m$
$R_{ie}$ :	Radio interno de la cubierta externa	$m$
$R_{ee}$ :	Radio externo de cubierta externa	$m$
$T_i$ :	Temperatura en el interior	$K$
$T_e$ :	Temperatura en el exterior	$K$
$T_{si}$ :	Temperatura en la superficie interna de la envoltura interna	$K$
$T_{se}$ :	Temperatura en la superficie externa de la cubierta externa	$K$
$h_i$ :	Coefficiente de convección interior	$W/m^2 * K$
$h_e$ :	Coefficiente de convección exterior	$W/m^2 * K$
$\dot{Q}_t$ :	Calor total trasferido	$W$
$\varepsilon_g$ :	Emisividad del gas	---
$\sigma_g$ :	Constante de Stefan Boltzmann	$W/m^2 * K^4$
$T_g$ :	Temperatura del gas	$K$

$P_{CO_2}$ :	Presión parcial del $CO_2$	<i>atm</i>
$P_{total}$ :	Presión total del gas pobre	<i>atm</i>
$n_{CO_2}$ :	Numero de moles del $CO_2$	<i>mol</i>
$n_{total}$ :	Numero de moles del gas pobre	<i>mol</i>
$\dot{Q}_r$ :	Calor por radiación	<i>W</i>
$q_r$ :	Calor por unidad de área debido a la radiación	<i>W/m<sup>2</sup></i>
$A_s$ :	Area superficial	<i>m<sup>2</sup></i>
$K_{304EI}$ :	Conductividad térmica en envoltura interna	<i>W/m * K</i>
$K_{304CE}$ :	Conductividad térmica en cubierta exterior	<i>W/m * K</i>
$K_{mfc}$ :	Conductividad térmica en aislante térmico	<i>W/m * K</i>
$R_{EI}$ :	Resistencia térmica de la envoltura interna	<i>K/W</i>
$R_{MFC}$ :	Resistencia térmica del aislante	<i>K/W</i>
$R_{CE}$ :	Resistencia térmica de la cubierta exterior	<i>K/W</i>
$R_{CA}$ :	Resistencia convectiva del aire	<i>K/W</i>
$H$ :	Altura del gasificador	<i>m</i>
$\dot{Q}_{cc}$ :	Calor por conducción y convección	<i>W</i>
$R_{TI}$ :	Resistencia térmica en la tapa interior	<i>K/W</i>
$R_{TE}$ :	Resistencia térmica en la tapa exterior	<i>K/W</i>
$w_p$ :	Peso de una plancha de acero inoxidable	<i>Kg/plancha</i>
$w_t$ :	Peso de un tubo de acero inoxidable	<i>Kg/m</i>
$L$ :	Largo de la plancha	<i>m</i>
$A$ :	Ancho de la plancha	<i>m</i>
$E$ :	Espesor	<i>mm</i>
$F$ :	Factor para el inoxidable	<i>---</i>
$F_t$ :	Carga axial	<i>N</i>
$\sigma$ :	Esfuerzo axial de compresión	<i>Mpa</i>
$\tau_{max}$ :	Esfuerzo cortante máximo	<i>Mpa</i>
$FS_a$ :	Factor de seguridad para el esfuerzo axial	<i>---</i>
$FS_c$ :	Factor de seguridad para el esfuerzo cortante	<i>---</i>
$P_{cr}$ :	Carga critica de pandeo	<i>N</i>

$E$ :	Módulo de elasticidad	$Gpa$
$I$ :	Segundo momento del área transversal	$m^4$
$\sigma_{cr}$ :	Esfuerzo critico de Euler	$Mpa$
$P_H$ :	Presión hidrostática	$KN/m^2$
$P_e$ :	Peso específico	$KN/m^3$
$H$ :	Altura de la columna de agua	$m$
$P_O$ :	Presión de operación	$psi$
$P$ :	Presión de diseño	$psi$
$t$ :	Espesor mínimo requerido del cuerpo	$in$
$S$ :	Valor del máximo esfuerzo admisible	$psi$
$E$ :	Eficiencia de la junta	---
$\dot{V}_{xr}$ :	Flujo volumétrico del componente x a temperatura real	$m^3/h$
$W$ :	Velocidad equivalente	$m/s$
$g$ :	Gravedad	$m/s^2$
$V_s$ :	Velocidad de saltación	$m/s$
$K_b$ :	Relación entre el ancho de entrada y el diámetro del ciclón	--
$T_i$ :	Tiempo de relación	$s$
$D_{pi}$ :	Diámetro de la partícula	$\mu m$
$\eta_i$ :	Eficiencia fraccional para una partícula	---
$G$ :	Factor de configuración (tabla 33)	---
$Q$ :	Flujo volumétrico de gas pobre	$m^3/s$
$\Delta P_c$ :	Caída de presión en el ciclón	$pa$
$c_{ph}$ :	Calor específico de la mezcla a presión constante	$KJ/Kg * K$
$x_i$ :	Fracción molar del componente i	---
$c_{pi}$ :	Calor específico del componente i a presión constante	$KJ/Kg * K$
$T_{h,i}$ :	Temperatura de entrada fluido caliente	$^{\circ}C$
$T_{h,o}$ :	Temperatura de salida fluido caliente	$^{\circ}C$
$\bar{T}_h$ :	Temperatura promedio fluido caliente	$^{\circ}C$
$\dot{m}_h$ :	Flujo másico fluido caliente	$Kg/s$
$\rho_h$ :	Densidad fluido caliente	$Kg/m^3$

$c_{ph}$ :	Calor específico fluido caliente	$KJ/Kg * K$
$\mu_h$ :	Viscosidad dinámica fluido caliente	$Kg/m * s$
$\nu_h$ :	Viscosidad cinemática fluido caliente	$m^2/s$
$k_h$ :	Conductividad térmica fluido caliente	$W/mK$
$Pr_h$ :	Numero de prandtl fluido caliente	---
$T_{c,i}$ :	Temperatura de entrada fluido frío	$^{\circ}C$
$T_{c,o}$ :	Temperatura de salida fluido frío	$^{\circ}C$
$\bar{T}_c$ :	Temperatura promedio fluido frío	$^{\circ}C$
$\rho_c$ :	Densidad fluido frío	$Kg/m^3$
$c_{pc}$ :	Calor específico fluido frío	$KJ/Kg * K$
$\mu_c$ :	Viscosidad dinámica fluido frío	$Kg/m * s$
$\nu_c$ :	Viscosidad cinemática fluido frío	$m^2/s$
$k_c$ :	Conductividad térmica fluido frío	$W/mK$
$Pr_c$ :	Numero de prandtl fluido frío	---
$D_{it}$ :	Diámetro interior lado de tubos	$mm$
$D_{ot}$ :	Diámetro exterior lado de tubos	$mm$
$N_t$ :	Numero de tubos	---
$n_c$ :	Pasos de coraza	---
$n_t$ :	Pasos de tubos	---
$D_{ic}$ :	Diámetro interior lado de coraza	$mm$
$D_{oc}$ :	Diámetro exterior lado de coraza	$mm$
$\dot{m}_{h1}$ :	Flujo masico por un tubo	$Kg/s$
$A_{it}$ :	Área interna de tubo	$m^2$
$V_t$ :	Velocidad media del fluido por interior de los tubos	$m/s$
$Re_D$ :	Numero de reynolds	---
$\bar{h}_i$ :	Coefficiente convectivo promedio al interior de los tubos	$W/m^2K$
$A_{idc}$ :	Superficie disponible para el paso del aire por la coraza	$m^2$
$V_c$ :	Velocidad media del fluido por la corza	$m/s$
$\overline{Nu}_D$ :	Número de Nusselt	---
$\bar{h}_o$ :	Coefficiente convectivo promedio al exterior de los tubos	$W/m^2K$

$Q_i$ :	Transferencia calor en el intercambiador	$W$
$R_{tot}$ :	Resistencia térmica total en el intercambiador	$K/W$
$\Delta T_{ml}$ :	Diferencia de temperaturas media logarítmica	$K$
$\Delta P_t$ :	Caída de presión por el lado de los tubos	$pa$
$\Delta P_{ci}$ :	Caída de presión por el lado de la coraza	$pa$
$\eta_{Gnom}$ :	Eficiencia térmica del sistema de gasificación	%
$PCS_{pc}$ :	Poder calorífico superior de la pulpa de café	$Kj/Kg$
$PCI_{pc}$ :	Poder calorífico inferior de la pulpa de café	$Kj/Kg$
$P_{despul}$ :	Productividad mensual de la despulpadora	$Kg/mes$
$Pot_{GE}$ :	Potencia del generador eléctrico	$W$
$Pot_M$ :	Potencia media de operando con gas pobre	$W$
$f_{cgp}$ :	Factor de carga respecto a la operación con gas pobre	%
$f_{cg}$ :	Factor de carga respecto a la operación con gasolina	%
$v_{fc-i}$ :	Velocidad tramo ciclón – intercambiador	$m/s$
$\Delta P_{TCl}$ :	Caída de presión tramo ciclón-intercambiador	$pa$
$v_{fi-g}$ :	Velocidad tramo intercambiador – generador eléctrico	$m/s$
$\Delta P_{TIGE}$ :	Caída de presión tramo intercambiador-generador eléctrico	$pa$
$v_{fv3-i}$ :	Velocidad tramo ventilador 3-intercambiador	$m/s$
$v_{fi-s}$ :	Velocidad tramo intercambiador-salida	$m/s$

**LISTADO DE SIGLAS**

**INEI:** Instituto Nacional de Estadística e Informática

**VDI:** Verein Deutscher Ingenieure (Asociación Alemana de Ingenieros)

**TEMA:** Tubular Exchanger Manufacturer Association (Asociación de Fabricantes de Intercambiadores Tubulares)

**HEDH:** Heat Exchanger Design Handbook (Manual de Diseño del Intercambiador de Calor)

**ASME:** Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos

**ANSI:** American National Standards Institute (Instituto Americano de Estándares Nacionales)

**SIEA:** Sistema Integrado de Estadística Agraria

**DIN:** Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización)

**NPT:** Norma Técnica Peruana



## CAPITULO I

### Generalidades

#### 1.1 Planteamiento del Problema

En el Perú existe una gran cantidad de desechos agrícolas, entre ellas podemos mencionar: cascarilla de arroz, pajas de trigo, pajas de avena, pajas de linaza, mazorca de maíz, panoja de maíz, cascarilla de café, pulpa de café, etc. El Perú produjo 3 069 400 TM de cascarilla de arroz según la fuente de la INEI en el 2017, también la INEI indica en su boletín de producción nacional que la producción de café en el 2016 fue de 277 700 TM, en el 2017 fue de 303 300 TM. Del análisis de estas cifras podemos indicar que en el Perú existe un gran potencial energético proveniente de los residuos de la agricultura.

Los residuos de la agricultura son de tipo orgánico, el tratamiento que se le da a estos no siempre es el más adecuado, entre ellas podemos mencionar: son quemados al aire libre generando grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, son arrojados a los ríos y quebradas representando un grave peligro para la salud humana y para el medio ambiente, algunos residuos pueden ser aprovechados como forrajes de alimentación para animales. Es necesario desarrollar tecnologías para el mejor uso de estos residuos orgánicos, pues el tratamiento inadecuado genera contaminación ambiental, contribuyendo con el efecto invernadero y el cambio climático.

Existen diferentes tecnologías probadas y en proceso de investigación que buscan aprovechar la energía química de los residuos de la agricultura, residuos forestales, etc. Entre estas tecnologías se encuentra la combustión directa para generación de vapor, combustión directa para producción de calor, gasificación de biomasa, etc. Este último busca generar gas pobre (poder calorífico inferior al gas natural) a partir de combustibles sólidos (residuos de la agricultura, residuos





forestales, etc.), las cuales tienen una diversidad de aplicaciones como la generación eléctrica, generación térmica, uso en quemadores, etc.

## **1.2 Formulación de Problemas**

### **1.2.1 Problema general.**

- a) ¿De qué manera es posible aprovechar la biomasa de los residuos agrícolas para la generación de energía térmica y eléctrica a partir de su transformación en procesos termoquímicos para su utilización en bajas potencias?

### **1.2.2 Problemas específicos técnicos.**

- a) ¿En qué medida la biomasa proveniente de los residuos agrícolas se puede emplear como fuente de combustible para un sistema de generación de energía a partir de un proceso de gasificación?
- b) ¿Cuáles son los parámetros de diseño para determinar la selección, el dimensionamiento y el uso de materiales en la fabricación de un gasificador de baja potencia?
- c) ¿Cuáles son los parámetros de diseño térmico más adecuados para el sistema de generación de energía térmica y eléctrica a partir del uso de un gasificador de biomasa de baja potencia?

### **1.2.3 Problema específico económico.**

- a) ¿Es posible que un gasificador de biomasa de baja potencia pueda ofrecer un costo de instalación competitivo?
- b) ¿Es posible que un gasificador de biomasa de baja potencia pueda ofrecer un costo de energía competitivo?







## 1.3 Planteamiento de Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general.

- a) Diseñar un sistema de generación de energía térmica y eléctrica a partir del uso de un gasificador de biomasa de 25 KW de potencia.

### 1.3.2 Objetivos específicos técnicos.

- a) Analizar y seleccionar biomasa proveniente de los residuos agrícolas como fuente de combustible para el sistema de generación de energía térmica y eléctrica a partir del uso de un gasificador de biomasa de 25 KW de potencia.
- b) Definir los parámetros de diseño mecánico (gasificador y ciclón) más adecuados para el sistema de generación de energía térmica y eléctrica a partir del uso de un gasificador de biomasa de 25 KW de potencia.
- c) Definir los parámetros de diseño térmico (gasificador e intercambiador de calor) más adecuados para el sistema de generación de energía térmica y eléctrica a partir del uso de un gasificador de biomasa de 25 KW de potencia.

### 1.3.3 Objetivo específico económico.

- a) Analizar la competitividad del costo por KW instalado que puede ofrecer el uso de un gasificador de biomasa de 25 KW de potencia.
- b) Analizar la competitividad del costo por KWH generado que puede ofrecer el uso de un gasificador de biomasa de 25 KW de potencia comparando con fuentes de energía comerciales.





## 1.4 Justificación

Con la presente tesis se busca presentar una alternativa de aprovechamiento y manejo eficiente de la biomasa proveniente de la agricultura. La energía térmica que se obtendrá según los cálculos de este trabajo de investigación se puede emplear para diferentes procesos, como el secado de granos (mejorando la calidad de los granos y el costo), sistemas de calefacción (mejorando la calidad de vida), etc. Mientras la potencia eléctrica calculada se puede emplear para la operación de distintas máquinas, así como para el consumo directo (alumbrado).

La ventaja de la biomasa es que no altera el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico. En la combustión de la biomasa se considera que las emisiones tienen el balance neutro de CO<sub>2</sub>, siempre que el manejo sea el adecuado, es decir, se debe quemar biomasa en la misma proporción que se siembra o que se planta. Realmente sí que se produce CO<sub>2</sub> como resultado de la combustión de la biomasa, pero esto se considera así porque se plantea que la combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el CO<sub>2</sub> que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el CO<sub>2</sub> que absorben y liberan continuamente las plantas y árboles para su crecimiento) y no es el CO<sub>2</sub> capturado en el subsuelo a lo largo de miles de años y liberado en un breve espacio de tiempo como ocurre con los combustibles fósiles (IMARTEC, s.f.).

## 1.5 Alcances y limitaciones

### 1.5.1 Alcances.

El presente trabajo de tesis de investigación tecnológica pretende abarcar:

Diseño mecánico: sistema de gasificación (gasificador, ciclón).

Diseño térmico: sistema de gasificación (gasificador e intercambiador de calor).

Alcance geográfico: productores de café de la Convención, región Cusco.





### **1.5.2 Limitaciones.**

No se realizará el diseño mecánico del intercambiador de calor, porque será adquirido comercialmente.

La biomasa que se estudiará como fuente primaria de combustible será la pulpa de café.

Se presenta el diseño del equipo mas no como en operación.

## **1.6 Formulación de hipótesis**

### **1.6.1 Hipótesis general.**

- a) Es posible diseñar un gasificador de biomasa de 25 KW de potencia y generar energía eléctrica y térmica.

## **1.7 Sistema de Variables**

### **1.7.1 Variables independientes.**

- a) Flujo de masa de biomasa.
- b) Flujo de masa de aire.
- c) Temperatura ambiental.
- d) Presión ambiental.
- e) Densidad del aire.
- f) Potencia de 25 KW.

### **1.7.2 Variables dependientes.**

Diseño de un sistema de generación de energía térmica y eléctrica.

### **1.7.3 Variables intervinientes.**

Gasificador de biomasa de 25 KW de potencia.





## 1.8 Metodología

### 1.8.1 Tipo, nivel y estrategia de la investigación.

**Tipo:** la investigación es del tipo APLICADA, utilizando el método CUANTITATIVO.

**Nivel:** Exploratorio, descriptivo.

**Estrategia:** investigación documental

### 1.8.2 Población y muestra.

Para determinar la biomasa específica a utilizar, se realizará un estudio comparativo de los diferentes residuos de la agricultura.

### 1.8.3 Técnicas de recolección de datos

Para la recopilación de datos, según sea su naturaleza se recurrirá principalmente a:

**Datos estadísticos:** Instituciones públicas y privadas que manejen datos estadísticos verídicos y fiables.

**Datos documentales:** se recurrirá a la revisión bibliográfica de fuentes confiables como tesis, artículos, informes, sitios web, etc.

### 1.8.4 Procesamiento y análisis de datos.

Después de realizar la investigación y el estudio sobre los temas referentes al trabajo de tesis, se realizará una evaluación crítica de los datos obtenidos a fin de garantizar la veracidad y la confiabilidad de los mismos. Posteriormente se proseguirá al diseño y cálculo a partir de los datos obtenidos. Los conceptos que se utilizarán son:

- a) Ciencia de los materiales
- b) Transferencia de calor
- c) Energías renovables
- d) Resistencia de materiales





Uso de software para el diseño: AUTOCAD 2018 ESPAÑOL, SOLIDWORKS 2018 ESPAÑOL.





## CAPITULO II

### Marco Teórico

#### 2.1 Antecedentes

El aprovechamiento de las fuentes de energías renovables como la energía solar, eólica, hidráulica y así como la producción de gas a partir de materiales a base de carbono es una tecnología antigua.

Las ventajas del proceso de gasificación fueron descubiertos a principios de los años 1800, estos sistemas han demostrado ser una buena alternativa para resolver problemas energéticos en comunidades aisladas.

(...) El primer gasificador de flujos paralelos concurrentes fue instalado en 1839. Los principios básicos de la gasificación de la biomasa han sido conocidos desde finales del siglo XVIII, pero las primeras aplicaciones comerciales datan de 1830. Hacia comienzos de 1850 un gran número de lámparas de alumbrado público en Londres ya funcionaban con gas producido de la gasificación de biomasa, este experimento constituyó en el comienzo definitivo de las investigaciones en esta área. (Villegas Legal, 2012, pág. 9)

Los orígenes del proceso de gasificación comienzan en Francia e Inglaterra en el siglo XIX donde se empleaba para la manufactura de un gas combustible cuyo uso era doméstico. Durante la Primera Guerra Mundial su uso se extendió en la fabricación de motores alimentados por biomasa o carbón para vehículos automotores, barcos, trenes y generadores de energía eléctrica de pequeña escala. Sin embargo, la llegada de combustibles fósiles relativamente baratos y de quemado fácil como la gasolina desplazó a los gasificadores de la industria energética. En el inicio de la Segunda Guerra Mundial surgió un interés por formas alternativas de producir combustibles, retomando el uso de gasificadores en la industria automotriz. Un caso destacable





de este hecho surgió en Suecia, donde en 1943 alrededor del 90% de los vehículos contaban con un motor basado en gasificador. (Villegas Legal, 2012, pág. 9)

Recientemente se ha despertado de nuevo el interés por esta tecnología, especialmente como un medio de utilizar combustibles de biomasa, en vez de combustibles de petróleo importados, en países en desarrollo. Este interés procede de la evidencia bien documentada de que durante la Segunda Guerra Mundial más de 1 millón de vehículos -autobuses, camiones, automóviles, barcos y trenes- fueron propulsados por gasificadores alimentados a base de madera, carbón vegetal, turba o carbón mineral. No obstante, después de la guerra se produjo un retorno total a los combustibles líquidos, tan pronto como volvieron a estar disponibles, debido evidentemente a su comodidad, seguridad y ventajas económicas. (FAO, 1993)

En el Perú, los sistemas de gasificación son poco conocidos, por lo cual tienen muy poca o nula de aplicación. En el Cusco, estos sistemas son desconocidos, por lo mismo que con este trabajo de investigación se busca abrir puerta a una alternativa de aprovechamiento energético basado en la biomasa.

Respecto a los trabajos internacionales revisados referentes al tema de gasificación son: Tesis - Diseño de una planta de gasificación con cogeneración para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial (Madrid), Tesis - Diseño de un Gasificador de Pequeña Potencia Eléctrica (Barcelona), Tesis - Determinación de parámetros fisicoquímicos y cinéticos de la degradación térmica de broza y cascarilla de café para ser utilizados en simulaciones computacionales del proceso de gasificación (Costa Rica), toda información empleada para la elaboración de la presente tesis se indica en el contenido así como en la bibliografía. Mientras los trabajos nacionales revisados son: Tesis - Diseño de un gasificador de 25 KW para aplicaciones





domesticas usando como combustible cascarilla de arroz (Lima), Tesis - Diseño de un gasificador dowdraft invertido de 2600 Kcal/h que emplea cascarilla de arroz como combustible (Lima).

## 2.2 Biomasa

Según el Diccionario de la Real Academia Española (2001) la palabra biomasa se define como: “1. f. Biol. Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen”, la definición anterior considera a la biomasa prácticamente como todo ser vivo existente sobre la capa terrestre denominada biósfera. Según la vigesimotercera edición del Diccionario de la Lengua Española que se publicó en octubre del 2014 la biomasa se define como: “2. f. Biol. Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía”, esto hace referencia a la biomasa como aquellos recursos biológicos de origen vegetal, animal o producto de su transformación, de los cuales se puede obtener combustibles energéticos, llamados también biocombustibles (Arevalo, 2015).

La energía que contiene la biomasa es energía solar almacenada a través de la fotosíntesis, proceso por el cual algunos organismos vivos, como las plantas, utilizan la energía solar para convertir los compuestos inorgánicos que asimilan (como el CO<sub>2</sub>) en compuestos orgánicos. (Castells E. X., 2012, pág. 745)





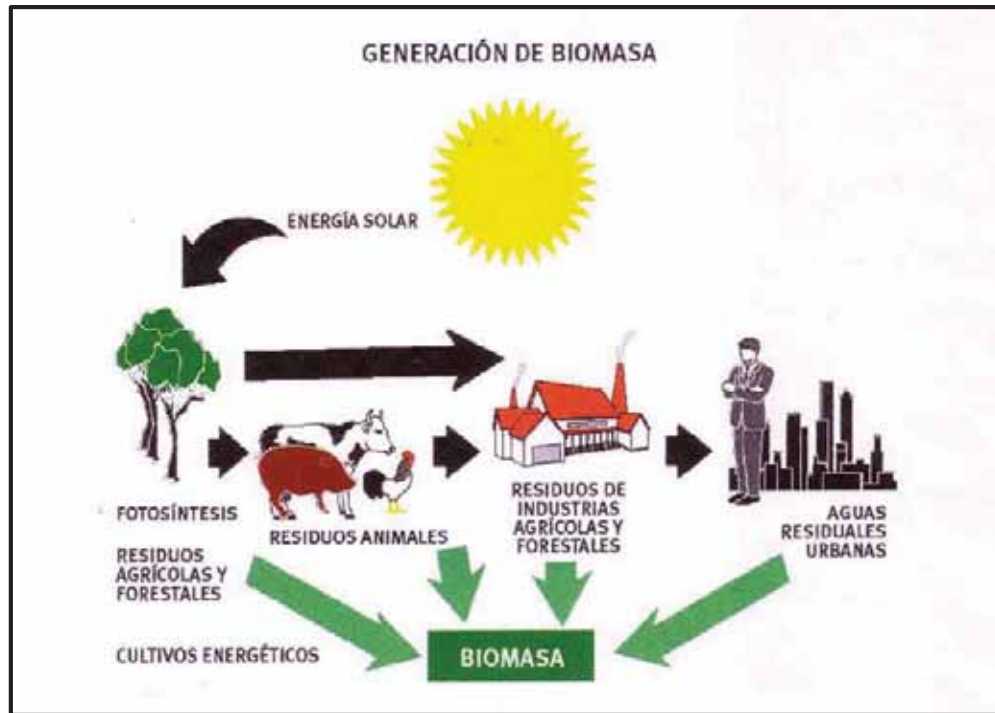


Figura 1. Generación de biomasa.

En promedio solo se convierte en biomasa el 0.023% de toda la energía solar incidente sobre el planeta (Sebastian Nogues, 2010).

De la figura 1 se puede afirmar que la biomasa es, por tanto, toda planta o materia orgánica que hay sobre la superficie: residuos agrícolas, forestales, cultivos energéticos, restos de las industrias de la madera, restos de las industrias agrícolas, aguas residuales urbanas, etc. La biomasa es una fuente de energía que puede proveer electricidad, calor y energía.

La biomasa es una fuente de energía renovable, se define como energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

Una de las mayores ventajas de la biomasa como energía renovable es su balance neutro de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

La combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el que absorben y liberan continuamente las plantas durante su crecimiento) y no del subsuelo, capturado en épocas remotas, precisamente como el gas o el petróleo. (Castells E. X., 2012, pág. 745)

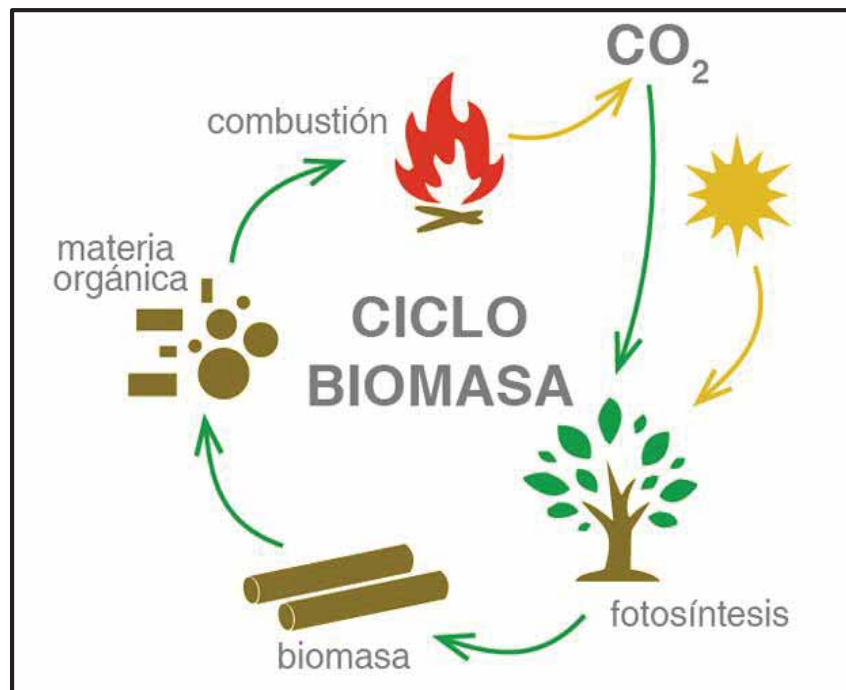


Figura 2. Ciclo de la biomasa.

### 2.2.1 Tipos de biomasa.

La biomasa es el gran reservorio de energía para que la vida se sustente en el planeta. La alteración del ciclo de la biomasa influye directamente en la existencia de la vida sobre la tierra, ya que permite el suministro de oxígeno a la atmósfera y a todos los organismos que requieren de él para su existencia (Castells E. X., 2012).

Los diferentes tipos de biomasa se pueden clasificar de forma general en:



### **2.2.1.1 Natural.**

Producido espontáneamente en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana. Por ejemplo, los residuos generados en las podas de bosques (Martinez Angel, 2005)

### **2.2.1.2 Residual.**

#### *2.2.1.2.1 Residuos forestales.*

Comprende los residuos de tratamientos silvícolas y de cortes de pies maderables.

#### *2.2.1.2.2 Residuos agrícolas.*

Incluye los restos de podas, rastrojos de cultivos, etc.

#### *2.2.1.2.3 Residuos de industrias forestales.*

Representa los aserraderos, fábricas de pasta y papel, etc.

#### *2.2.1.2.4 Residuos de industrias agrícolas.*

Comprende los bagazos, orujos, cascaras, huesos, etc.

#### *2.2.1.2.5 Residuos biodegradables.*

Se refiere a los purines, estiércoles, fangos de depuradores, domiciliarios, mataderos, harinas cárnicas, sebos, etc.

### **2.2.1.3 Cultivos energéticos.**

Biomasa obtenida a partir de siembras, que tienen como única finalidad la producción de combustible. Por ejemplo, cultivos para producir etanol (trigo, maíz, etc.), cultivos para producir biodiesel (colza, girasol, etc.), etc. (Martinez Angel, 2005).

### **2.2.1.4 Excedentes agrícolas.**

“Sirven para completar los cultivos no alimentarios y sustituir parcialmente los biocarburantes y los combustibles fósiles (aceite de algodón, aceite de soja, etc.) en su caso” (Castells E. X., 2012, pág. 748).





**Tabla 1**

*Fuentes de producción de diferentes biocombustibles*

<b>Recurso</b>	<b>Residuos</b>
Residuos forestales	Ramas, restos de podas y de cosechas, copas de árboles. Restos de cultivos leñosos, ramas.
Residuos agrícolas	Restos de cultivos herbáceos industriales, tallos y plantas verdes. Pastos y restos de cereales.
Residuos de la industria forestal	Aserrín, virutas, cortezas y restos de maderas. Residuos de la industria de la celulosa y papel, licor negro, fangos de depuradoras.
Residuos de industrias agrícolas y agroalimentarias	Cascaras, cuescos, semillas, hollejos, fangos de plantas depuradoras.
Residuos biodegradables	Residuos de la industria ganadera, purines, estiércol. Residuos de animales muertos, sangre, pieles. Fangos de la depuración de aguas urbanas e industriales.
Cultivos energéticos y excedentes agrícolas	Cultivos energéticos y residuos de otros cultivos.

Nota: adaptada de la propuesta por el Instituto de Diversificación y Ahorro Energético de España (IDA), “libro biomasa y bioenergía” pág. 754.

### **2.2.2 Transformación de la biomasa.**

Desde el punto de vista energético es conveniente dividir la biomasa en dos grupos: biomasa seca y biomasa húmeda (Secretaría de Energía, 2008).

La biomasa seca: se denomina así cuando el porcentaje de humedad es menor al 60%, como la leña, paja, etc. Este tipo de biomasa se presta mejor a ser utilizada energéticamente mediante procesos TERMOQUÍMICOS o FÍSICOQUÍMICOS, obteniéndose energía térmica, combustibles sólidos, líquidos o gaseosos (Secretaría de Energía, 2008).





La biomasa húmeda: se denomina así cuando el porcentaje de humedad es mayor al 60%, como en los restantes vegetales, residuos de animales, vegetación acuática, etc. Resulta especialmente adecuada para su tratamiento mediante procesos QUÍMICOS, o en algunos casos mediante simples procesos FÍSICOS, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos (Secretaría de Energía, 2008).

### ***2.2.2.1 Procesos termoquímicos.***

#### ***2.2.2.1.1 Combustión.***

Es el más sencillo y más ampliamente utilizado, tanto en el pasado como en el presente. Permite obtener energía térmica, ya sea para usos domésticos (cocción, calefacción) o industriales (calor de proceso, vapor, energía mecánica) (Secretaría de Energía, 2008).

#### ***2.2.2.1.2 Gasificación.***

Consiste en la quema de la biomasa, en presencia de oxígeno en forma controlada (combustión incompleta). Como resultado de la gasificación se produce un gas combustible denominado “gas pobre” o “gas de síntesis”. El gas combustible obtenido a partir de la gasificación se puede emplear en motores de combustión interna, para generación eléctrica, generación térmica y mecánica (Secretaría de Energía, 2008).

#### ***2.2.2.1.3 Pirolisis.***

Es un proceso similar a la gasificación, durante la combustión de este proceso se realiza una oxigenación parcial y controlada de la biomasa. Como resultado de la pirolisis se obtiene una combinación variable de combustibles sólidos (carbón vegetal), líquidos (efluentes piroleñosos) y gaseosos (gas pobre), generalmente el producto principal de la pirolisis es el carbón vegetal (Secretaría de Energía, 2008).





### **2.2.2.2 Procesos bioquímicos.**

Se basan en la degradación de la biomasa por la acción de microorganismos, pueden dividirse en: los que se producen en ausencia de aire (anaeróbicos) y los que se producen en presencia de aire (aeróbicos) (Secretaría de Energía, 2008).

#### **2.2.2.2.1 Procesos Anaeróbicos.**

Para la fermentación anaeróbica se utilizan generalmente residuos de animales y vegetales de baja relación de carbono/nitrógeno. Este proceso se realiza en un recipiente cerrado llamado “digestor”. Como resultado del proceso se obtiene un gas combustible denominado biogás y fertilizantes para cultivos agrícolas (Secretaría de Energía, 2008).

#### **2.2.2.2.2 Procesos Aeróbicos.**

Para la fermentación aeróbica se emplea biomasa de alto contenido de azúcares o almidones. Como resultado de este proceso se obtiene alcohol (etanol), las materias primas más utilizadas para la producción de alcohol son la caña de azúcar, mandioca, sorgo dulce y maíz (Secretaría de Energía, 2008).

### **2.2.3 Características de la biomasa como combustible.**

Las propiedades de la biomasa pueden dividirse en propiedades físicas, químicas y térmicas. Existen multitud de posibles propiedades y análisis a realizar. A continuación, se describen los principales.





**Tabla 2**

*Parámetros físicos, químicos y energéticos de la biomasa*

<b>Parámetros físicos</b>	Densidad real y aparente Humedad Distribución granulométrica	Influyen en la selección y el diseño de los equipos de manejo del material y la necesidad de pretratamiento.
<b>Parámetros químicos</b>	Análisis elemental Análisis inmediato Componentes estructurales Composición de cenizas Fusibilidad de cenizas	Determinan el comportamiento de la biomasa durante los procesos de transformación química y termoquímica.
<b>Parámetros energéticos</b>	Poder calorífico	Determinan la cantidad de energía aprovechable.

Nota: extraído del libro energía de la biomasa vol. I pag.41.

### **2.2.3.1 Densidad real.**

Es aquella propia de la materia, por ejemplo, la densidad real de la madera es mucho mayor que densidad aparente de sus ramas relleno la caja del camión que la transporta, ya que entre las ramas hay multitud de huecos que ocupa el aire (Sebastian Nogues, 2010).

$$\rho_{real} = \frac{\text{masa de materia}}{\text{volumen de materia}}$$

### **2.2.3.2 Densidad aparente.**

Tiene que ver con el modo como cada tipo de biocombustible sólido tiende a llenar un volumen. La densidad aparente es la cantidad de peso de biocombustible sólido que se puede acumular en un volumen dado. La densidad aparente varía fundamentalmente, con el grado de compactación que haya sufrido (Sebastian Nogues, 2010).

$$\rho_{real} = \frac{\text{masa de materia}}{(\text{masa de materia} + \text{volumen de aire en huecos})}$$





### **2.2.3.3 Humedad.**

Se define como la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca o “como la cantidad total de agua contenida en el total de masa de una muestra de biomasa” (Sebastian Nogues, 2010, pág. 42).

### **2.2.3.4 Granulometría.**

“Hace referencia al formato como se presenta la biomasa: fardos, ramas, polvos, etc.” (Sebastian Nogues, 2010, pág. 43). La granulometría indica el tamaño o dimensiones de la biomasa combustible.

### **2.2.3.5 Análisis elemental.**

“El análisis elemental permite establecer el porcentaje en peso de los principales elementos con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S)” (Sebastian Nogues, 2010, pág. 44).

### **2.2.3.6 Análisis inmediato.**

Proporciona los contenidos de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo de la biomasa, expresados como porcentajes en peso.

#### **2.2.3.6.1 Materia volátil.**

“Es la porción de combustible que se libera en forma de gases y vapores (hidrocarburos) al descomponerse térmicamente la materia que configura la biomasa” (Sebastian Nogues, 2010, pág. 44).

#### **2.2.3.6.2 Carbono fijo y las cenizas.**

“Son las fracciones que restan una vez se ha desprendido la materia volátil” (Sebastian Nogues, 2010, pág. 44).







#### 2.2.3.6.3 *Las cenizas.*

“Son los residuos inorgánicos que quedan tras la combustión del carbono fijo, (...)” (Sebastian Nogues, 2010, pág. 45).

#### 2.2.3.7 *Poder calorífico.*

“Es la energía química del combustible que puede ser transformada directamente en energía térmica mediante un proceso termoquímico de oxidación (combustión)” (Sebastian Nogues, 2010, pág. 46).

Existen dos formas de expresar el poder calorífico de un combustible. Si tras la combustión, el agua formada en los gases de combustión (proveniente de la humedad o de la oxidación del hidrogeno) se encuentra en forma líquida, se obtiene el poder calorífico superior (PCS). Si permanece en forma de vapor se obtiene el poder calorífico inferior (PCI). (Sebastian Nogues, 2010, pág. 46)

### 2.2.4 **Ventajas y desventajas de utilizar biomasa.**

#### 2.3.4.1 *Ventajas.*

- a) “Es una fuente de energía renovable, inagotable, limpia y segura” (Nieto, 2015).
- b) Posee un equilibrio del CO<sub>2</sub>; es decir, “cuando la biomasa libera CO<sub>2</sub> a la atmósfera, esto no es más que la devolución al medio del CO<sub>2</sub> que fue tomado por la planta durante su crecimiento, por lo que si se hiciera un balance anual de dicho ciclo, este sería neutro” (Arevalo, 2015, pág. 87).
- c) “La biomasa es una forma de reciclaje y disminución de residuos” (Nieto, 2015).
- d) “El uso de cultivos energéticos, y el aprovechamiento de tierras abandonados evita la erosión y degradación del suelo” (Pasan Camacho, 2013).





- e) “Se contribuye a la limpieza de los montes y al aprovechamiento de residuos de diferentes industrias (cultivos leñosos, así como restos agroindustriales de diferente naturaleza)” (Pasan Camacho, 2013).
- f) “Contribuye la creación de puestos de trabajo en los medios rurales” (Nieto, 2015).
- g) “Hay una amplia variedad de tipos de biomas y de calderas” (Nieto, 2015).
- h) “El coste de este tipo de energía es hasta 3 o 4 veces más barato” (Pasan Camacho, 2013).
- i) “Actualmente, el rendimiento, eficacia y tecnología de este tipo de calderas es muy provechoso” (Nieto, 2015).

#### **2.3.4.2 Desventajas.**

- a) “En ocasiones, la biomasa contiene mucha humedad, que hay que eliminar, lo que conlleva una etapa más y un consumo de energía previo” (Nieto, 2015).
- b) “Los almacenamientos han de ser mucho mayores ya que posee una menor densidad energética” (Pasan Camacho, 2013).
- c) “Las calderas de biomasa tiene un rendimiento algo inferior a las de combustible fósil líquido o gaseoso” (Nieto, 2015).
- d) “Al ser un recurso de uso reciente las redes y canales de distribución de los mismos no se encuentran tan desarrollados como los de los combustibles líquidos y/o sólidos” (Pasan Camacho, 2013).

### **2.3 Gasificación**

“La gasificación es un proceso en el que se convierte, mediante oxidación parcial a temperatura elevada, una materia prima (generalmente sólida) en un gas con un moderado poder calorífico” (Elias Castells & Velo, 2012, pág. 414). “Normalmente, se trabaja con un 25-30% del oxígeno necesario para la oxidación completa” (Elias Castells & Velo, 2012, pág. 414). “En el proceso de



gasificación de biomasa tienen lugar varias reacciones cuyo orden e importancia depende de las condiciones de operación, del combustible y de los elementos del agente gasificante utilizado” (Castro Martínez, 2015). En la figura 3 se puede observar la evolución de la materia biomásica durante su proceso de gasificación.

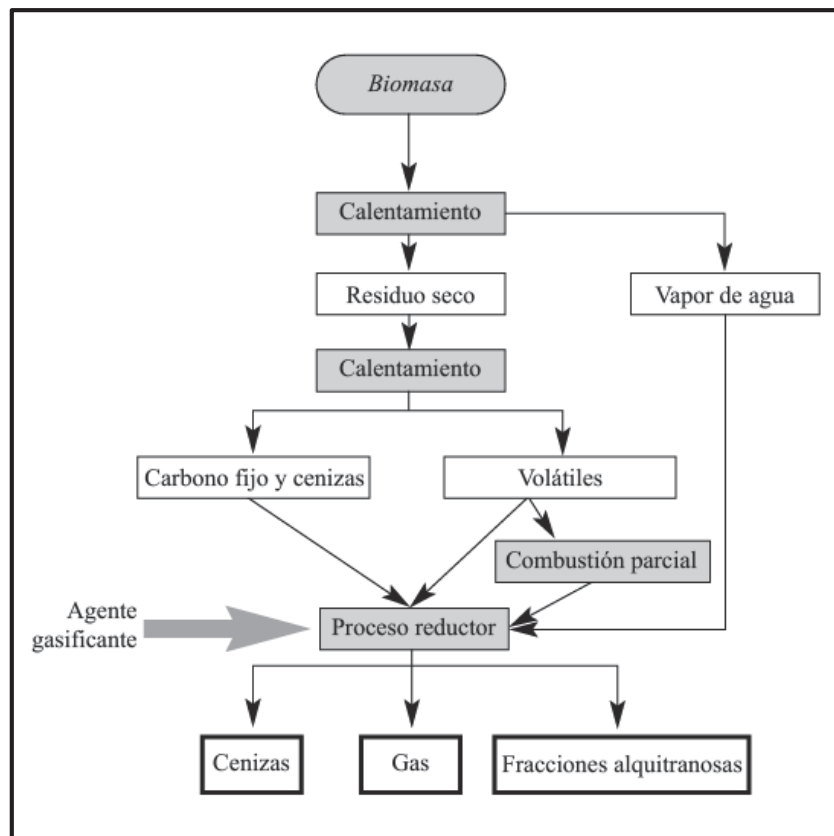


Figura 3. Diagrama de las fases existentes en los procesos de gasificación. Fuente: (Sebastián Nogues, 2010, pág. 61)

El gas obtenido del proceso de gasificación contiene monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), pequeñas cantidades de otros hidrocarburos más pesados, como el etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) y el etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), agua (H<sub>2</sub>O), nitrógeno (N<sub>2</sub>) (cuando se usa aire como agente oxidante) y diversos contaminantes como pequeñas partículas carbonosas, cenizas, alquitranes y aceites. La oxidación parcial se puede llevar a cabo utilizando aire, oxígeno, vapor o una mezcla de estos. El CO y el hidrógeno confieren poder calorífico al

gas ya que pueden reaccionar con el oxígeno (combustión en caldera, motor o turbina). El CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O son productos indeseados pero inevitables, (...). (Elias Castells & Velo, 2012, pág. 418)

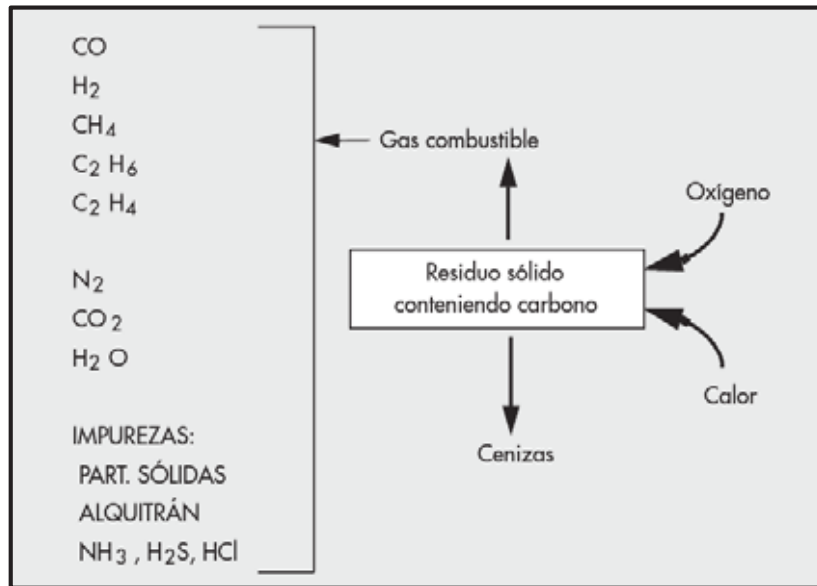


Figura 4. Principio químico del proceso de gasificación. Fuente: (Elías Castells & Velo, 2012, pág. 419).

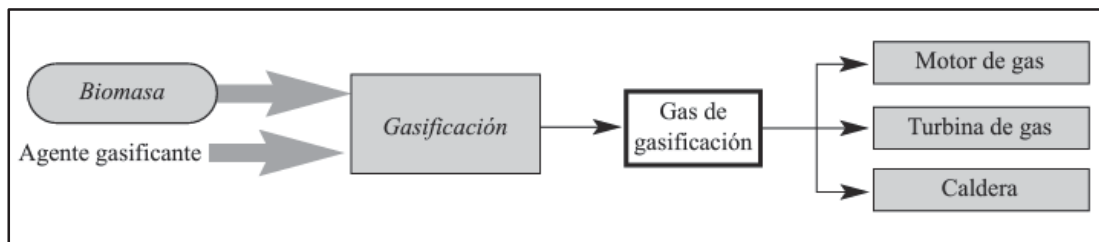


Figura 5. Objetivos y aplicaciones del gas obtenido por gasificación de la biomasa. Fuente: (Sebastián Nogues, 2010, pág. 61).

### 2.3.1 Etapas o fases de la gasificación.

#### 2.3.1.1 Secado.

Consiste en la evaporación de la humedad contenido en el sólido (combustible). “Este calentamiento se produce por el calor ascendente desde el reactor, y provoca el secado de la biomasa, que libera su humedad en forma de vapor” (Martín Perez, 2014, pág. 12).



### **2.3.1.2 Pirolisis.**

Consiste en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno. En esta fase se “absorbe calor mediante la ruptura de moléculas más grandes dando lugar a otras de cadena más corta que a altas temperaturas están en fase gaseosa” (Martín Perez, 2014).

### **2.3.1.3 Oxidación o combustión**

La combustión tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante. El oxígeno o aire implica el conjunto de reacciones de oxidación tanto homogénea como heterogénea, fundamentalmente exotérmica, mediante las que se generan dióxido de carbono, agua y sales minerales (cenizas) y el calor necesario en forma de gases para que el proceso se mantenga. (Castro Martinez, 2015, pág. 26)

### **2.3.1.4 Reducción**

“En esta etapa se reducen los gases resultantes en el proceso de oxidación como el dióxido de carbono y el agua para formar hidrogeno y monóxido de carbono” (Martín Perez, 2014, pág. 13).

## **2.3.2 Reacciones químicas en el proceso de gasificación.**

Cuando el sólido orgánico entra en el gasificador, se produce rápidamente la pirolisis. El sólido libera los compuestos volátiles y se forma un residuo carbonoso o char. Si bien el conjunto de reacciones limitantes de la velocidad global del proceso son las reacciones solido-gas, por lo que son las únicas que suelen tenerse en cuenta, junto con las reacciones de formación de hidrogeno (shift) y metano (metanización) a partir de CO. (Elias Castells & Velo, 2012, pág. 423)

Combustión (reacciones exotérmicas)

Completas:





---

reacción	ecuación
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	(1)

---

Parcial:

---

reacción	ecuación
$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	(2)

---

Gasificación

---

reacción	ecuación
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	(3)
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	(4)
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	(5)

---

Shift (exotérmica)

---

reacción	ecuación
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	(6)

---

Metanización (exotérmica)

---

reacción	ecuación
$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	(7)

---

El char, en presencia de oxígeno, tendera a combustionar (reacción 1). Como quiera que el oxígeno introducido en el reactor es insuficiente, se favorece la presencia de CO por combustión incompleta (reacción 2). El exceso de char reacciona con los gases presentes (principalmente CO<sub>2</sub> y agua, reacciones 3 y 5). Las reacciones 5 y 6 están favorecidas por la presencia de vapor de agua en el agente oxidante, por lo que la presencia de vapor favorece la producción de





hidrogeno. La formación de metano, reacción 7, está favorecida por las altas presiones. (Elias Castells & Velo, 2012)

### **2.3.3 Parámetros del proceso de gasificación.**

#### **2.3.3.1 Tiempo de residencia.**

El tiempo de residencia de cada reactor, es el periodo en el cual las partículas de residuo carbonoso (char) permanecen en el gasificador, su residencia debe ser lo suficientemente larga para asegurar que todas las reacciones en el proceso de gasificación tengan lugar de manera satisfactoria. Los reactores que presentan los tiempos de residencia más largos son los de lecho fijo, mientras que los de lecho fluidizado tienen tiempos de residencia cortos, 1-2 segundos aproximadamente, durante el cual las pequeñas partículas de biomasa se secan, se pirolizan y luego se gasifican. Un tiempo óptimo de 1.6 segundos se propone para este tipo de gasificador. Ruiz et al. como se citó en (Aristizabal Alvarez & Valencia Naranjo, 2015, pág. 12)

#### **2.3.3.2 Agente gasificante.**

“Para el desarrollo de gasificación se puede utilizar el aire, el oxígeno, el dióxido de carbono, el vapor de agua o una mezcla de estos, sin embargo, cada uno de ellos tiene distintas características de reacción” (Ramirez Rubio, Emiro Sierra, & Alberto Guerrero, 2011, pág. 19) .

**Gasificación con aire:** “Produce un gas de calidad pobre en cuanto a su poder calorífico (4-7 MJ/m<sup>3</sup>) debido a su baja densidad energética” (Ramirez Rubio, Emiro Sierra, & Alberto Guerrero, 2011, pág. 19).

**Gasificación con oxígeno:** “Produce un gas de mejor calidad (10-18 MJ/m<sup>3</sup>) pero implica altos costos para la producción del oxígeno y se presentan mayores riesgos durante el proceso de gasificación” (Ramirez Rubio, Emiro Sierra, & Alberto Guerrero, 2011, pág. 19).





En la gasificación con vapor de agua o dióxido de carbono como medio de gasificación, el gas que se obtiene es de una calidad similar al logrado con oxígeno. Además, se evitan los altos costos de producción y los riesgos de operación, la cual es de tres a cinco veces más rápida que la gasificación con dióxido de carbono. Sierra et al. como se citó en (Ramirez Rubio, Emiro Sierra, & Alberto Guerrero, 2011, pág. 19)

#### ***2.3.3.3 Relación equivalente.***

Es un parámetro de diseño importante para el gasificador. Es la relación aire/combustible para el proceso real y el aire/combustible para la combustión completa. La relación aire/combustible se considera que tiene la mayor influencia en el poder calorífico del gas de síntesis generado. Ruiz et al. como se citó en (Aristizabal Alvarez & Valencia Naranjo, 2015, pág. 12)

#### ***2.3.3.4 Temperatura de gasificación.***

La temperatura de reacción es uno de los parámetros más importantes, por lo que necesita ser controlada con precisión. El mal control de la temperatura puede disminuir la eficiencia del proceso, pues puede producir una mayor cantidad de alquitranes en el gas de síntesis. Además, si la temperatura aumenta considerablemente (lecho fijo: >1200 °C y lecho fluidizado: >1000 °C), puede haber problemas de acumulación, erosión y corrosión en el equipo. Ruiz et al. como se citó en (Aristizabal Alvarez & Valencia Naranjo, 2015, pág. 12)

#### ***2.3.3.5 Presión.***

“Dependiendo de la presión utilizada, hay dos tipos de procesos de gasificación: a presión atmosférica o presurizada (a presiones altas). Este último es más eficiente, aunque también implicaría altos costos de inversión” Ruiz et al. como se citó en (Aristizabal Alvarez & Valencia Naranjo, 2015, pág. 13).







“Un aumento en la presión de funcionamiento de los gasificadores reduce la cantidad de carbón y alquitrán en el gas de síntesis generado” Ruiz et al. como se citó en (Aristizabal Alvarez & Valencia Naranjo, 2015, pág. 13).

#### ***2.3.3.6 Dimensionamiento del equipo y conceptos de los parámetros de diseño del gasificador.***

El dimensionamiento del equipo se realiza teniendo en cuenta algunas variables como la potencia salida del gas, el flujo volumétrico del gas y la cantidad de combustible alimentada. Al tener todas las medidas del gasificador se establece la capacidad del equipo, el tiempo de operación y los materiales en los que debe ser construido. Ruiz et al. como se citó en (Aristizabal Alvarez & Valencia Naranjo, 2015, pág. 13).

##### ***2.3.3.6.1 Tipos de garganta.***

Los gasificadores pueden tener diferentes configuraciones de garganta (figura 6). Un factor muy importante a la hora de obtener una buena velocidad específica de gasificación es el tipo de garganta utilizado en el sistema (Martín Perez, 2014). Con respecto a esto, se concluye que los mejores resultados se obtienen para gasificadores con doble garganta Venselaar como se citó en (FAO, 1993). Además, los diseños de doble garganta son más adecuadas para aplicaciones de carga variable.



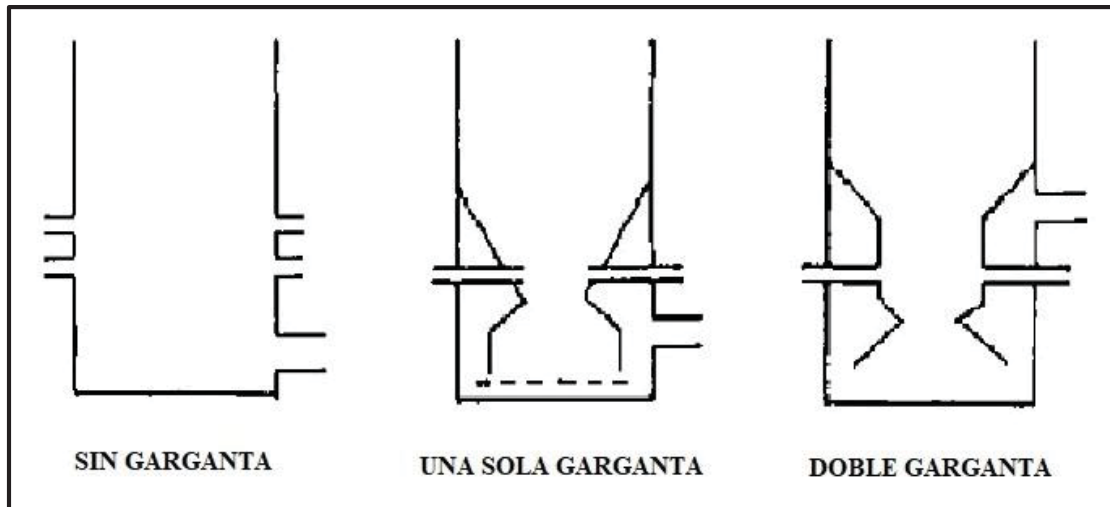


Figura 6. Configuraciones de garganta. fuente: (FAO, 1993)

#### 2.3.3.6.2 Potencia del gasificador.

La salida de potencia requerida del gasificador es un parámetro importante, este es directamente proporcional al flujo volumétrico de gas producido por el gasificador y al poder calorífico del gas producido.

#### 2.3.3.6.3 Flujo volumétrico de gas producido.

El flujo volumétrico de gas producido, es el volumen de gas que puede producir un gasificador por unidad de tiempo.

#### 2.3.3.6.4 Flujo másico de combustible.

Es la cantidad de combustible que consume el gasificador por unidad de tiempo para su funcionamiento.

#### 2.3.3.6.5 Eficiencia mecánica de la gasificación.

Se define como razón entre la potencia del gasificador y el producto del poder calorífico inferior del combustible del gasificador por el consumo de combustible sólido del gasificador.



#### *2.3.3.6.6 Aire necesario para la gasificación.*

Es el flujo másico de aire necesario para la gasificación, es el correspondiente al 25% del flujo de aire requerido de una combustión estequiométrica aproximadamente.

#### *2.3.3.6.7 Tiempo de consumo de combustible.*

Se refiere al tiempo total requerido para gasificar completamente el combustible dentro del reactor.

### **2.3.4 Tipos de gasificadores.**

Se puede clasificar en tres grupos fundamentales, esta clasificación se da en función a cómo sale el gas del gasificador (en caso de los lechos fijos) y los demás en función al proceso que se le da para obtener el gas, a continuación, se detallará cada grupo.

#### *2.3.4.1 Gasificadores de cama fija o lecho fijo.*

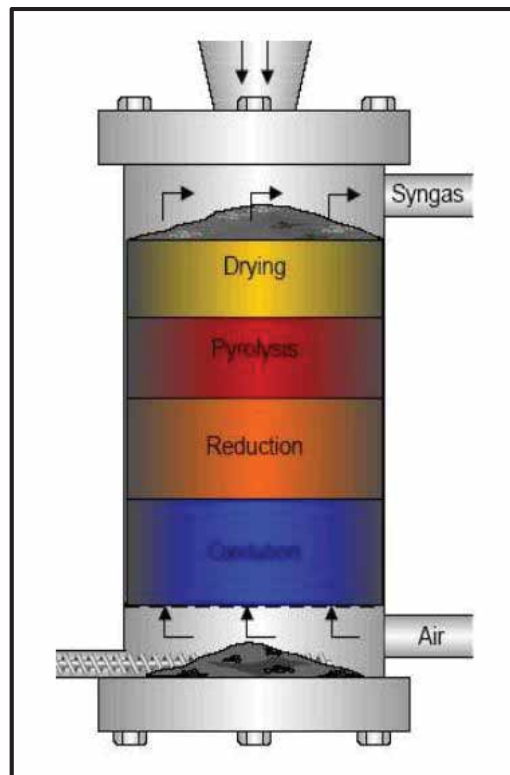
En donde el combustible permanece estático dentro del gasificador, un lecho de partículas de combustible sólido a través del cual pasa aire y el gas ya sea hacia arriba o hacia abajo; son el tipo más simple de gasificadores y son las únicas aptas para la aplicación en baja escala. Estos gasificadores se subdividen, según el sentido del flujo del agente gasificante en: gasificador de cama fija en contracorriente (updraft), gasificador de cama fija en corriente paralela (downdraft) y gasificador de tiro cruzado (crossdraft). (Huaraz Choi, 2013, pág. 22)

##### *2.3.4.1.1 El gasificador de contra corriente de lecho fijo (updraft).*

Este tipo de gasificador tiene bien definidas las zonas de combustión parcial, reducción y pirolisis. El aire ingresa por la parte baja de gasificador y este circula en contracorriente. El gas combustible es entregado por la parte superior a unas temperaturas relativamente bajas; pues, el calor sensible del gas es utilizado para precalentar y secar el combustible; con ello, se logran altas eficiencias. Las desventajas que acusa este sistema de gasificación, son el alto contenido



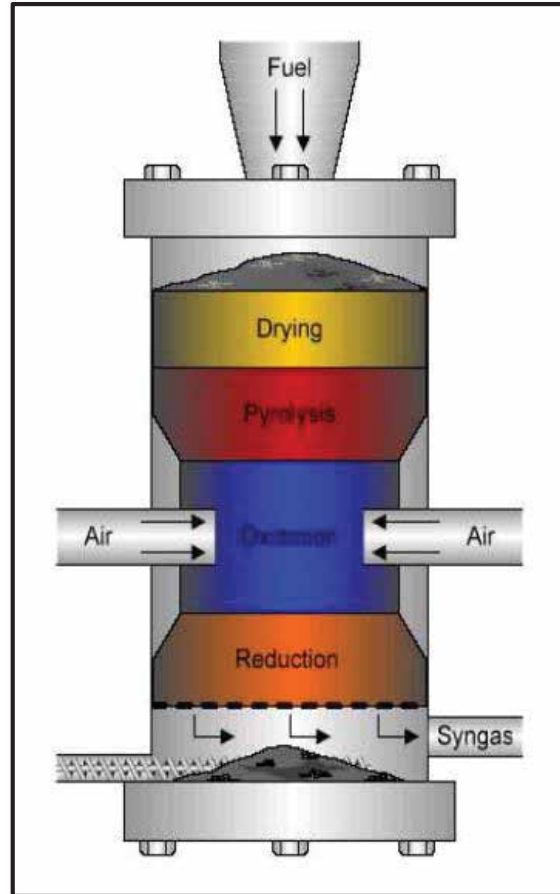
de alquitrán del gas continuo que redonda en dificultades para la utilización en motores de combustión interna. (Augusto Estrada & Zapata Meneses, 2004, pág. 157)



**Figura 7. Diferentes zonas de reacción en gasificador tipo updraft.** Fuente: (Proenza Pérez, 2011, pág. 3).

#### 2.3.4.1.2 El gasificador de corriente paralela (downdraft).

El gasificador downdraft entrega el gas combustible por la parte baja y la admisión de aire es realizada por la parte media del mismo. Las dificultades que se tiene que enfrentar en esta configuración en el contenido de cenizas y humedad en el gas producido; por otra parte, requiere de un tiempo prolongado de encendido que puede estar en un rango de 20 a 30 minutos. En general este tipo de configuración es más aceptable para aplicaciones en motores de combustión interna y turbinas de gas. (Augusto Estrada & Zapata Meneses, 2004, pág. 157)



**Figura 8. Diferentes zonas de reacción en gasificador tipo downdraft.** Fuente: (Proenza Perez, 2011, pág. 3).

#### 2.3.4.1.3 El gasificador de tiro cruzado (crossdraft).

Este gasificador tiene ventajas significativas sobre los gasificadores updraft y downdraft. El tiempo de arranque es de alrededor 5 minutos, tienen capacidad de operar con combustibles húmedos o secos y la temperatura del gas producido es relativamente alta. De ahí se desprende que la composición del gas producido tiene un bajo contenido de hidrógeno y de metano. Como desventaja se debe considerar la necesidad de ser utilizados con combustibles con bajo contenido de cenizas, como son la madera y el carbón mineral. (Augusto Estrada & Zapata Meneses, 2004, pág. 158)

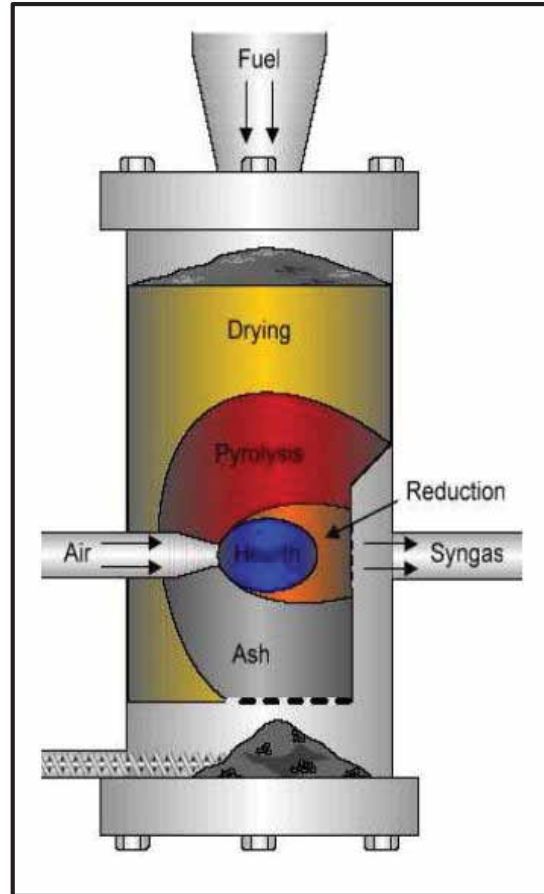
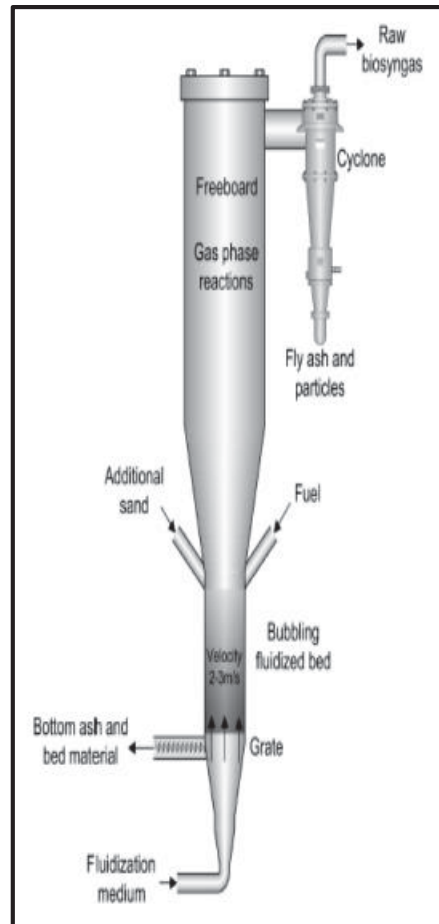


Figura 9. Diferentes zonas de reacción en gasificador tipo crossdraft. Fuente: (Proenza Perez, 2011, pág. 3).

#### 2.3.4.2 Gasificadores de cama fluidizada.

El combustible es fluidizado en el aire o vapor. La ceniza es removida como polvo al caer por la gravedad. Se sopla aire a través del cual eleva a las partículas sólidas a velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión. Después por medio de una fuente externa de calor se comienza a calentar el lecho y el material de alimentación se introduce tan pronto como se alcanza una temperatura suficientemente elevada. Las partículas del combustible se introducen por el fondo del reactor, se mezclan muy rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente alcanzando la temperatura del lecho. (Huaraz Choi, 2013, pág. 25)



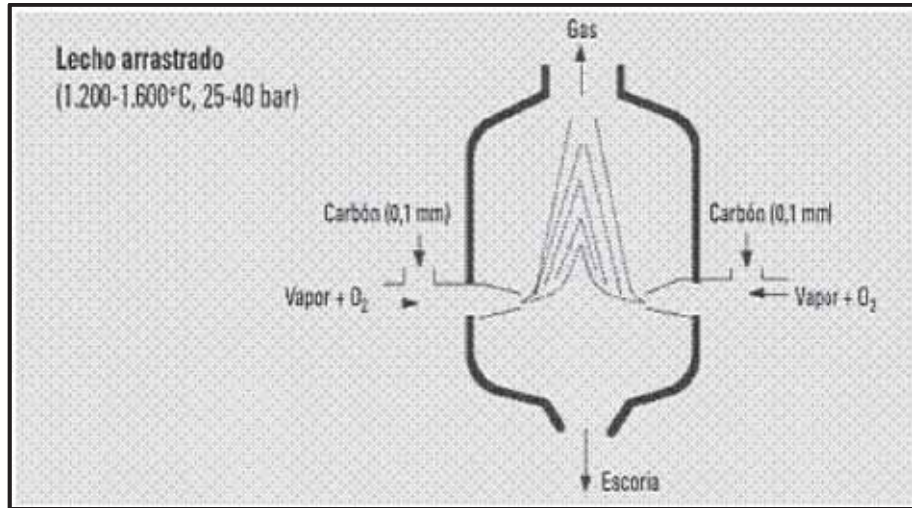
**Figura 10. Gasificador de tipo cama fluidizada burbujeante.** Fuente: (Proenza Pérez, 2011, pág. 3).

#### ***2.3.4.3 Gasificador de flujo arrastrado.***

Este tipo de gasificador funciona a partir de dividir finamente el combustible ( $<0.1$  mm), reacciona con vapor y oxígeno en una zona de alta temperatura y presión (temperaturas de  $1500$  °C a  $1600$  °C y presiones de 25 bar a 40 bar) y gran turbulencia, donde se produce una intensa mezcla del combustible con los agentes gasificantes. Las altas temperaturas y presiones facilitan el alcance de muy altos desempeños, aunque la eficiencia térmica es baja debido a que el gas producido debe ser enfriado antes de ser filtrado con las tecnologías existentes actualmente. (Huaraz Choi, 2013, pág. 26)



Todos los gasificadores de flujo arrastrado remueven la mayor parte de la ceniza en forma de escoria debido a la alta temperatura de funcionamiento es mayor que la temperatura de fusión de la ceniza. Entonces, en estas condiciones las cenizas fundidas del combustible fluyen en forma de lava por la parte inferior del gasificador, antes de solidificarse por enfriamiento, y el gas abandona el reactor por la parte superior. (Huaraz Choi, 2013, pág. 26)



**Figura 11. Gasificador de tipo flujo arrastrado.** Fuente: (Huaraz Choi, 2013, pág. 26).







### 2.3.5 Ventajas y desventajas de cada tipo de gasificador.

**Tabla 3**

*Ventajas y desventajas de cada tipo de gasificador*

<b>Tipo de gasificador</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Contra corriente (updraft)	Simplicidad en la construcción y uso. Baja temperatura del gas producido. Alta eficiencia en la gasificación. Puede utilizarse combustibles con alta humedad.	Gran cantidad de brea y alquitrán.
Corriente paralela (downdraft)	Alto rango de potencias desde 80 KW hasta 500 KW o mas La producción de un gas tiene un bajo contenido de tar.	Grandes cantidades de cenizas y partículas de polvos El combustible debe ser preparado. Altas temperaturas en la salida de gases. El contenido de humedad debe ser menor al 25% (en base humedad).
Tiro cruzado (crossdraft)	Puede operar en pequeñas escalas	Alta cantidad de cenizas en los gases de combustión. El combustible debe ser previamente preparado. Alta temperatura de los gases producidos. Baja eficiencia térmica en la gasificación. Debe utilizarse biomasa seca.
Cama fluidizada	Rendimientos mayores a los gasificadores de tipo cama fijo. Puede trabajar con combustibles altamente corrosivos.	Debe utilizarse un combustible altamente reactivo. La ceniza generada, generalmente es altamente corrosivo.
Gasificador de flujo arrastrado	Alcance de altos desempeños. Las altas temperaturas garantizan la ausencia de breas y alquitranes. Eliminación de las cenizas en forma de escoria. Utilización a gran escala.	Mayor consumo de aire primario. La pulverización o atomización del combustible. Mayores necesidades energéticas.

Fuente: (Huaraz Choi, 2013, pág. 27).





**Tabla 4**

*Comparación de diferentes gasificadores de lecho fijo.*

<b>Parámetros</b>	<b>Updraft</b>	<b>Downdraft</b>	<b>Crossdraft</b>
Combustible específico	Moderado, puede aceptar otro tipo de combustible	El combustible tiene que ser específico	Moderado, puede aceptar otro tipo de combustibles
Tamaño del combustible	Muy bueno	Bueno	Bueno
Contenido de cenizas	Es muy sensible al contenido de cenizas	Es muy sensible al contenido de cenizas	Es muy sensible al contenido de cenizas
Temperatura de reacción	1000 °C	1000 °C	900 °C
Temperatura del gas de salida	250 °C	800 °C	900 °C
Tar (líquido producido en la pirólisis) en el gas generado	El contenido de tar es muy alto	El contenido de tar es muy bajo	El contenido de tar es muy alto
Eficiencia térmica	Tiene una excelente eficiencia térmica	Tiene muy buena eficiencia térmica	Tiene una buena eficiencia térmica

Fuente: (Huaraz Choi, 2013, pág. 28)

## 2.4 Otros Conceptos Importantes

### 2.4.1 Ciclón.

El ciclón es un equipo que sirve para separar las partículas sólidas suspendidas en un gas o un líquido, se caracterizan por ser equipos de alta eficiencia, muy sencillos y de bajo costo. La temperatura a la que opera el equipo, depende del material de la que está construido.

Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son: ciclones de alta eficiencia, ciclones convencionales y ciclones de alta capacidad.



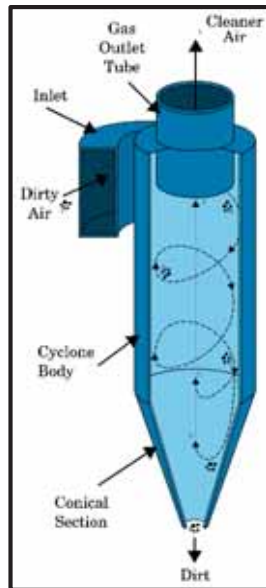


Figura 12. Configuración de un ciclón. Fuente:

[https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwi164KhqumAhWLKLkGHbbkBVkQjRx6BAGBEAQ&url=https%3A%2F%2Fes.wikipedia.org%2Fwiki%2FSeparador\\_cicl%25C3%25B3nico&psig=AOvVaw041pchmIDS0o-mpFG2zjM2&ust=1578137438199755](https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwi164KhqumAhWLKLkGHbbkBVkQjRx6BAGBEAQ&url=https%3A%2F%2Fes.wikipedia.org%2Fwiki%2FSeparador_cicl%25C3%25B3nico&psig=AOvVaw041pchmIDS0o-mpFG2zjM2&ust=1578137438199755)

#### 2.4.2 Eficiencia térmica.

El rendimiento térmico de una máquina térmica se calcula como el cociente entre la energía producida y energía suministrada a la máquina. La eficiencia térmica de una instalación se calcula con la siguiente ecuación:

$$\eta_{ter} = \frac{E_{producida}}{E_{suministrada}} = \frac{E_{sal}}{E_{entr}}$$

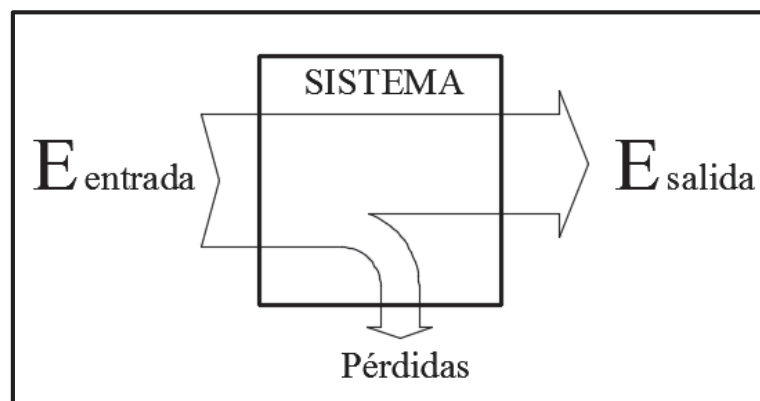


Figura 13. Diagrama energético. Fuente: elaboración propia





## CAPITULO III

### **Análisis y Selección del Combustible para Gasificación**

En el capítulo II se realizó un estudio general sobre la biomasa, tipos de biomasa, características, ventajas, desventajas, etc. En el presente capítulo se enfatiza en los residuos agrícolas (biomasa seca) como combustible sólido para la gasificación. Los residuos agrícolas son motivo de estudio de este capítulo por ser el énfasis como combustible de la problemática del presente trabajo de tesis, además por la abundancia que presentan en la región Cusco, así como en todo el Perú.

Para la selección de la biomasa (residuo agrícola) que se usará como combustible para la gasificación, se tendrá especial valoración a los residuos que se generan en el departamento de Cusco, pues el trabajo de investigación busca en primer lugar solucionar el problema a nivel del ámbito regional y posteriormente a nivel del ámbito nacional.

### **3.1 Producción Agrícola en el Perú**

Según estimaciones y proyecciones de población de la INEI, la población peruana para el 2018 es de 77% de población urbano (24 774 300) y 23% de población rural (7 387 900) (Compañía Peruana de Estudios de Mercados y Opinión Pública S.A.C.-CPI, 2018). La actividad económica de la población rural en su mayor parte es la agricultura, especialmente de la región sierra.

Por naturaleza el Perú siempre fue un país agricultor. En años anteriores la agricultura se practicó a nivel de autoconsumo, es decir, para el propio consumo del productor. En la actualidad la agricultura es una actividad económica rentable y una oportunidad para mejorar la calidad de vida.

El dinamismo de la agricultura condiciona algunos factores, como el aprovechamiento de mayores extensiones de territorio nacional, para conseguir mayor producción. Una mayor





producción implica mayores cantidades de residuos, las cuales pueden ser un punto desfavorable ambiental y económicamente sino se les da un tratamiento adecuado.

En el anuario estadístico de producción agrícola 2017 del Sistema Integrado de Estadística Agraria del Ministerio de Agricultura y Riego, se puede apreciar la producción de los diferentes cultivos a nivel nacional y por regiones en el Perú. En la tabla 5 se muestra la producción de algunos cultivos agrícolas, la información detallada se encuentra en el APÉNDICE 1.

**Tabla 5**  
*Producción de Principales Cultivos en el Perú 2017*

<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>
Arroz cáscara	3,038,766	Trigo	192,099	Pallar verde	4,303
Avena grano	19,860	Cacao	121,825	Papa	4,776,294
Cebada grano	202,974	Café pergamino	344,910	Haba grano seco	72,818
Frijol grano seco	75,706	Cebada forrajera	458,246	Haba verde	69,305
Maíz a. duro	1,249,600	Maíz chala	1,782,914	Kiwicha	2,692
Maíz amiláceo	273,869	Pasto elefante	2,755,851	Soya	1,581
Maíz choclo	388,859	Rye Grass	1,836,111	Coliflor	17,941
Maíz morado	23,092	Trébol	466,008	Caña para alcohol	753,428
Quinua	78,657	Olluco	184,385	Caña para azúcar	9,399,617
Tarhui	13,783	Pallar grano seco	10,311	Caña para etanol	974,428

Nota: resumen del anuario estadístico de producción agrícola 2017. Fuente: (Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), s.f.).





### 3.2 Producción Agrícola en el Cusco

Según estimaciones y proyecciones de población de la INEI, la población cusqueña para el 2018 es de 55.64% de población urbano (745 000 personas) y 44.36% de población rural (593 900 personas) (Compañía Peruana de Estudios de Mercados y Opinión Pública S.A.C.-CPI, 2018).

La actividad de la población rural de la región Cusco es también la agricultura en su gran mayoría, así como en otras regiones del Perú. Para fines del trabajo de tesis nos ocuparemos de los residuos de los cultivos agrícolas en el Cusco.

En la tabla 6 se muestra los cultivos con mayor producción en el cusco, cuyos residuos son potenciales para el aprovechamiento energético por medios termoquímicos (gasificación).

**Tabla 6**

*Producción de principales cultivos en el cusco, 2017*

<b>Cultivo</b>	<b>Producción (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción (toneladas)</b>
Papa	388,467	Olluco	37,507
Alfalfa	136,832	Rye grass	29,214
Avena forrajera	148,885	Plátano	27,994
Maíz amiláceo	62,054	Café pergamino	26,615
Maíz choclo	39,302	Yuca	26,272

Nota: resumen del anuario estadístico de producción agrícola 2017. Fuente: (Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), s.f.).

En el APÉNDICE 2 se muestra la producción de los principales cultivos en el cusco en el 2017.





Los cultivos agrícolas, siempre tienen residuos agrícolas (ramas, cascarillas, paja, hojas, etc.), las cuales pueden ser una fuente de energía importante. Analizando la tabla 6 se puede afirmar que en el Cusco se tiene una importante cantidad de residuos agrícolas. El residuo de cada cultivo tiene diferentes propiedades físicas, químicas y morfológicas, por lo cual el tratamiento que se le debe dar a cada producto es independiente, especialmente para procesos de gasificación. En el APÉNDICE 3 se describe las características morfológicas de los cultivos mencionados en la tabla 6.

### **3.3 Características Evaluados de Residuos Agrícolas para Selección como Fuente Combustible**

La evaluación para seleccionar la fuente de combustible biomásica adecuado para la gasificación, se realiza a los residuos de los cultivos, mas no a la parte destinada al consumo humano o animal de la planta. En el trabajo de tesis se busca aprovechar únicamente los residuos agrícolas.

Las características y/o propiedades evaluadas son (referidas a los residuos de los cultivos):

#### **3.3.1 Densidad aparente.**

Se define como el peso por unidad de volumen de combustible simplemente apilado. Los combustibles de alta densidad aparente tienen un alto valor de energía por volumen. Los combustibles de baja densidad aparente se traducen en valores caloríficos del gas reducidos (FAO, 1993).

Se concluye que, a mayor densidad aparente, el combustible será mejor. Por ello se realiza la siguiente valoración.







---

<b>Valoración</b>	<b>Muy bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	<b>Muy alto</b>
Densidad aparente	0	1	2	3	4

---

### 3.3.2 Humedad.

El valor calorífico del gas producido por cualquier tipo de gasificador depende, al menos en parte, del contenido de humedad del combustible, además un alto contenido de humedad reduce la eficiencia térmica (FAO, 1993).

Se concluye que una humedad elevada del combustible no es conveniente. De ello se realiza la siguiente valoración.

---

<b>Valoración</b>	<b>Muy bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>	<b>Muy alto</b>
Humedad	4	3	2	1	0

---

### 3.3.3 Granulometría.

Un material de alimentación de grano fino o blando, puede ocasionar problemas de circulación, caída de presión y polvo en el gas. Un tamaño excesivo de las partículas da lugar a una menor reactividad del combustible, generando problemas de arranque y mala calidad de gas (FAO, 1993).

Para la granulometría del combustible se realiza la siguiente valoración.

---

<b>Valoración</b>	<b>No satisface</b>	<b>Aceptable a las justas</b>	<b>Suficiente</b>	<b>Bien</b>	<b>Muy bien</b>
Granulometría	0	1	2	3	4

---





### 3.3.4 Poder calorífico.

A mayor poder calorífico, mayor será la eficiencia del sistema de gasificación. Se hace la siguiente valoración.

Valoración	No satisface	Aceptable a las justas	Suficiente	Bien	Muy bien
Poder calorífico	0	1	2	3	4

### 3.3.5 Triturado.

El requerimiento de trituración de algunos combustibles, es un proceso adicional que requiere de energía. Es probable que los procesos de trituración sean accionados por motores que consumen energía mecánica y/o eléctrica, que conllevan a mayores costos. Por razones económicas es mejor evitar estos procesos, por ello se realiza la siguiente valoración.

Valoración	Imprescindible	Esencial	Necesario	No requiere	Innecesario
Triturado	0	1	2	3	4

### 3.3.6 Secado.

Algunos combustibles poseen altas humedades, que para reducirlas se requiere más que los rayos solares. Emplear energía extra para el secado, se traduce en mayores costos. Respecto al secado se realiza la siguiente valoración.

Valoración	Imprescindible	Esencial	Necesario	No requiere	Innecesario
Secado	0	1	2	3	4





### 3.3.7 Producción.

La cantidad de residuos agrícolas generados de un determinado cultivo es directamente proporcional a la producción registrada. Se realiza la siguiente valoración con respecto a la producción.

Valoración	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Producción	0	1	2	3	4

### 3.3.8 Necesidad de cultivo energético.

Algunos combustibles como los forrajes no generan residuos, pues se aprovechan casi en su totalidad en los fines para los cuales son cultivadas. En este caso, para el aprovechamiento energético de estos productos, se debe realizar cultivos destinados únicamente para este fin, en nuestro caso para la gasificación. Se realiza la siguiente valoración con respecto a la necesidad de cultivo.

Valoración	Imprescindible	Esencial	Necesario	No requiere	Innecesario
Necesidad de cultivo energético	0	1	2	3	4

### 3.4 Valoración de los Residuos Agrícolas como Fuente Combustible para Gasificación

La valoración se realiza únicamente a los residuos generados en la producción de los diferentes cultivos mencionados y estudiados anteriormente. Cabe aclarar que la parte destinada a la comercialización, consumo humano y/o animal, no se consideran como residuos del cultivo.





**Tabla 7**

*Valoración de los residuos agrícolas en el Cusco como fuente de combustible para gasificación*

CULTIVO	Características y/ o propiedades evaluados de los residuos de cultivos en el Cusco								
	Densidad aparente	Humedad	Granulometría	Poder calorífico	Triturado	Secado	Producción	Necesidad de cultivo energético	PUNTAJE TOTAL
Papa	2	2	1	2	2	2	3	4	18
Alfalfa	2	2	1	2	2	2	3	1	15
Avena forrajera	2	2	1	2	2	2	3	1	15
Maíz amiláceo	2	1	0	2	0	1	3	4	13
Maíz choclo	2	1	0	2	0	1	3	4	13
Olluco	2	2	1	2	2	2	2	4	17
Rye grass	2	2	1	2	2	2	2	1	14
Plátano	2	1	0	2	0	1	2	4	12
Café pergamino	2	2	3	2	3	2	2	4	20
Yuca	2	2	1	2	1	2	2	4	16

Fuente: elaboración propia

Según la tabla 7, el mayor puntaje es para el café pergamino. Para nuestro trabajo de investigación elegimos los residuos del cultivo del café, como combustible de gasificación. Como se mencionó anteriormente, la mayor cantidad de residuos se generan de la cereza del café, como son: pulpa del café, cascarilla del café, etc.





### 3.5 Residuos Agrícolas del Cultivo de Café, Alternativa para la Gasificación

#### 3.5.1 Proceso de producción del café.

“Básicamente el proceso consiste en transformar el café desde su forma inicial, o cereza en café tostado que sirve para la preparación de la bebida” (Arenas Castellanos, 2009, pág. 46). A continuación, se muestra el proceso:

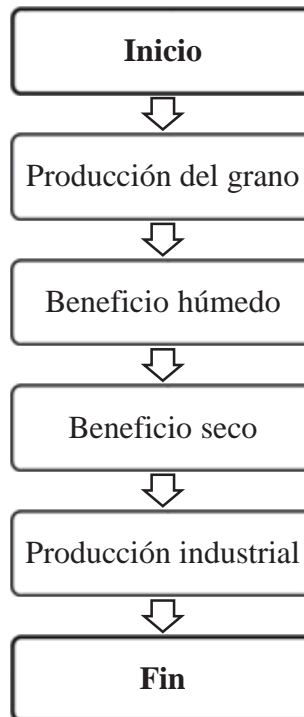


Figura 15. Proceso de producción del café. Fuente: (Arenas Castellanos, 2009).

##### 3.5.1.1 Producción del grano.

“(…) consiste en la siembra, cuidado del cultivo y recolección del grano” (Arenas Castellanos, 2009, pág. 46). Los granos que se recolectan, son aquellos que tienen un aspecto amarillo o rojizo.





**Cereza de café:** es el fruto en estado de completa maduración de las plantas.

fuelle: <http://www.coffee-hat.com/public/pagine/42/cherries.jpg>

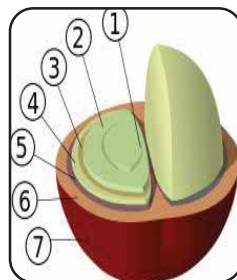
Figura 16. Cereza de café.



**Café pergamino húmedo:** es el producto resultante del proceso de lavado en el beneficio húmedo del café.

fuelle: [http://shuquush.com/joomla1.5/images/shuquush/Pergamino\\_3](http://shuquush.com/joomla1.5/images/shuquush/Pergamino_3)

Figura 17. Café pergamino húmedo



**Estructura del grano de café:**

1. Corte central
2. Grano de café (endosperma)
3. Piel plateada (tegumento)
4. Pergamino (endocarpio)
5. Capa de pectina
6. Pulpa (mesocarpio)
7. Piel exterior (epicarpio)

fuelle: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e0/Coffee\\_Bean\\_Structure.svg/220px-Coffee\\_Bean\\_Structure.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e0/Coffee_Bean_Structure.svg/220px-Coffee_Bean_Structure.svg.png)

Figura 18. Estructura del grano de café.



### 3.5.1.2 Beneficio húmedo del café.

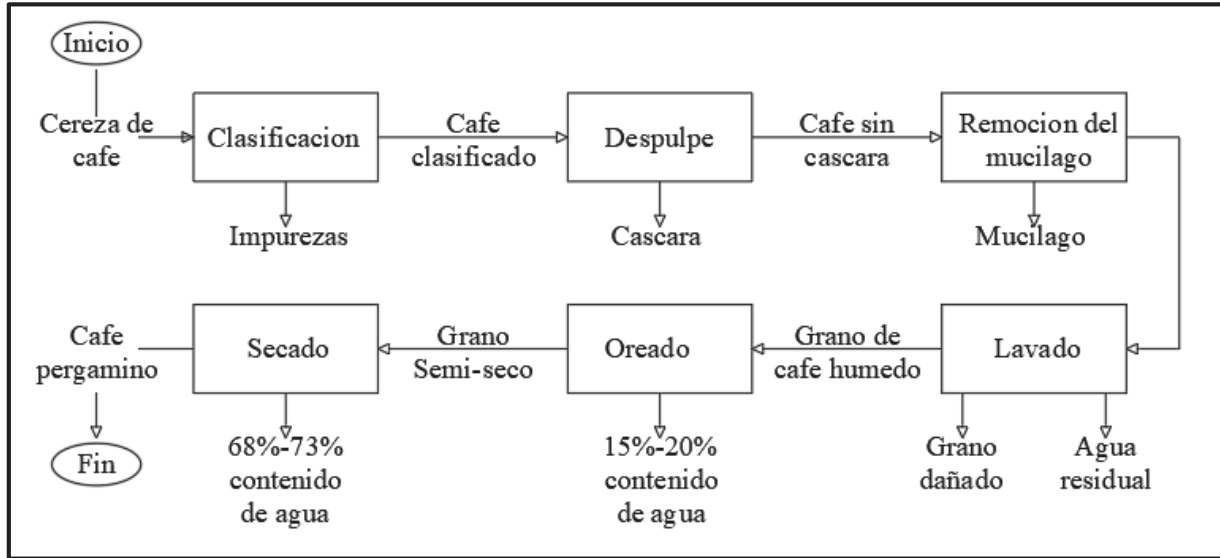


Figura 19. Subproceso de beneficio húmedo del café. Fuente: (Arenas Castellanos, 2009, pág. 48).

- Clasificación:** se busca eliminar los granos verdes y algunas impurezas como hojas, ramas, etc.
- Despulpe:** consiste en separar la pulpa o cáscara del grano del café, mediante las máquinas despulpadoras.
- Remoción del mucilago:** puede ser por fermentación natural o a través de máquinas.
- Lavado:** consiste en la limpieza de los granos.
- Oreado:** consiste en escurrir el exceso de agua.
- Secado:** después del secado se obtiene el café pergamino.

Nuestro trabajo de tesis se centra en esta parte del proceso de la producción del café. Pues todo el proceso del beneficiado húmedo del café se realiza en el campo, por el propio caficultor. Los principales residuos del beneficiado húmedo son la pulpa de café, el mucilago y los granos dañados. La mayor proporción de residuos corresponde a la pulpa de café, que será la materia

orgánica de estudio para nuestro trabajo de investigación. El caficultor al realizar el proceso del beneficiado húmedo del café, obtiene grandes cantidades de la pulpa, estas muchas veces son manejadas inadecuadamente, agravando contra el medio ambiente. Un manejo inadecuado de la pulpa de café puede ser un punto de propalación y propagación de diferentes insectos y plagas propios de la planta del café. El presente trabajo de tesis plantea el aprovechamiento energético de la pulpa de café (broza del café) mediante un proceso de gasificación para generación eléctrica y térmica, la energía térmica obtenida se puede emplear en el secado del café, mejorando la calidad del grano y por ende el costo.

### 3.5.1.3 Beneficio Seco.

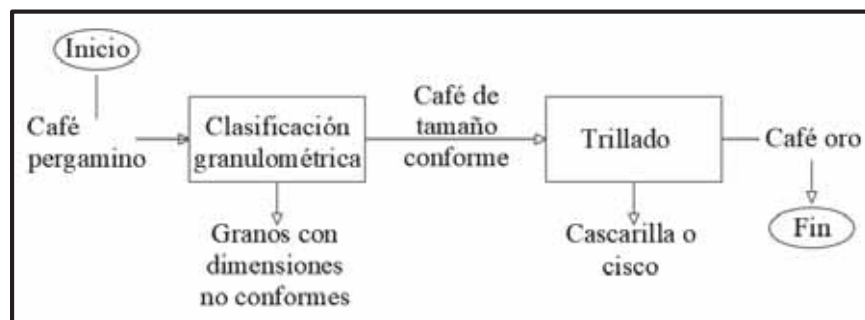


Figura 20. Subproceso del beneficio seco del café. Fuente: (Arenas Castellanos, 2009, pág. 48).

### 3.5.1.4 Industrialización del grano.

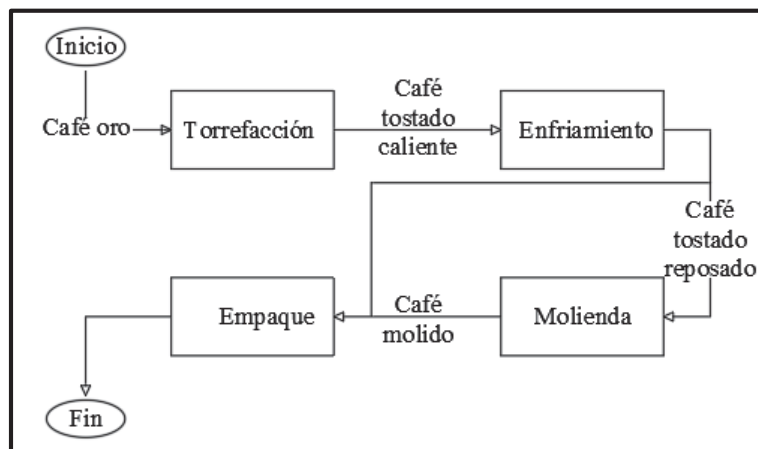


Figura 21. Subproceso de industrialización del grano de café. Fuente: (Arenas Castellanos, 2009, pág. 49).





- g) **Torrefacción:** proceso en el cual el café pierde la humedad restante del grano, así como algunos aceites volátiles. Además, es el proceso en el cual el grano cambia de color amarillo oro a marrón oscuro.

### 3.5.2 Estadísticas de producción del café pergamino y pulpa de café (broza de café).

En la tabla 8 se muestra la composición en porcentaje de cada componente del grano de café en base seca.

**Tabla 8**

*Composición del grano de café en base seca*

<b>Etapas del grano</b>	<b>Composición</b>	<b>% del grano en base seca</b>
Café cereza	Pulpa seca	29%
	Mucílago	4%
Café pergamino	Cascarilla	12%
Café oro	Agua y volátiles	16%
	Grano	39%

Fuente: INCAP (1978) como se citó en (Arenas Castellanos, 2009, pág. 50).

Según el proceso de beneficio húmedo del café descrito en el ítem 3.5.1.2, el café pergamino es el resultado de quitar la pulpa (despulpe) y el mucílago (remoción del mucílago) de la cereza del café, por lo cual según la tabla 8 se tiene:

$$\text{Café pergamino} = \text{Cascarilla} + \text{Agua y volátiles} + \text{Grano}$$

$$\text{Café pergamino} = 12\% + 16\% + 39\% = 67\%$$

Las estadísticas de producción del café indicadas, corresponden al café pergamino.





### 3.5.2.1 Estadísticas de producción de café pergamino y pulpa de café (broza de café) en el Perú.

El cálculo de la producción de la pulpa de café, en función de la producción del café pergamino (producción registrada) se realiza mediante una simple regla tres.

**Tabla 9**  
*Producción de la pulpa de café en el Perú*

<b>Año</b>	<b>Producción de café pergamino (toneladas) 67%</b>	<b>Porcentaje de pulpa seca</b>	<b>Pulpa seca disponible (toneladas)</b>	<b>Pulpa seca disponible (Kilogramos)</b>
2010	264,605.00	29%	114,530.52	114,530,522.39
2011	331,547.00	29%	143,505.42	143,505,417.91
2012	314,471.00	29%	136,114.31	136,114,313.43
2013	255,857.00	29%	110,744.07	110,744,074.63
2014	222,047.00	29%	96,109.90	96,109,895.52
2015	251,938.00	29%	109,047.79	109,047,791.04
2016	277,760.00	29%	120,224.48	120,224,477.61
2017	344,910.00	29%	149,289.40	149,289,402.99

Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego-Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), extraído de <http://siea.minag.gob.pe/siea/?q=anuarios>.

En tabla 9 se muestra que la producción de los residuos de la pulpa de café es bastante importante, como la que se registró en el 2017, que es de 149, 289, 402.99 Kg aproximadamente.



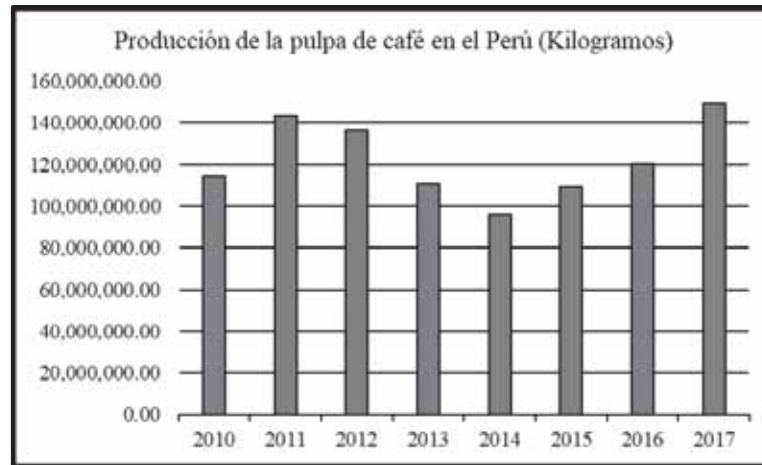


Figura 22. Producción de la pulpa de café en el Perú en Kilogramos.

### 3.5.2.2 Estadísticas de producción de café pergamino y pulpa de café (broza de café) en el

Cusco.

**Tabla 10**

*Producción de la pulpa de café en el Cusco*

Año	Producción de café pergamino (toneladas) 67%	Porcentaje de pulpa seca	Pulpa seca disponible (toneladas)	Pulpa seca disponible (Kilogramos)
2010	24,475.00	29%	10,593.66	10,593,656.72
2011	53,548.00	29%	23,177.49	23,177,492.54
2012	35,730.00	29%	15,465.22	15,465,223.88
2013	38,545.00	29%	16,683.66	16,683,656.72
2014	28,426.00	29%	12,303.79	12,303,791.04
2015	18,413.00	29%	7,969.81	7,969,805.97
2016	27,163.00	29%	11,757.12	11,757,119.40
2017	26,615.00	29%	11,519.93	11,519,925.37

Fuente: Ministerio de Agricultura y Riego-Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), extraído de <http://siea.minag.gob.pe/siea/?q=anuarios>



Según la tabla 10, la producción del café pergamino en el 2015 disminuyó, esto fue debido a la invasión de plagas. En los últimos años se recobró la producción del café, y por consiguiente la producción de la pulpa de café, por ejemplo, en el 2017 se generó 11, 519, 925.37 Kilogramos de pulpa de café aproximadamente, lo que implica una producción importante de residuos.

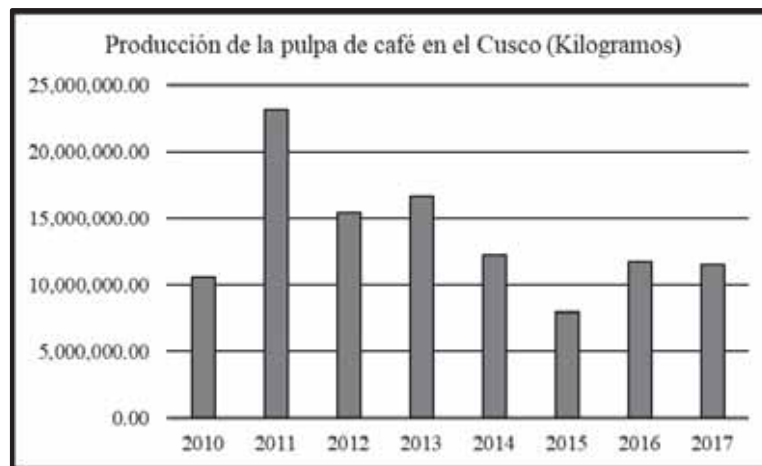


Figura 23. Producción de la pulpa de café en el Cusco en Kilogramos.

### 3.5.3 Análisis inmediato y elemental de la pulpa del café

La broza de café (pulpa de café) como todo residuo biomásica tiene un alto contenido de carbono, por lo que en condiciones apropiadas puede ser utilizado como combustible, ya sea de forma directa, como en la combustión o mediante algún otro proceso, como la gasificación. En este último proceso es de vital importancia estimar la cantidad de oxígeno necesario y la composición de los gases de salida, para ambos casos es necesario conocer la composición del material a gasificar (Mairena Calvo, 2010).

La información referente a la composición elemental e inmediato de la pulpa de café es escasa, esto se deba posiblemente al poco interés en el aprovechamiento termoquímico de esta biomasa.

La humedad es una propiedad influyente en la composición química y el poder calorífico de la biomasa. A menor humedad, mejores propiedades químicas y mayor poder calorífico.



En la tabla 11 se muestra la composición elemental e inmediato de la pulpa de café, el estudio se realizó para una humedad de 84.27% (norma UNE-CEN/TS 14774-3), esta humedad es muy alta y no es apta para un proceso de gasificación (Álvarez Chávez, 2014).

**Tabla 11**

*Análisis elemental e inmediato de la pulpa de café*

<b>Parámetros</b>	<b>Composición porcentual (%)</b>	<b>Normativa (UNE-CEN/TS)</b>
Análisis inmediato		
Carbono fijo	18.9	15148
Volátiles	69.6	15148
Ceniza	11.5	14775
Análisis elemental		
Carbono	45.2	15104
Hidrogeno	5.5	15104
Nitrógeno	2.19	15104
Oxígeno	35.26	15104
Azufre	0.16	15289
Cloro	0.19	15289
Poder calorífico		
PCS (MJ/Kg)	15.34	14918
PCI (MJ/Kg)	13.96	14918

Fuente: (Álvarez Chávez, 2014, pág. 89)

Para el aprovechamiento óptimo de la pulpa de café en un proceso de gasificación, será necesario el pre-secado al sol. Es posible obtener un valor de humedad de 15% después de exponer la pulpa de café al sol (Mairena Calvo, 2010). La necesidad de un proceso de pre-secado al sol de la pulpa se debe a que esta biomasa posee alta humedad después del beneficio húmedo de la cereza





del café. En la tabla 12 se muestra la composición elemental aproximada de la broza para una humedad del 15%.

**Tabla 12**

*Composición elemental de residuos de café en base seca libre de cenizas*

Elemento	% masa
C	51.33
H	6.79
O	38.65
N	3.02
S	0.21

Fuente: Becidan, Skreiberg, Hustad (2006) como se citó en (Mairena Calvo, 2010, pág. 26).

Los datos mostrados en la tabla 12 corresponden a la composición de todos los residuos del café, pero en los residuos del café la mayor parte lo constituye la broza del café (Mairena Calvo, 2010). Para efectos de cálculo se tomarán dichos valores como propios de la broza (pulpa de café).

Los otros datos esenciales para la broza de café son:

**Tabla 13**

*Otros parámetros de la pulpa de café*

Parámetros	Valor	Fuente
Humedad	15%	(Mairena Calvo, 2010, pág. 36)
Cenizas	6.58%	(Mairena Calvo, 2010, pág. 26)
Densidad real	958 Kg/m <sup>3</sup>	(Castillo Benavides, 2014, pág. 76)
Densidad aparente	124.4 Kg/m <sup>3</sup>	(Castillo Benavides, 2014, pág. 77)

Nota: las fuentes se indican en la misma tabla

### 3.5.4 Cálculo del poder calorífico de la pulpa de café.

Es posible predecir el poder calorífico superior e inferior de la pulpa de café. Channiwala & Parikh (2002) como se citó en (Castillo Benavides, 2014) presentan: “una correlación unificada





para el cálculo del poder calorífico superior para combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, esta correlación considera los aportes de cada elemento cuantificado en el análisis elemental” (pag.75).

$$PCS_{pc} \left( \frac{KJ}{Kg} \right) = 349.1 * C + 1178.3 * H + 100.5 * S - 103.4 * O - 15.1 * N - 21.1 * cenizas$$

$$PCS_{pc} \left( \frac{KJ}{Kg} \right) = 349.1 * 51.33 + 1178.3 * 6.79 + 100.5 * 0.21 - 103.4 * 38.65 - 15.1 * 3.02 - 21.1 * 6.58$$

$$PCS_{pc} = 21760.215 \frac{KJ}{Kg}$$

Donde:

$PCS_{pc}$ : Poder calorífico superior de la pulpa de café

Basu (2010) como se citó en (Castillo Benavides, 2014) presenta: “una ecuación para determinar el poder calorífico inferior a partir del poder calorífico superior, el porcentaje de hidrogeno del combustible y su porcentaje de humedad” (pág. 75).

$$PCI_{pc} \left( \frac{KJ}{Kg} \right) = PCS - h_g \left( \frac{9 * H}{100} - \frac{M}{100} \right)$$

$h_g$ : Calor de vaporización del agua (2260 KJ/Kg)

$M$ : Porcentaje de humedad (15%)

$$PCI_{pc} \left( \frac{KJ}{Kg} \right) = 21760.215 - 2260 * \left( \frac{9 * 6.79}{100} - \frac{15}{100} \right)$$

$$PCI_{pc} = 20718.129 \frac{KJ}{Kg}$$

$$PCI_{pc} = 20.718 \frac{MJ}{Kg}$$





Donde:

$PCI_{pc}$ : Poder calorífico inferior de la pulpa de café

### 3.5.5 Composición del gas producido a partir de la pulpa de café

No existe información exacta sobre la composición molar del gas pobre a la salida del gasificador, por ello, en la tabla 14 se muestra una composición aproximada.

**Tabla 14**

*Composición aproximada de los gases a la salida del gasificador*

Componente	% Volumen
$CO$	19.14
$CO_2$	11.49
$H_2$	22.77
$CH_4$	1.28
$N_2$	45.33

Nota: estos resultados son bastante similares a las obtenidas en (Mairena Calvo, 2010, pág. 37)

En el APÉNDICE 4, se detalla el procedimiento de cálculo para los valores mostrados en la tabla 14.

### 3.5.6 Cálculo del poder calorífico del gas pobre.

El poder calorífico del gas pobre, depende de la composición porcentual de los diferentes compuestos que lo componen.







**Tabla 15**

*Poder calorífico del gas pobre obtenido de la pulpa de café*

<b>Componente</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Contenido en %</b>	<b>Poder calorífico (KJ/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>contenido*poder calorífico (KJ/Nm<sup>3</sup>)</b>
Monóxido de carbono	<i>CO</i>	19.14	12655	2422.54
Hidrogeno	<i>H<sub>2</sub></i>	22.77	10770	2452.34
Metano	<i>CH<sub>4</sub></i>	1.28	35825	457.20
Dióxido de carbono	<i>CO<sub>2</sub></i>	11.49	0	0
Nitrógeno	<i>N<sub>2</sub></i>	45.33	0	0
<b>TOTAL</b>				<b>5332.07</b>

Nota: el valor del poder calorífico de cada componente fue extraído de (FAO, 1993), N indica que el volumen del gas se da en  $m^3$  en estado normal.





## CAPITULO IV

### Diseño Conceptual

Para el método de diseño del equipo se usará el VDI 2221, que es una directriz para el enfoque sistemático del diseño de sistemas y productos técnicos, que fue realizado por la Asociación Alemana de Ingeniería en 1987.

#### 4.1 Lista de Exigencias

**Tabla 16**

*Lista de exigencias*

LISTA DE EXIGENCIAS			Pág. 1 de 2
<b>PROYECTO:</b>	DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA DE 25 KW DE POTENCIA A PARTIR DEL USO DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA		Fecha: 03/09/18 Revisado: E.A.C.A.
<b>CLIENTE:</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO		Elaborado: B.B.R.
Fecha (cambios)	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
03/09/18	E	<b>Función principal:</b> Generar energía eléctrica y térmica a partir del uso de un gasificador de biomasa de 25 KW de potencia.	B.B.R.
03/09/18	E	<b>Materia prima:</b> Residuos agrícolas (pulpa de café seca).	B.B.R.
03/09/18	E	<b>Seguridad:</b> La máquina se diseñará de tal modo que no ponga en peligro la integridad física del operario ni al medio ambiente.	B.B.R.
03/09/18	E	<b>Fuente de energía:</b> La máquina usara principalmente la energía acumulada en la biomasa (pulpa de café seca).	B.B.R.





**LISTA DE EXIGENCIAS**

Pág. 2 de 3

<b>PROYECTO:</b>		DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA DE 25 KW DE POTENCIA A PARTIR DEL USO DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA	Fecha: 03/09/18 Revisado: E.A.C.A.
<b>CLIENTE:</b>		UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO	Elaborado: B.B.R.
Fecha (cambios)	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
03/09/18	E	<b>Fabricación:</b> Todas las partes de la maquina deben ser factibles de conseguir y manufacturar en talleres locales, se usarán materiales de fácil adquisición, la construcción será conforme a los planos de diseño.	B.B.R.
03/09/18	D	<b>Transporte:</b> La máquina debe ser desmontable en partes, para un fácil manejo y dividir el peso, de tal modo que no se requiera maquinaria especial para su transporte.	B.B.R.
03/09/18	D	<b>Montaje:</b> La máquina debe ser de fácil montaje e instalación	B.B.R.
03/09/18	E	<b>Operación:</b> Debe ser sencilla, de tal forma que no requiera personal capacitado.	B.B.R.
03/09/18	E	<b>Mantenimiento:</b> Las partes que requieren mantenimiento frecuente deben ser de fácil acceso, además las partes que estén sometidas a mayor desgaste deben ser fácilmente reemplazables.	B.B.R.





LISTA DE EXIGENCIAS			Pág. 3 de 3
<b>PROYECTO:</b>	DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y TÉRMICA DE 25 KW DE POTENCIA A PARTIR DEL USO DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA		Fecha: 03/09/18 Revisado: E.A.C.A.
<b>CLIENTE:</b>	UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO		Elaborado: B.B.R.
Fecha (cambios)	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
03/09/18	D	<b>Costos:</b> Los costos de fabricación, materiales y especialmente de operación deben ser bajos.	B.B.R.
03/09/18	D	<b>Plazo de entrega:</b> Se cumplirá con el cronograma establecido en el plan de tesis.	B.B.R.
03/09/18	D	<b>Ergonomía:</b> Las dimensiones principales de máquina deben ser tales que se puedan trabajar con comodidad.	B.B.R.

Fuente: elaboración propia.





#### 4.1.1 Caja negra.

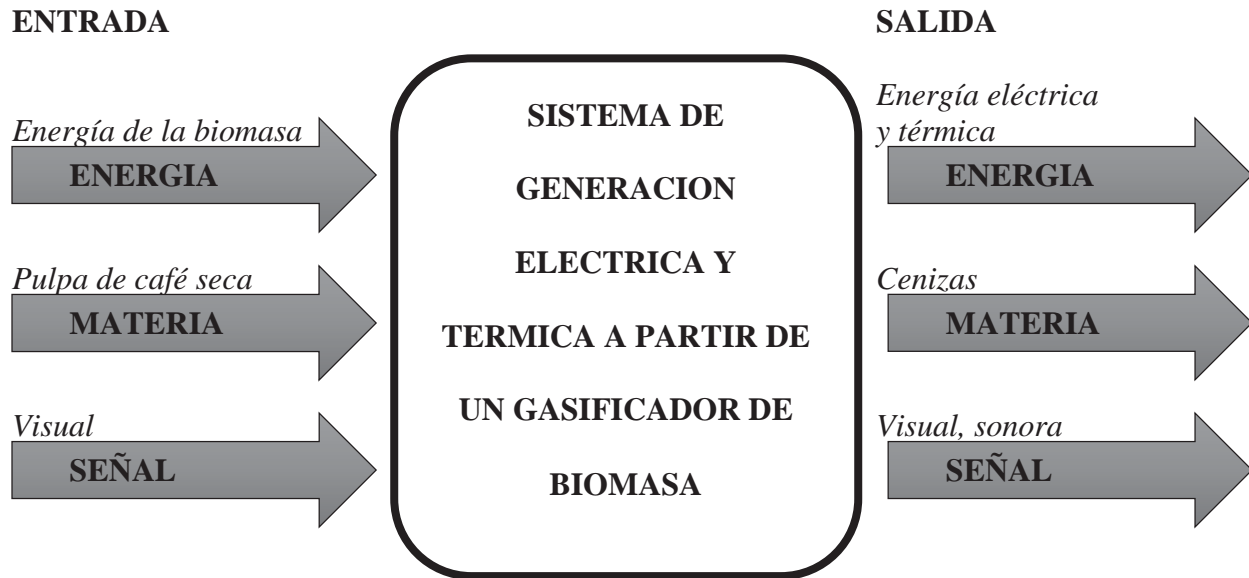


Figura 24. Caja negra. Fuente: elaboración propia.

#### ENTRADAS

**Energía:** La energía que se le suministrará al sistema de generación eléctrica y térmica para su operación será la de la biomasa (energía renovable).

**Materia:** La materia prima para el sistema de generación eléctrica y térmica será la pulpa de café seca (biomasa fuente de combustible).

**Señal:** señal visual de abastecimiento de biomasa (materia prima).

#### SALIDAS

**Energía:** energía eléctrica y energía térmica en forma de calor.

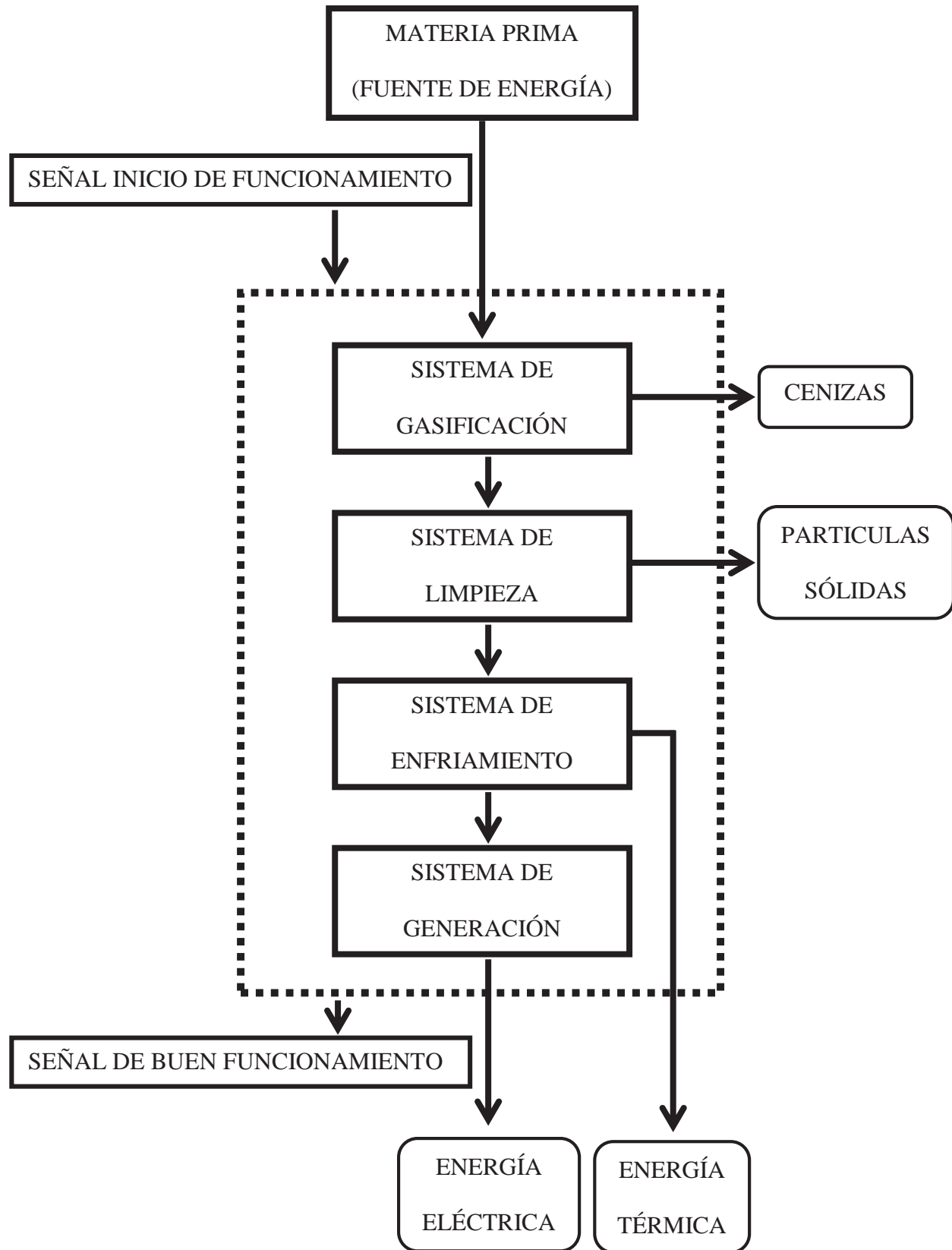
**Materia:** residuos de la gasificación (cenizas) y de la limpieza del gas (partículas sólidas).

**Señal:** visual y sonora del funcionamiento adecuado del sistema.



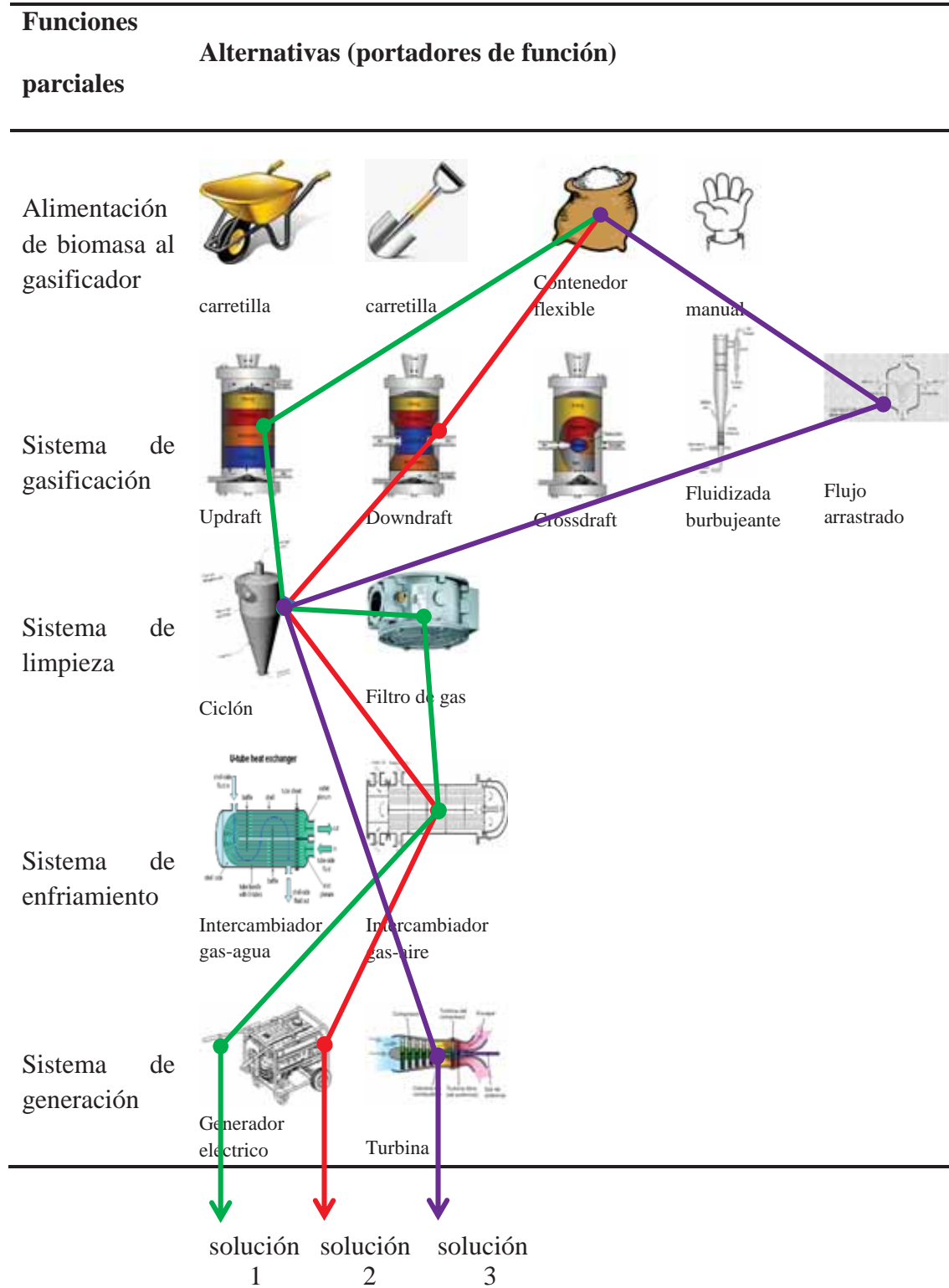


#### 4.1.2 Estructura de funciones.





## 4.2 Matriz Morfológica de Funciones



## 4.3 Conceptos de Solución

### 4.3.1 Concepto de solución N° 1.

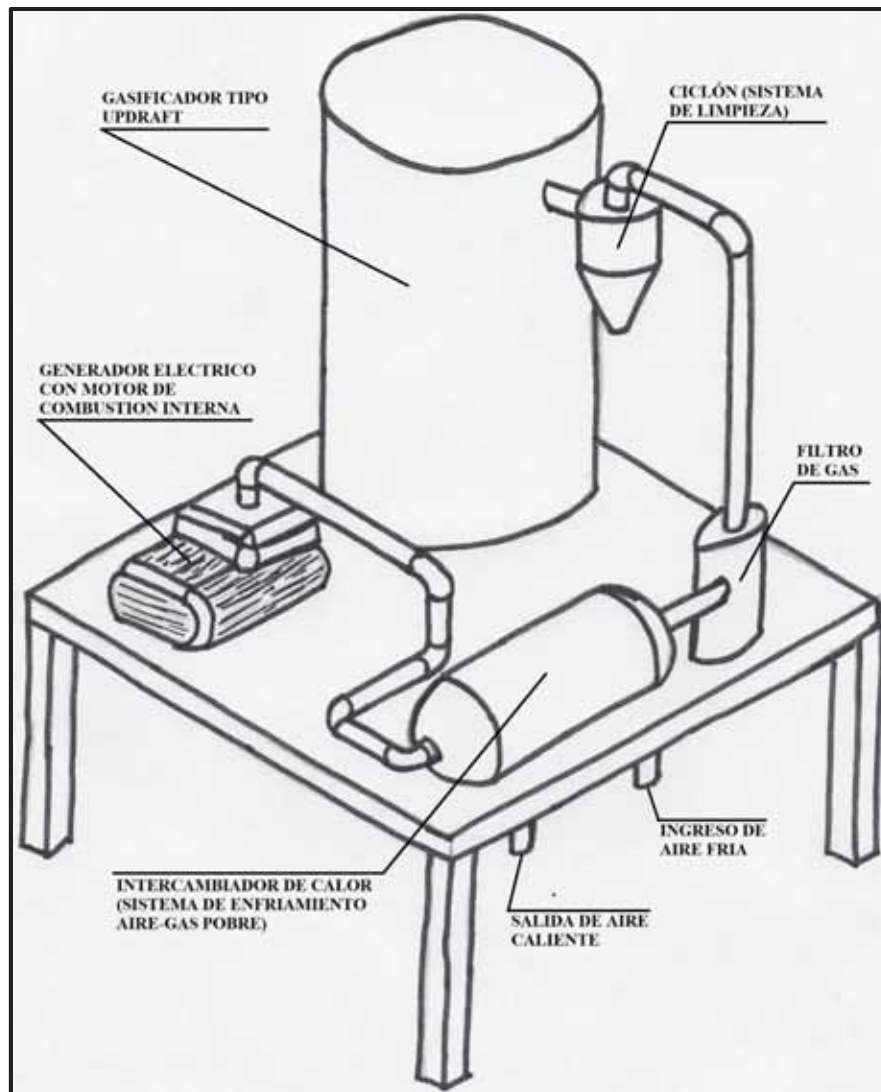


Figura 25. Concepto de solución N° 01. Fuente: elaboración propia.

La forma de alimentación de la biomasa combustible es mediante un saco o un contenedor manipulado por el operario, dependiendo a su capacidad de almacenamiento, este equipo tendrá un tiempo determinado de funcionamiento independiente, al cabo de este tiempo será necesario realizar una nueva carga. El gasificador planteado es del tipo updraft, la principal desventaja de





este gasificador es que el gas pobre generado contiene muchas partículas suspendidas, que son un problema a la hora de emplear en el motor de combustión interna (generador eléctrico). Para la limpieza del gas obtenido se plantea un ciclón y un filtro de gas. La temperatura del gas a la salida del gasificador es elevada, por ello será necesario enfriar hasta una temperatura considerable antes de su ingreso al motor (generador eléctrico), en el sistema planteado el enfriamiento será mediante un intercambiador de calor, que se usará para calentar aire, el aire caliente se empleará en el secado del café pergamino.

#### 4.3.2 Concepto de solución N° 2.

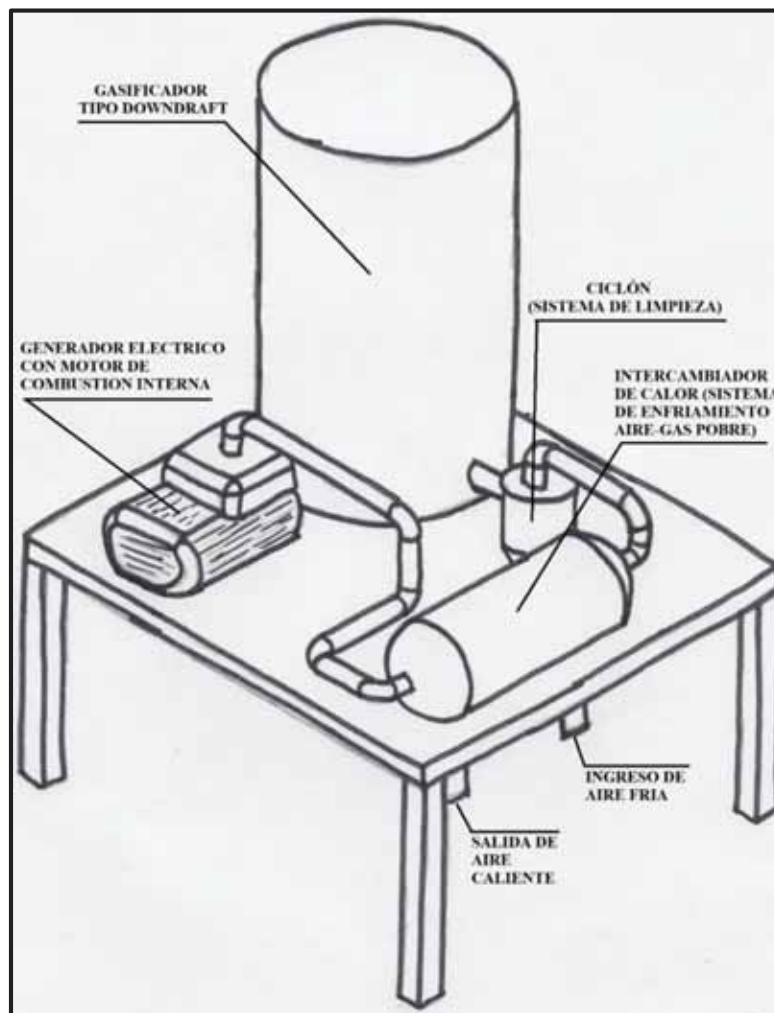


Figura 26. Concepto de solución N° 02. Fuente: elaboración propia.





La forma de alimentación será mediante un saco o un contenedor manipulado por el operario, el gasificador tendrá un tiempo de funcionamiento independiente, dependiendo a la capacidad de almacenamiento de biomasa combustible (pulpa de café seca). El gasificador downdraft genera un gas pobre de mejor calidad que un gasificador updraft, por ello es el más adecuado para emplear en motores de combustión interna. Para la limpieza de las partículas presentes en el gas se plantea un ciclón. Al igual que en el concepto de solución N°01, es necesario enfriar el gas antes ingresarlo al motor de combustión interna, para ello se plantea el uso de un intercambiador de calor gas pobre-aire, el aire caliente que se obtendrá, se plantea usar para el secado del café pergamino, así como para otros usos.

#### 4.3.3 Concepto de solución N° 3.

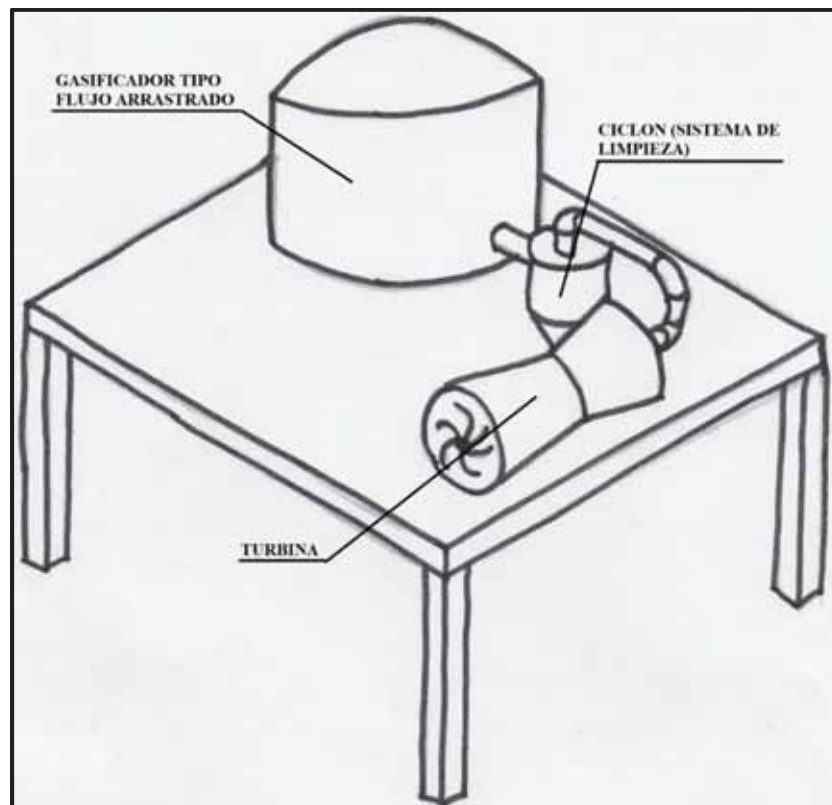


Figura 27. Concepto de solución N° 03. Fuente: elaboración propia.





Los gasificadores de flujo arrastrado funcionan a partir de dividir finamente el combustible ( $<0.1$  mm), reacciona con vapor y oxígeno en una zona de alta temperatura y presión (temperaturas de  $1500$  °C a  $1600$  °C y presiones de 25 bar a 40 bar) y gran turbulencia, donde se produce una intensa mezcla del combustible con los agentes gasificantes. Las altas temperaturas y presiones facilitan el alcance de muy altos desempeños. Se plantea usar un ciclón como filtro. En el sistema se plantea generar energía eléctrica a partir de una turbina a gas. El sistema planteado en el concepto de solución N° 03, es mucho más complejo.





## 4.4 Evaluación de proyectos

### 4.4.1 Valoración técnica.

**Tabla 17**

*Valoración técnica*

Valor Técnico (Xi)										
<b>Proyecto:</b> Diseño de un sistema de suministro de energía eléctrica y térmica de 25 KW de potencia a partir del uso de un gasificador de biomasa.										
<b>p:</b> puntaje de 0 a 4 (escala de valores según VDI 2225)										
0=No satisface, 1=Aceptable a las justas, 2=Suficiente, 3=Bien, 4=Muy bien (ideal)										
<b>g:</b> peso ponderado, que está en función de los criterios de evaluación										
N°	Variantes de Concepto/Proyectos	g	Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución ideal (S <sub>g</sub> )	
			S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>g</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>g</sub>
	Criterios de evaluación		p	Gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Calidad de gas obtenido	17%	1	0.17	3	0.51	4	0.68	4	0.68
2	Factibilidad térmica	17%	4	0.68	3	0.51	3	0.51	4	0.68
3	Buen uso de energía	13%	3	0.39	3	0.39	4	0.52	4	0.52
4	Fabricación sencilla	12%	4	0.48	4	0.48	2	0.24	4	0.48
5	Grado de contaminación	10%	3	0.30	3	0.30	3	0.30	4	0.40
6	Seguridad	10%	3	0.30	3	0.30	2	0.20	4	0.40
7	Sencillez de operación	8%	3	0.24	3	0.24	2	0.16	4	0.32
8	Facilidad para el transporte	7%	3	0.21	3	0.21	3	0.21	4	0.28
9	Ergonomía	6%	2	0.12	2	0.12	2	0.12	4	0.24
<b>Puntaje máximo <math>\sum g, \sum p, \sum pg</math></b>		100%	26	2.89	27	3.06	25	2.94	36	4
<b>Valor técnico Xi (sin ponderado)</b>				0.72		0.75		0.69		1
<b>Valor técnico Xi (con ponderado)</b>				0.72		0.77		0.74		1

Fuente: elaboración propia.





#### 4.4.2 Valoración económica.

**Tabla 18**

*Valoración económica*

Valor Económico (Yi)										
<b>Proyecto:</b> Diseño de un sistema de suministro de energía eléctrica y térmica de 25 KW de potencia a partir del uso de un gasificador de biomasa.										
<b>p:</b> puntaje de 0 a 4 (escala de valores según VDI 2225)										
0=No satisface, 1=Aceptable a las justas, 2=Suficiente, 3=Bien, 4=Muy bien (ideal)										
<b>g:</b> peso ponderado, que está en función de los criterios de evaluación										
Variantes de Concepto/Proyectos			Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución ideal (S <sub>g</sub> )	
Nº	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Fácil diseño	20%	4	0.80	4	0.80	3	0.60	4	0.80
2	Costo de material	20%	3	0.60	3	0.60	2	0.40	4	0.80
3	Costo de fabricación	16%	3	0.48	3	0.48	2	0.32	4	0.64
4	Demanda de mantenimiento	14%	2	0.28	2	0.28	4	0.56	4	0.56
5	Cantidad de componentes	11%	2	0.22	3	0.33	3	0.33	4	0.44
6	Costos de instalación	10%	3	0.30	3	0.30	2	0.20	4	0.40
7	Facilidad de montaje	9%	3	0.27	3	0.27	2	0.18	4	0.36
<b>Puntaje máximo <math>\sum g, \sum p, \sum pg</math></b>		100%	20	2.95	21	3.06	18	2.59	28	4
<b>Valor técnico Yi (sin ponderado)</b>			0.71		0.75		0.64		1	
<b>Valor técnico Yi (con ponderado)</b>			0.74		0.77		0.65		1	

Fuente: elaboración propia.





Las alternativas de solución se pueden calificar de la siguiente manera (VDI 2225):

**Tabla 19**

*Calificación de las alternativas de solución*

Valor Xi	Valor Yi	Calificación
0.8	0.8	Muy buena solución
0.7	0.7	Buena solución
0.6	0.6	Solución deficiente

Fuente: Elaboración propia

Para nuestro proyecto de tesis, después de realizar la evaluación técnica y económica se tiene:

**Tabla 20**

*Valoración técnica - económica de las alternativas de solución*

Solución	Evaluación	
	Técnica (Xi)	Económica (Yi)
1	0.72	0.74
2	0.77	0.77
3	0.74	0.65

Fuente: elaboración propia.

A los valores obtenidos se les representa por puntos, en coordenadas cartesianas y se les ubica en el gráfico de evaluación técnica-económica, como se muestra a continuación:



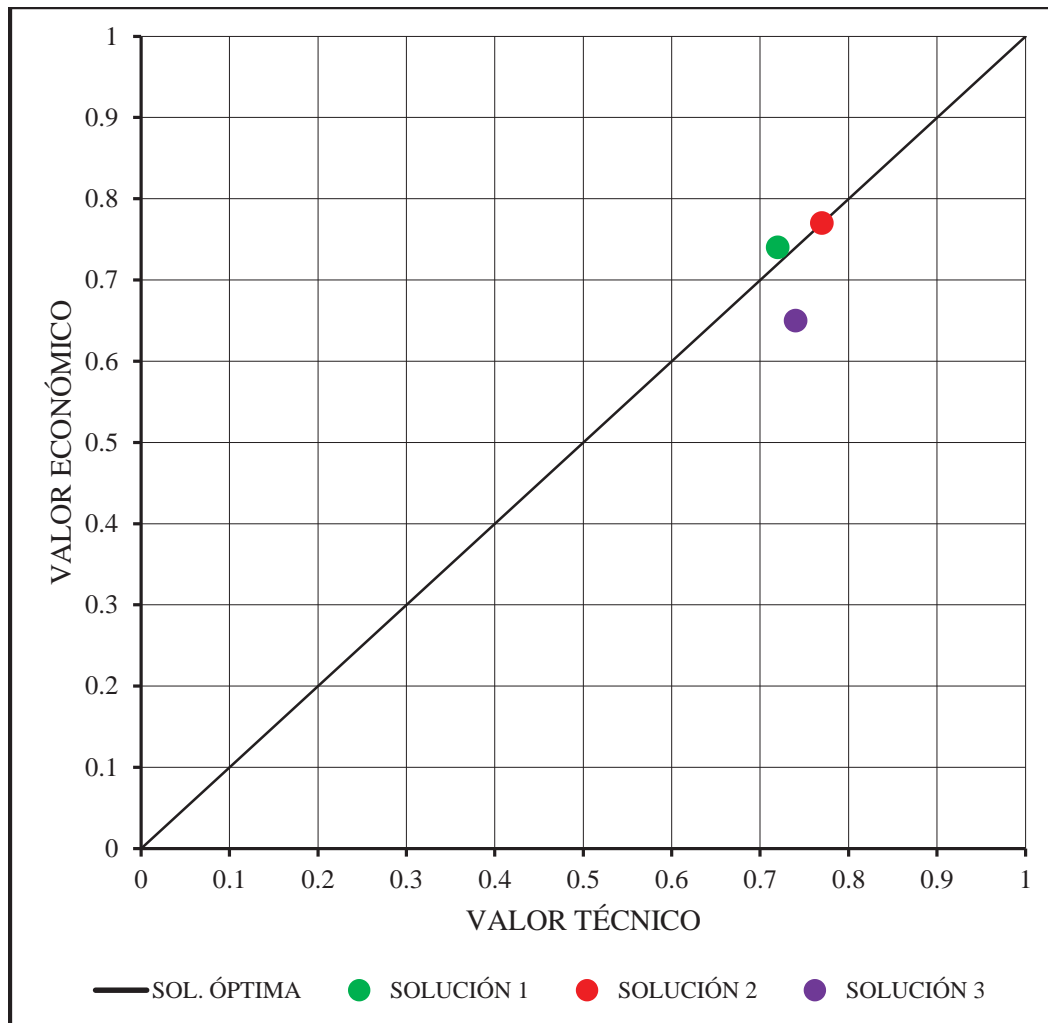


Figura 28. Gráfico de evaluación técnica - económica de las alternativas de solución. Fuente: elaboración propia.

Del gráfico se observa que: la solución 2, es la que cumple con los requisitos técnicos y económicos, por lo cual será el proyecto que desarrollaremos.





## CAPITULO V

### Diseño Mecánico

Para realizar el diseño del sistema de generación térmica y eléctrica, es necesario primeramente diseñar el gasificador (este transforma la energía de la biomasa en gas combustible a alta temperatura). En la estructura de funciones del capítulo IV se aprecia que la energía última obtenida es la energía eléctrica, mientras la energía térmica procede de un proceso intermediario (enfriamiento del gas pobre).

El procedimiento que se seguirá para el diseño del sistema es: primero, conocer la potencia eléctrica requerida, seleccionar el generador eléctrico adecuado y realizar el cálculo de consumo de gas pobre; segundo, dimensionar y diseñar el gasificador; tercero, diseñar el intercambiador de calor (gas pobre - aire) y calcular la energía térmica disponible.

#### 5.1 Selección y Cálculo del Sistema de Generación Eléctrica

##### 5.1.1 Evaluación de diagrama de carga típico eléctrico.

Es importante aclarar que en la investigación realizada se pretende diseñar una microcentral térmica para generación de energía eléctrica y térmica. Para lo cual, primeramente, se debe determinar la potencia eléctrica.

La producción de café en la región del Cusco, según el Anuario de Producción Agrícola 2018 de la MINAGRI es:





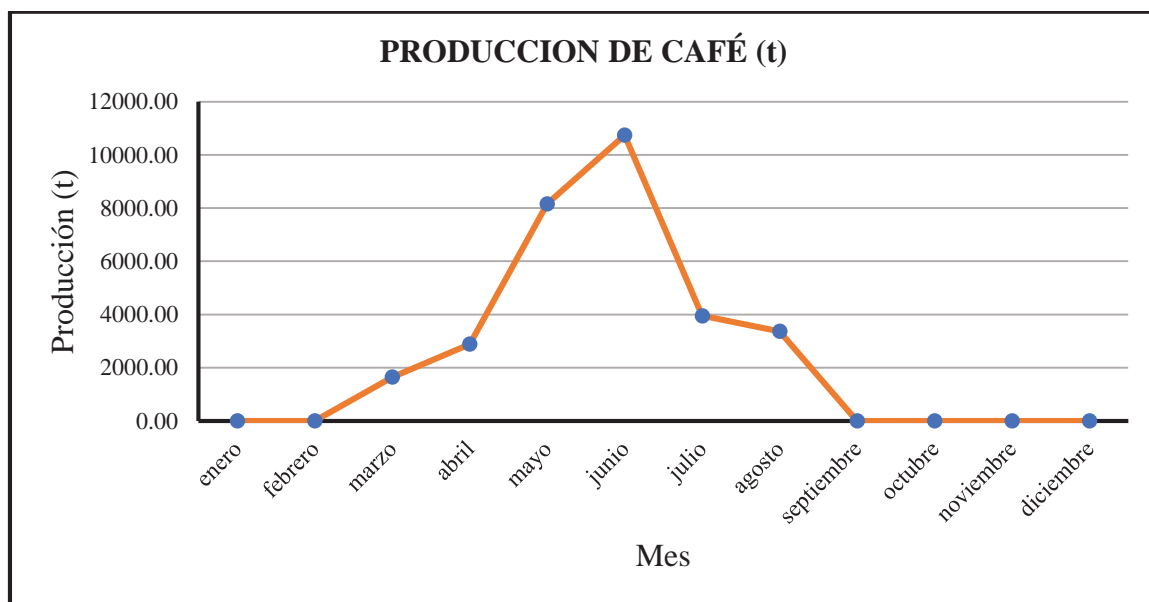


**Tabla 21**

*Producción mensual de café en el Cusco*

Año	Producción de café pergamino (toneladas) 67%	Porcentaje de cereza de café	Cereza de café disponible (toneladas)	Pulpa seca disponible (Kilogramos)
Enero	0	100%	0	0
Febrero	0	100%	0	0
Marzo	1,645.00	100%	2,455.22	2,455,223.88
Abril	2,888.00	100%	4,310.45	4,310,447.76
Mayo	8,160.00	100%	12,179.10	12,179,104.48
Junio	10,743.00	100%	16,034.33	16,034,328.36
Julio	3,950.00	100%	5,895.52	5,895,522.39
Agosto	3,368.00	100%	5,026.87	5,026,865.67
Septiembre	0	100%	0	0
Octubre	0	100%	0	0
Noviembre	0	100%	0	0
Diciembre	0	100%	0	0

Fuente: MINAGRI Nota: El porcentaje tomado para el café pergamino es la misma que se tomó en la tabla 9



**Figura 29. Producción mensual de café en el Cusco.** Fuente: MINAGRI





Esta microcentral térmica operará en el proceso de beneficiado húmedo del café, el mismo que realizan los mismos caficultores en sus campos de cosecha. Uno de los equipos básicos para este proceso es la despulpadora, este debe tener la capacidad de procesar de por lo menos la producción de un caficultor. No se tiene datos exactos sobre la producción individual de café, por lo cual se trabaja con cantidades aproximadas.

Según el catálogo de maquinaria para procesamiento de café, disponibles en el mercado peruano, la despulpadora más pequeña es la de la marca INDYA INDUSTRIAS de 1 hp de potencia. Esta máquina tiene una capacidad de producción de 800 Kg/h, mayor detalle en ANEXO 1. Si consideramos que el sistema operará durante 20 horas al día y 26 días al mes, entonces su productividad será:

$$P_{despul} = 800 \frac{Kg}{h} * 20 \frac{h}{día} * 26 \frac{día}{mes} = 416000 \frac{Kg}{mes}$$

Donde:

$P_{despul}$ : productividad mensual de la despulpadora (Kg/mes)

Con la productividad de la máquina de 416000 Kg/mes se cubra la necesidad de despulpe de más de un agricultor, puesto que se trata se pequeños agricultores.

La selección de los otros equipos será en función a la capacidad de la despulpadora, siendo el siguiente:





**Tabla 22**

*Equipos requeridos para el beneficio húmedo del café, pequeña productividad*

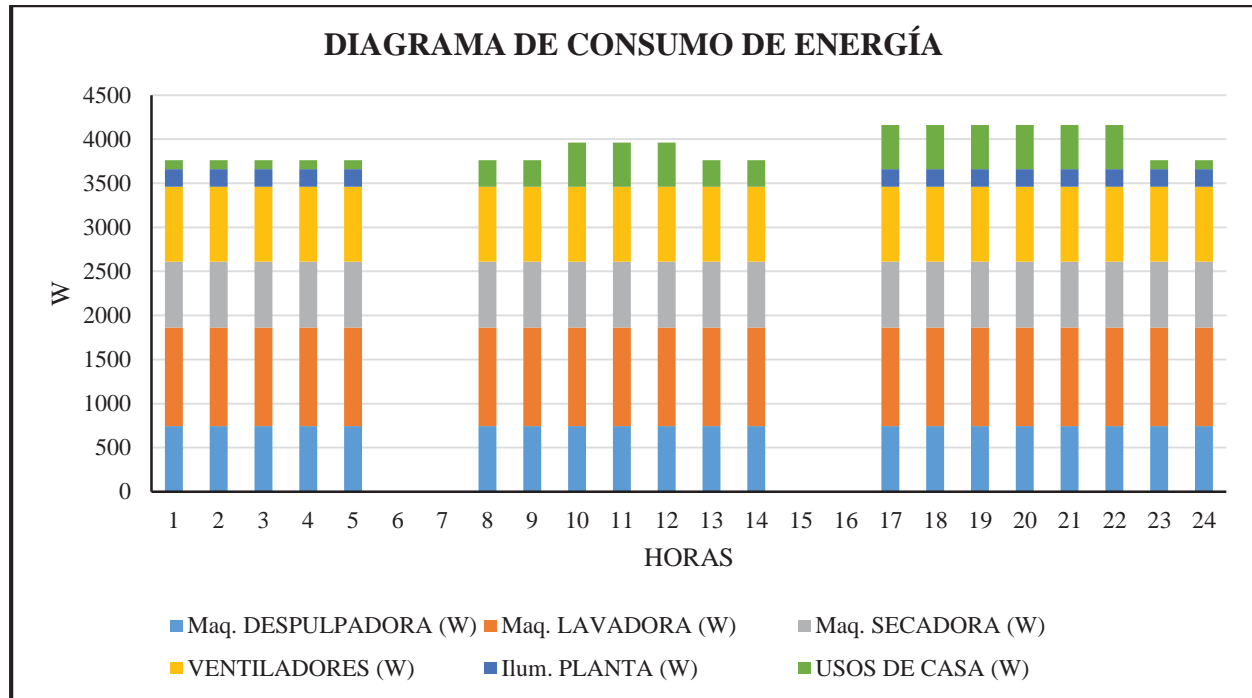
Uso	Cantidad	Consumo unitario (W)	Consumo total (W)	Fuente
Máquina despulpadora	01	745.70	745.70	(Cooperación alemana al desarrollo-GIZ, 2013)
Máquina lavadora	01	1118.55	1118.55	(Cooperación alemana al desarrollo-GIZ, 2013)
Máquina secadora	01	745.70	745.70	(Famacin del Perú E.I.R.L., s.f.)
Iluminación planta	10	20	200	(Promart, s.f.)
Ventiladores	1	850	850	
Usos de casa	1	540	540	
<b>TOTAL</b>			<b>4199.55</b>	

Fuente: elaboración propia. Nota: Las fichas de las maquinas se indican en el ANEXO 1.

En la tabla 22, se debe considerar la potencia necesaria para el accionamiento de los ventiladores (V1, V2 y V3) que es aproximadamente 850W y que forman parte del sistema. Además, se considera 540 W de potencia para para uso hogareño, esta potencia es suficiente para accionar: un TV (120W), un DVD (20W), iluminación (200W) y radio (50W) en paralelo, y también una licuadora (300W) en paralelo con alguno de los equipos antes mencionados, cabe aclarar que las cargas mencionadas son referenciales.

El diagrama de consumo de energía eléctrica por los equipos mencionados será:





**Figura 30. Diagrama de consumo de energía.** Fuente: elaboración propia.

De la figura 30, se aprecia que la mayor carga de consumo será entre las 17 y 22 horas, del APÉNDICE 5 determinamos que la carga correspondiente a estas horas es de 4159.95 W.

La potencia del generador eléctrico a seleccionar debe ser mayor a 4159.95W, además se debe considerar que: “Los motores de encendido por chispa, normalmente utilizados con gasolina o querosene, pueden funcionar con gas pobre únicamente” (FAO, 1993). Aunque, por el hecho del acondicionamiento de gasolina a gas pobre existe una disminución de potencia. Según la (FAO, 1993) “la disminución de la potencia máxima de los motores de gasolina, sin sobrealimentación, pueden limitarse a un 30% aproximadamente”. Sin embargo, esta disminución de potencia de 30% es para motores con rpm menor o igual a 2500. Considerando que los generadores eléctricos de pequeña potencia están provistos de motores de altos rpm, alrededor de 3600, ello hace que la pérdida de potencia sea mayor, por ello en el trabajo de investigación consideraremos una pérdida de potencia al 40%. De ello la potencia del generador eléctrico será:





$$Pot_{GE} = \frac{4159.95W}{0.6} = 6933.25W$$

Donde:

$Pot_{GE}$ : potencia del generador eléctrico

Entonces seleccionamos un generador eléctrico de las siguientes características:

**Tabla 23**

*Especificaciones técnicas del generador seleccionado*

<b>Especificaciones técnicas</b>	
Marca	Panther Kohler
Modelo	PK7000E
Cilindros	1
Tiempos	4
Combustible	Gasolina
Potencia eléctrica nominal de salida	6500W
Potencia eléctrica máxima de salida	7000W
Frecuencia de salida de corriente alterna	60Hz
Voltaje de salida de corriente alterna	220V
Voltaje de salida de corriente continua	12V
Sistema de arranque	Manual - Eléctrico

Fuente: ficha técnica mostrada en el ANEXO 1.

La potencia real que proveerá el generador al operar con gas pobre será:

**Tabla 24**

*Potencia real del generador eléctrico*

<b>Potencia</b>	<b>Con gasolina</b>	<b>Con gas pobre</b>
Máxima	7000W	4200W
Nominal	6500W	3900W

Fuente: elaboración propia.

Conocido el generador eléctrico, realizamos un diagrama general de carga típico eléctrico.



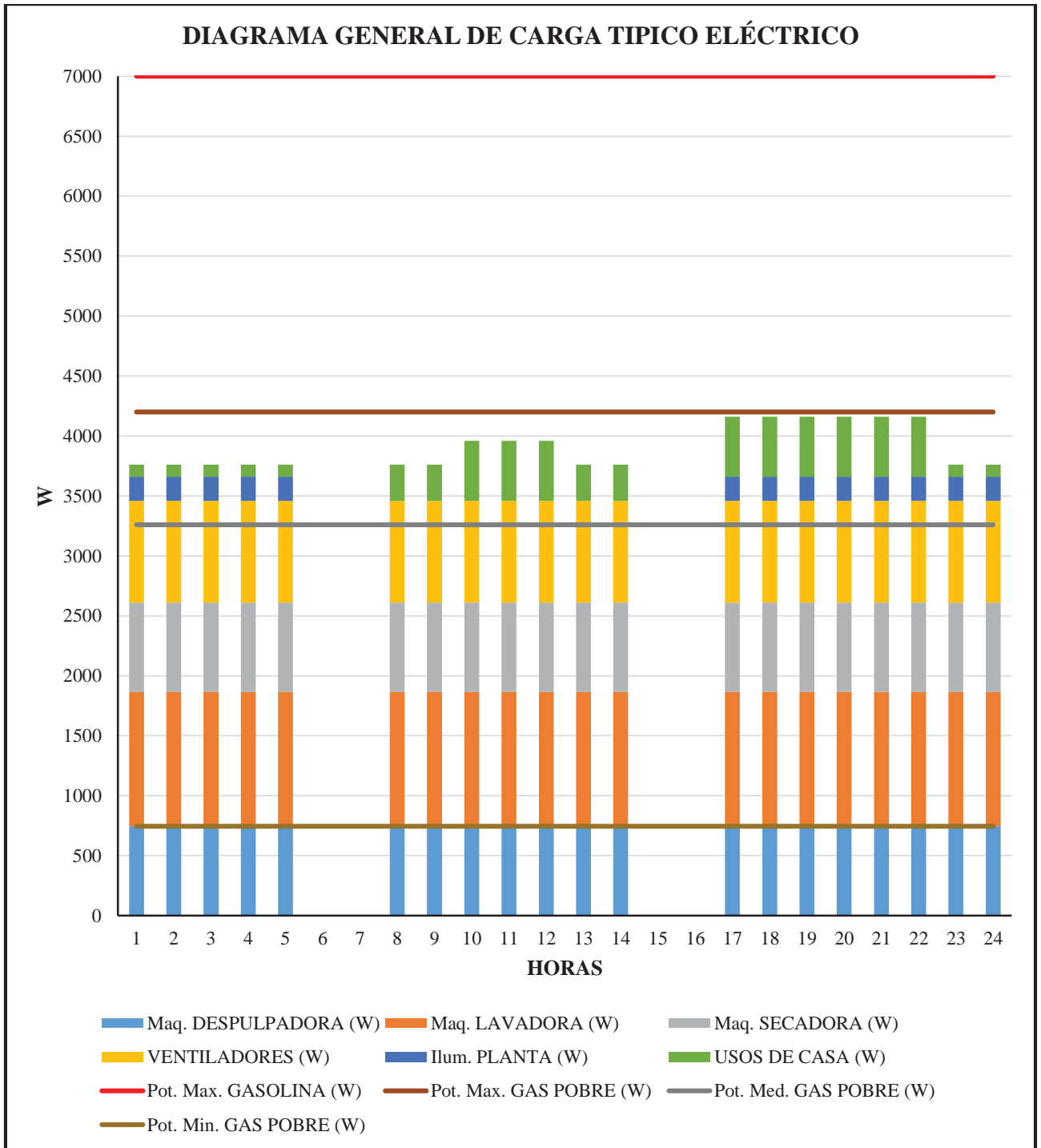


Figura 31. Diagrama general de carga típico eléctrico. Fuente: elaboración propia.

De la figura 31 se tiene el siguiente resumen:





**Tabla 25**

*Resumen de potencias para para la microcentral térmica*

<b>Potencia</b>	<b>Valor (W)</b>
Potencia máximo operando con gasolina	7000
Potencia máxima operando con gas pobre	4200
Potencia media operando con gas pobre	3258.29
Potencia máxima de consumo	4159.95

Fuente: elaboración propia

Potencia media:

$$Pot_M = \frac{78199 W * h}{24h} = 3258.29W$$

Donde:

$Pot_M$ : potencia media operando con gas pobre

Factor de carga respecto a la operación con gas pobre:

$$f_{cgp} = \frac{carga\ media}{carga\ máxima\ en\ un\ periodo\ de\ tiempo} = \frac{3258.29W}{4200W} * 100 = 77.58\%$$

Donde:

$f_{cgp}$ : factor de carga respecto a la operación con gas pobre

Factor de carga respecto a la operación con gasolina:

$$f_{cg} = \frac{carga\ media}{carga\ máxima\ en\ un\ periodo\ de\ tiempo} = \frac{3258.29W}{7000W} * 100 = 46.55\%$$

$f_{cg}$ : factor de carga respecto a la operación con gasolina

### **5.1.2 Cálculo del consumo de gas pobre.**

Suponiendo que la combustión del gas pobre en el generador será estequiométrica, se realiza el cálculo de la cantidad de aire necesario para la combustión.





En la combustión del gas pobre en el motor de combustión interna se usará como oxidante el aire, el cual dentro de su composición contiene oxígeno. La composición del aire seco es: 21 % de oxígeno ( $O_2$ ), 78% de nitrógeno ( $N_2$ ) y 1% de argón y otros gases; sin embargo, en los cálculos de combustión donde interviene el aire, es común considerar a todos los componentes diferentes del oxígeno junto con el nitrógeno, siendo la composición molar del aire de 21 % de oxígeno y 79 % de Nitrógeno, por consiguiente:

$$21 \text{ mol de } O_2 + 79 \text{ mol de } N_2 \text{ ---> } 100 \text{ mol de aire}$$

$$1 \text{ mol de } O_2 + 3.76 \text{ mol de } N_2 \text{ ---> } 4.76 \text{ mol de aire}$$

Al utilizar aire seco, se conoce exactamente que el nitrógeno diatómico a temperaturas normales es un elemento estable y no reacciona químicamente con otros elementos.

En la tabla 26 se realiza el cálculo de la cantidad de aire necesario para una combustión estequiométrica del gas pobre en unidades de  $m^3$  de aire/ $m^3$  de gas pobre.

**Tabla 26**

*Cálculo de la cantidad de aire necesario para una combustión estequiométrica del gas pobre*

Componente	Fórmula	Contenido en %	$m^3 O_2/m^3$ componente	$m^3 \text{aire}/m^3 O_2$	$m^3 \text{aire}/m^3$ componente
<b>Monóxido de carbono</b>	$CO$	19.14	0.50	4.76	0.456
<b>Hidrogeno</b>	$H_2$	22.77	0.50	4.76	0.542
<b>Metano</b>	$CH_4$	1.28	2.00	4.76	0.122
<b>Dióxido de carbono</b>	$CO_2$	11.49	0	4.76	0
<b>Nitrógeno</b>	$N_2$	45.33	0	4.76	0
<b><math>m^3 \text{aire}/m^3</math> de gas pobre</b>					<b>1.12</b>







La tabla 26, indica que para una combustión estequiométrica del gas pobre se requiere  $1.12 \text{ m}^3$  de aire por cada  $\text{m}^3$  de gas pobre. Si realizamos el análisis de que en un  $\text{m}^3$  de aire, el 21% es oxígeno y el 79% es nitrógeno, entonces en  $1.12 \text{ m}^3$  de aire habrá  $0.2352 \text{ m}^3$  de oxígeno y  $0.8848 \text{ m}^3$  de nitrógeno. Del análisis anterior concluimos que para la combustión estequiométrica del gas pobre estudiado será necesario ingresar  $0.2352 \text{ m}^3$  de oxígeno por cada  $\text{m}^3$  de gas de pobre.

El cálculo de consumo de gas pobre por parte del motor del generador eléctrico, lo realizaremos mediante dos métodos, los resultados deben ser similares por ambos métodos. Los datos a considerar para dichos cálculos son:

Cilindrada =  $429 \text{ cm}^3$

Régimen del motor = 3600 rpm

Numero de cilindros = monocilíndrico

#### **5.1.2.1 Primer método de cálculo de consumo de gas pobre.**

Primeramente, se calcula el volumen de barrido, que indica la velocidad a la que el motor admite la mezcla (gas de pobre + aire), la cual es igual a:

$$V_B = \text{aceptacion maxima (mezcla)} = 0.5 * \text{rpm} * \text{cilindrada}$$

Donde:

$V_B$ : volumen de barrido

rpm: régimen del motor

$$V_B = 0.5 * \left( \frac{3600}{60 \text{ s}} \right) * (429 * 10^{-6} \text{ m}^3)$$

$$V_B = 0.01287 \text{ m}^3/\text{s}$$

Calculamos el volumen de gas pobre contenido en la mezcla, aplicando el criterio de la máxima aceptación (gas pobre + aire).





*Aceptación máxima (syngas) = %syngas en la mezcla \* aceptación máxima (mezcla)*

Para resolver la ecuación, realizamos el análisis correspondiente a la relación de aire/combustible que se calculó anteriormente. Según los cálculos realizados, para una combustión estequiométrica del gas de pobre, se requiere  $1.12 \text{ m}^3$  de aire por cada  $1 \text{ m}^3$  de gas pobre; es decir, la mezcla que debe ingresar al motor para una combustión estequiométrica debe ser  $1.12 \text{ m}^3$  de aire +  $1 \text{ m}^3$  de gas pobre, en estas condiciones la combustión será estequiométrica. Del anterior análisis concluimos que la mezcla aire/combustible para una combustión estequiométrica debe ser aproximadamente: 52.83% de aire + 47.17% de gas pobre.

$$r_{a/c} = \frac{52.83\% \text{ aire}}{47.17\% \text{ gas de síntesis}} = 1.12$$

$$\text{aceptación máxima (syngas)} = 0.4717 * 0.01287 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{aceptación máxima (syngas)} = 0.006070779 \text{ m}^3/\text{s}$$

A este resultado se le debe aplicar el coeficiente correspondiente al rendimiento volumétrico. Este factor oscila entre 0.75 - 0.85, y representa la relación entre la masa real de aire aspirada en cada ciclo y la que se podría llegar a aspirar en condiciones de presión y temperatura exteriores (Jóvaj, 1982). Para nuestro cálculo, se utilizará un rendimiento volumétrico referencial del 75%.

*Aceptación real (syngas) = Aceptación máxima (syngas) \* rendimiento volumétrico*

$$\text{Aceptación real (gas pobre)} = 0.006070779 * 0.75$$

$$\text{Aceptación real (gas pobre)} = 0.00455308425 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{V}_{gg} = 0.00455308425 \text{ m}^3/\text{s}$$

Donde  $\dot{V}_{gg}$  es el caudal o flujo volumétrico de gas pobre al generador eléctrico.





### 5.1.2.2 Segundo método de cálculo de consumo de gas pobre.

“El caudal de gas al motor ( $\dot{V}_{gg}$ ), en  $m^3/s$  (a condiciones estándar), está relacionado con el caudal de la mezcla aire combustible ( $\dot{V}_{mz}$ ) mediante la siguiente expresión” (Lira Cacho & Condori Antezana, 2005, pág. 96):

$$\dot{V}_{gg} = \frac{\dot{V}_{mz}}{1 + \lambda L_0}$$

Donde:

$\lambda$ : coeficiente de exceso de aire

$L_0$ : relación aire-combustible ( $m^3/m^3$ )

El caudal de la mezcla ( $\dot{V}_{mz}$ ) es directamente proporcional a la cilindrada del motor, a la máxima velocidad del motor, y la eficiencia volumétrica del motor, la cual está directamente relacionada con la resistencia hidráulica del ducto de admisión. En los motores de carburador el rendimiento volumétrico varía entre 0.75 - 0.85 (Jóvaj, 1982).

$$\dot{V}_{mz} = \frac{V_H}{1000} * \frac{n}{120} * \eta_v$$

Donde:

$V_H$ : cilindrada del motor (litros)

$n$ : máxima velocidad del motor (rpm)

$\eta_v$ : eficiencia volumétrica del motor

Realizando el cálculo obtenemos:

$$V_H = 429 \text{ cm}^3 = 0.429 \text{ l}$$

$$n = 3600 \text{ rpm}$$

$$\eta_v = 0.75$$





$$\dot{V}_{mz} = \frac{0.429}{1000} * \frac{3600}{120} * 0.75$$

$$\dot{V}_{mz} = 0.0096525 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L_0 = 1.12 \text{ m}^3 \text{ aire}/\text{m}^3 \text{ gas}$$

$$\dot{V}_g = \frac{0.0096525}{1 + 1.12}$$

$$\dot{V}_{gg} = 0.004553066038 \text{ m}^3/\text{s}$$

## 5.2 Diseño Mecánico del Gasificador

### 5.2.1 Parámetros de diseño del gasificador.

#### 5.2.1.1 Potencia del gasificador.

El flujo volumétrico de gas producido por el gasificador no se conoce, sin embargo, si sabemos el flujo volumétrico de gas pobre que consumirá el generador eléctrico. Analizando, deducimos que el gasificador debe tener la capacidad de abastecer de combustible al generador eléctrico, por ello el gasificador debe tener la capacidad de producir como mínimo la cantidad de gas pobre consumido por el generador eléctrico ( $\dot{V}_g \cong \dot{V}_{gg} = 0.00455308425 \text{ Nm}^3/\text{s}$ ).

En el capítulo III se calculó el poder calorífico estimado del gas pobre obtenido de la pulpa de café en estado normal ( $5332.07 \text{ KJ}/\text{Nm}^3$ ).

La siguiente ecuación fue adaptada de (Basu, 2010):

$$Q_g = \dot{V}_g * PC_g$$

Donde:

$Q_g$ : potencia del gasificador (KW)

$\dot{V}_g$ : flujo volumétrico de gas producido por el gasificador ( $\text{Nm}^3/\text{s}$ )

$PC_g$ : poder calorífico del gas pobre ( $\text{KJ}/\text{Nm}^3$ )





$$Q_g = 0.00455308425 * 5332.07 = 24.277 \text{ KW}$$

La potencia mínima del gasificador debe ser de 24.277 KW para abastecer adecuadamente de combustible al generador eléctrico seleccionado. En el trabajo de investigación se plantea el diseño de un gasificador de 25 KW de potencia, la cual abastecerá de gas pobre al motor del generador eléctrico seleccionado sin inconvenientes.

### **5.2.1.2 Flujo volumétrico de gas producido.**

Para calcular el flujo volumétrico de gas producido por el gasificador se requiere conocer la potencia del gasificador (25KW) y el poder calorífico del gas (5332.07 KJ/Nm<sup>3</sup>). Para realizar el cálculo emplearemos la fórmula anteriormente empleada que fue adaptada de (Basu, 2010).

$$\dot{V}_g = \frac{Q_g}{PC_g}$$

Donde:

$\dot{V}_g$ : flujo volumétrico de gas producido por el gasificador (Nm<sup>3</sup>/s)

$Q_g$ : potencia del gasificador (KW)

$PC_g$ : poder calorífico del gas pobre (KJ/Nm<sup>3</sup>)

$$\dot{V}_g = \frac{25}{5332.07} = 0.0046886106 \text{ Nm}^3/\text{s} = 16.879 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

### **5.2.1.3 Flujo másico de combustible.**

Para efectos de cálculo se considera al gas pobre como un gas ideal. Al comportarse el gas pobre como un gas ideal, es posible aplicar la ecuación general de los gases ideales. Sin embargo, es más conveniente expresar para efectos de diseño a la fórmula de los gases ideales como un flujo volumétrico.

$$PV = nRT \quad \text{ó} \quad P\dot{V}_g = \left(\sum \frac{\dot{m}_x}{M_x}\right)RT$$





En el APÉNDICE 4 se calculó el número de moles en función del flujo másico de la pulpa de café seca en unidades de (Kmol/h). Para aplicar la ecuación anterior consideraremos el gas pobre en condiciones normales, es decir:  $T=25^{\circ}\text{C}$  (298.15 K),  $P=101.325$  Kpa y  $R=8.314 \frac{\text{Kpa}\cdot\text{m}^3}{\text{Kmol}\cdot\text{K}}$

$$\dot{V}_g = \frac{0.1341\dot{m}_{pcs} \left(\frac{\text{Kmol}}{\text{h}}\right) * 8.314 \left(\frac{\text{Kpa} * \text{m}^3}{\text{Kmol} * \text{K}}\right) * 298.15(\text{K})}{101.325(\text{Kpa})} = 3.2799\dot{m}_{pcs}(\text{Nm}^3/\text{h})$$

Igualamos este resultado con el obtenido en función a la potencia del gasificador y el poder calorífico del gas, ambos resultados están calculadas en condiciones normales (N).

$$16.878998\text{Nm}^3/\text{h} = 3.2799\dot{m}_{pcs}(\text{Nm}^3/\text{h})$$

De la igualdad anterior se calcula el flujo másico del combustible seco, en unidades de Kg/h.

$$\dot{m}_{pcs} = 5.14618 \text{ Kg/h}$$

Del resultado anterior un pequeño porcentaje pasará a formar cenizas (6.58%), es decir solo el 93.42% pulpa seca de café será útil, por lo cual (Mairena Calvo, 2010):

$$\dot{m}_{pcs} = \frac{5.14618 \text{ Kg/h}}{0.9342} = 5.50865 \text{ Kg/h}$$

Además la masa utilizada no está seca, sino que tiene un 15% de humedad, por lo cual el flujo de pulpa húmeda que debe ingresar al gasificador será (Mairena Calvo, 2010):

$$\dot{m}_{pch} = 1.15(5.50865 \text{ Kg/h}) = 6.33495 \text{ Kg/h}$$

#### 5.2.1.4 Eficiencia mecánica de la gasificación.

Se determina mediante la siguiente expresión, adaptada de (FAO, 1993):

$$\eta_m = \frac{PC_g * \dot{V}_g}{PCI_{pc} * \dot{m}_{pch}} = \frac{Q_g}{PCI_{pc} * \dot{m}_{pch}}$$

Donde:





$\eta_m$ : eficiencia mecánica de la gasificación

$Q_g$ : potencia del gasificador (KW)

$PCI_{pc}$ : poder calorífico inferior del combustible del gasificador (KJ/Kg)

$PC_g$ : poder calorífico del gas pobre (KJ/m<sup>3</sup>)

$\dot{m}_{pch}$ : consumo de combustible sólido del gasificador (Kg/s)

Se considera el flujo másico de pulpa de café húmedo ( $\dot{m}_{pch}$ ), porque es en esta condición que el combustible ingresa al gasificador.

$$\eta_m = \frac{25}{20718.129 * 0.00175971} = 0.68572$$

La eficiencia mecánica de la gasificación puede variar entre 60% y 70% (FAO, 1993). El resultado anterior se encuentra en el rango.

#### ***5.2.1.5 Aire necesario para la gasificación de la pulpa de café.***

En el APÉNDICE 4 se determinó el flujo másico de aire necesario para la gasificación en función del flujo másico de la pulpa de café seco.

$$\dot{m}_{aire} = 2.218\dot{m}_{pcs} = 2.218 * 5.14618 = 11.41628 \text{ Kg/h}$$

El cálculo anterior es el correspondiente al 25% del flujo de aire requerido de una combustión estequiométrica de la pulpa de café seca.

#### ***5.2.1.6 Flujo volumétrico de aire necesario para la gasificación.***

Considerando que el aire es un gas ideal, empleamos la ecuación general de los gases ideales para calcular el flujo volumétrico del aire que debe ingresar al gasificador (Mairena Calvo, 2010):

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{m}_{aire} * R * T}{M_{aire} * P}$$





El cálculo se realiza en condiciones normales, es decir:  $T=25^{\circ}\text{C}$  (298.15 K),  $P=101.325$  Kpa y

$$R=8.314 \frac{\text{Kpa} \cdot \text{m}^3}{\text{Kmol} \cdot ^{\circ}\text{K}}$$

$$\dot{V}_a = \frac{11.41628 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * 8.314 \frac{\text{Kpa} * \text{m}^3}{\text{Kmol} * \text{K}} * 298.15 \text{K}}{28.84 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}} * 101.325 \text{Kpa}} = 9.68406 \text{Nm}^3/\text{h}$$

Se obtiene un resultado similar si se divide el flujo másico del aire que ingresa al gasificador entre la densidad del aire en condiciones normales ( $\rho_{\text{aire}} = 1.205 \text{Kg}/\text{m}^3$ ).

### 5.2.1.7 Tiempo de consumo de combustible.

Se calcula mediante la siguiente ecuación (Belonio, 2005):

$$T = \frac{\rho_{pc} * V_g}{\dot{m}_{pch}}$$

Donde:

$T$ : tiempo requerido para consumo de pulpa de café (h).

$\rho_{pc}$ : densidad de la pulpa de café ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ).

$V_g$ : volumen de almacenamiento de combustible (pulpa de café) del gasificador ( $\text{m}^3$ ).

$\dot{m}_{pch}$ : flujo másico de combustible húmedo ( $\text{Kg}/\text{h}$ ).

La densidad mencionada en la fórmula, se refiere a la densidad aparente de la pulpa de café.

Además, se considera el flujo másico de la pulpa de café húmeda, porque es en estas condiciones que ingresará el combustible al gasificador.

Para la presente tesis se pretende que la autonomía de operación del equipo sea de 2 horas, por lo cual el volumen de almacenamiento del gasificador debe ser:

$$V_g = \frac{2 \text{h} * 6.33495 \text{Kg}/\text{h}}{124.4 \text{Kg}/\text{m}^3} = 0.1018481 \text{m}^3$$







### 5.2.2 Dimensionamiento del gasificador.

El dimensionado del gasificador se realiza de adentro hacia fuera, es decir, el primer componente a dimensionar es el reactor, específicamente la garganta, a partir del cual se pueden ajustar los otros elementos propios del gasificador.

Para el diseño de un gasificador tipo downdraft es importante definir el término “velocidad específica de gasificación”, también llamada “hearth load”. La velocidad específica de gasificación se define como el flujo volumétrico de gas obtenido con respecto a la unidad de área de la sección transversal de la garganta, que es el área transversal más pequeña del reactor. Este parámetro se expresa en  $Nm^3/hcm^2$ , donde la N indica que el volumen de gas se calcula en condiciones normales (Martín Perez, 2014).

La velocidad específica de gasificación para la pulpa de café no es conocida, debido a que no se realizaron muchas pruebas con esta biomasa, y si se realizaron no se registraron datos específicos. Sin embargo, existen mayores estudios y pruebas sobre la gasificación de la madera.

La biomasa en general, sin importar cuál sea su procedencia, tienen propiedades energéticas y químicas similares, por ello, para este trabajo de investigación aplicaremos la experiencia en el diseño y dimensionamiento de gasificadores de madera, siempre justificando cada decisión que se tome.

Las temperaturas alcanzadas al interior de un gasificador se muestran en la figura 32, mientras el diseño general del gasificador para nuestro trabajo de tesis es la que se muestra en la figura 33.



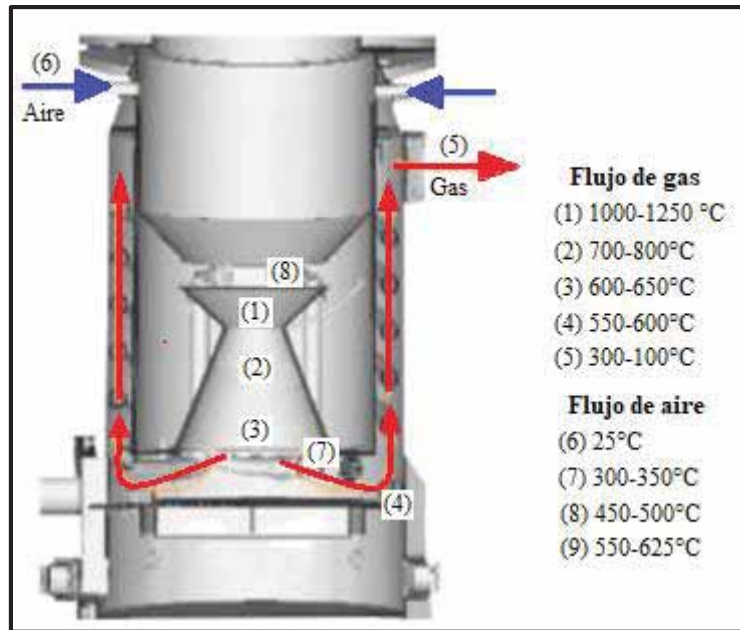


Figura 32. Temperaturas alcanzadas en diferentes zonas del gasificador. Fuente: (Martín Perez, 2014, pág. 28)

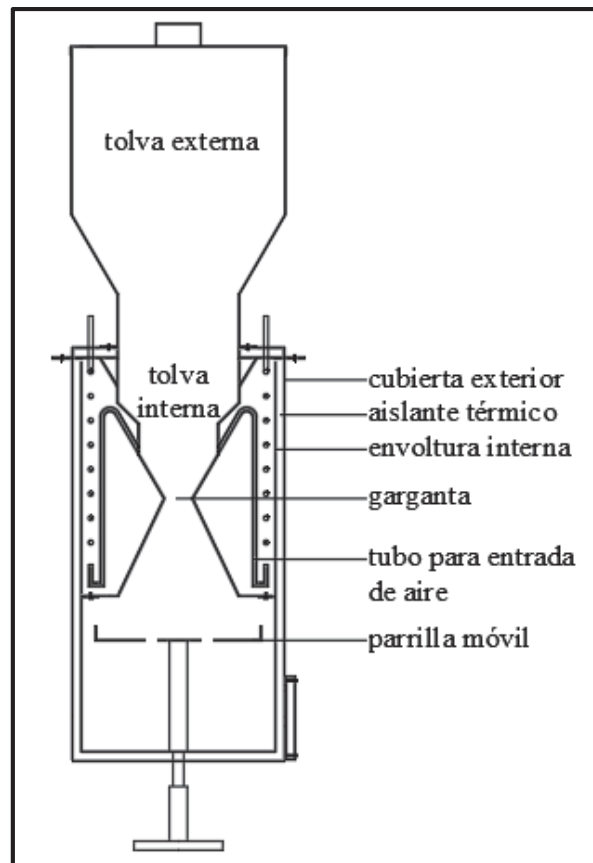


Figura 33. Diseño general del gasificador. Fuente: Elaboración propia



### 5.2.2.1 Dimensionamiento y diseño de la garganta.

Es cierto que nuestro sistema es de tipo estacionario, sin embargo, se opta diseñar una doble garganta (como la indicada en la figura 6) con el objetivo de tener flexibilidad y así permitir que el motor trabaje cómodamente a diferentes revoluciones.

Conocido el tipo de garganta a diseñar, debemos proceder a dimensionar el diámetro de la garganta. Para dimensionar el diámetro de la garganta realizaremos dos análisis:

#### a) Primer análisis:

La relación entre el flujo volumétrico de gas, el área de la sección transversal de la garganta y la velocidad específica de gasificación (hearth load), está dada por la siguiente expresión (Martín Perez, 2014):

$$A_g = \frac{\dot{V}_g}{B_h}$$

Donde:

$A_g$ : área de la garganta ( $cm^2$ ).

$\dot{V}_g$ : flujo volumétrico de gas producido por el gasificador ( $Nm^3/h$ ).

$B_h$ : velocidad específica de gasificación ( $Nm^3/cm^2 * h$ ).

Según Gengas 1950 como se citó en (Reed & Das, 1988): para un área de la garganta correspondiente al diámetro de 0.15 m, se alcanzó una velocidad específica de gasificación máxima de  $0.9Nm^3/cm^2 * h$ , esto para un gasificador downdraft o Imbert.





Gasificador	Tipo <sup>b</sup>	D <sup>c</sup>		V <sub>s</sub> <sup>d</sup>		B <sub>h</sub> <sup>e</sup>		Referencia
		Diámetro		Vel. Superficial		Carga de Hogar		
		m	ft	m/s	ft/s	m <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> -h	MBtu/ft <sup>2</sup> -h	
Imbert <sup>c</sup>	I-A	0.15	0.5	2.50	8.2	0.90	4.76	(Gengas 1950)
	I-A	0.30	1.0	0.63	2.1	0.23	1.19	(Gengas 1950)
Biomass Corp. <sup>c</sup>	I-A	0.30	1.0	0.95	3.1	0.34	1.81	(Graham 1983)
	I-A	0.61	2.0	0.24	0.8	0.09	0.45	(Graham 1983)
SERI Air/ox	S-A	0.15	0.5	0.28	0.9	0.10	0.53	(Reed 1982)
	S-O	0.15	0.5	0.24	0.8	0.09	0.90	(Reed 1982)
Buck Rogers	S-A	0.61	2.0	0.13	0.4	0.05	0.25	(Walawender 1985)
	S-A	0.61	2.0	0.23	0.7	0.08	0.43	(Chern 1985)
Syn-Gas, Inc.	S-A	0.76	2.5	1.71	5.6	0.62	3.26	(Graboski 1985)
	S-O	0.76	2.5	1.07	3.5	0.39	4.07	(Graboski 1985)

<sup>a</sup> Los datos de esta tabla se basan en informes sobre gasificadores bien probados, en lugar de las afirmaciones de los fabricantes, etc.  
<sup>b</sup> I es el gasificador imbert (boquilla y garganta constreñida) de la Segunda Guerra Mundial. S es el gasificador de tiro descendente estratificado. A significa operación en aire, O en oxígeno.  
<sup>c</sup> Para los gasificadores tipo Ibert (I), el diámetro se mide en la garganta (valor superior) o en el nivel de entrada de aire (valor inferior). Para gasificadores de corrientes descendentes estratificadas (S), el diámetro es constante en todos los niveles.  
<sup>d</sup> La velocidad superficial se calcula como el volumen de gas (tomado a temperatura ambiente) que pasa por el área sin tener en cuenta la presencia de combustible. Tiene unidades de vol / área-time = longitud / tiempo = velocidad  
<sup>e</sup> La carga del hogar, B<sub>h</sub>, es una medida práctica del rendimiento del volumen de gas del gasificador (unidades SI) o del rendimiento energético (unidades inglesas).

Figura 34. Diámetro, velocidad superficial máxima y carga de hogar de varios gasificadores. Fuente: (Reed & Das, 1988, pág. 36)

Si para una sección transversal de garganta de  $176.7146 \text{ cm}^2$  el flujo volumétrico de gas producido es  $159.0431 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , entonces para un flujo volumétrico de  $\dot{V}_g = 16.878998 \text{ Nm}^3/\text{h}$  el área de la sección transversal de la garganta será:

$$A_g = \frac{\dot{V}_g}{B_h} = \frac{16.878998 \text{ Nm}^3/\text{h}}{0.9 \text{ Nm}^3/\text{cm}^2 * \text{h}} = 18.75444222 \text{ cm}^2$$

Por tanto, el diámetro de la garganta sería:

$$D_g = \sqrt{\frac{4 * A_g}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 18.75444222 \text{ cm}^2}{\pi}} = 4.8866 \text{ cm} = 48.866 \text{ mm}$$

**b) Segundo análisis:**

De los cálculos anteriormente realizados se obtuvo que el flujo volumétrico de gas producido es  $16.878998 \text{ Nm}^3/\text{h}$  y el flujo másico del combustible (pulpa de café húmedo) es  $6.33495 \text{ Kg}/\text{h}$ . Con estos datos se puede ingresar en la tabla que muestra en la figura 35.





$d_r/d_h$	$d_h$ mm	$d_r$ mm	$d_r$ mm	$h$ mm	$H$ mm	$R$ mm	$A$ No.	$d_m$ mm	$A_m \times 100$ $A_h$	$d_r$ $d_h$	$h$ $d_h$	Rango de salida de gas		Consumo máximo de madera kg/h	Velocidad explosión de aire $V_m$ m/s
												max.	min.		
												$Nm^3/h$	$Nm^3/h$		
268/60	60	268	150	80	256	100	5	7.5	7.8	4.5	1.33	30	4	14	22.4
268/80	80	268	176	95	256	100	5	9.0	6.4	3.3	1.19	44	5	21	23.0
268/100	100	268	202	100	256	100	5	10.5	5.5	2.7	1.00	63	8	30	24.2
268/120	120	268	216	110	256	100	5	12.0	5.0	2.2	0.92	90	12	42	26.0
300/100	100	300	208	100	275	115	5	10.5	5.5	3.0	1.00	77	10	36	29.4
300/115	115	300	228	105	275	115	5	11.5	5.0	2.6	0.92	95	12	45	30.3
300/130	130	300	248	110	275	115	5	12.5	4.6	2.3	0.85	115	15	55	31.5
300/150	150	300	258	120	275	115	5	14.0	4.4	2.0	0.80	140	18	67	30.0
400/130	130	400	258	110	370	155	7	10.5	4.6	3.1	0.85	120	17	57	32.6
400/150	135	400	258	120	370	155	7	12.0	4.5	2.7	0.80	150	21	71	32.6
400/175	175	400	308	130	370	155	7	13.5	4.2	2.3	0.74	190	26	90	31.4
400/200	200	400	318	145	370	153	7	16.0	3.9	2.0	0.73	230	33	110	31.2

Las variables no dadas en la figura se definen de la siguiente manera:  
 $d_m$  = Diámetro interno de la tobera.  
 $A_m$  = Suma de áreas de sección transversal de las aberturas de chorro de aire en las toberas.  
 $A_h$  = Área transversal de la garganta.  
 $A$  = Número de toberas.  
 Fuente: Kaupp 1984a, Table 5; Fig. 75.

Figura 35. Flujo volumétrico de gas, consumo máximo de combustible y velocidad de aire. Fuente: (Reed & Das, 1988, pág. 37)

La tabla mostrada en la figura 35, indica que para un diámetro de garganta de 60 mm, el flujo volumétrico de gas es entre  $4 Nm^3/h$  y  $30 Nm^3/h$ , con un consumo máximo de combustible de  $14 Kg/h$ .

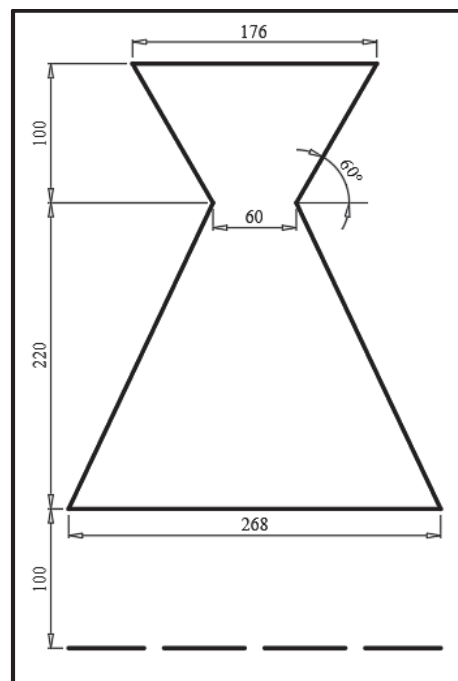
Se debe tener especial cuidado a la hora de escoger el diámetro de la garganta, ya que una garganta demasiado grande repercutiría en la generación de un gas que no ha pasado por los procesos completos de oxidación y reducción y que por lo tanto podría contener partículas y alquitranes excesivos, por otro lado una garganta demasiado pequeño limitaría el caudal de gas demandado por el motor (generador eléctrico), haciendo que no funcione de forma adecuada (Martín Perez, 2014).



Los resultados de diámetro de garganta del primer (48.866mm) y segundo análisis (60mm), son relativamente cercanas. Para nuestro trabajo de investigación elegimos un diámetro de 60 mm, la cual nos da un amplio rango de flujo volumétrico de gas producido por el gasificador.

Conocido el diámetro de la garganta, existen diversas formas de dimensionar el resto de las partes del gasificador, en función del diámetro menor de la garganta. Para nuestro proyecto de tesis tendremos en consideración las conclusiones de la FAO sobre el dimensionamiento:

- La inclinación de la garganta debe estar entre los  $45^\circ$  y  $60^\circ$ .
- El diámetro del hogar a la altura de la entrada del aire, debe ser como máximo 20 cm mayor que el diámetro de la garganta, en el caso del modelo de doble garganta.
- La altura de la zona de reducción debe ser superior a 20 cm.
- La altura del plano de las toberas de entrada de aire debe ser de 10 cm sobre el estrechamiento máximo.



**Figura 36. Dimensionamiento de la garganta.** Nota: las unidades están en milímetros



### 5.2.2.2 Diámetro de la entrada de aire.

Según la tabla de la figura 35, el número de tuberías de entrada de aire para un gasificador de 60mm de diámetro es 5, además la velocidad de entrada de aire debe ser de 22.4 m/s. El diámetro de cada una de las tuberías para abastecer los  $9.68406Nm^3/h$  de aire debe ser:

$$d_{iea} = \sqrt{\frac{4 * \dot{V}_a}{5 * \pi * v_e}} = \sqrt{\frac{4 * \frac{9.68406}{3600}}{5 * \pi * 22.4}} = 0.00553m = 5.53mm$$

Donde:

$d_{iea}$ : diámetro interior para entrada de aire (m)

$\dot{V}_a$ : flujo volumétrico del aire ( $m^3/s$ )

$v_e$ : velocidad de entrada del aire (m/s)

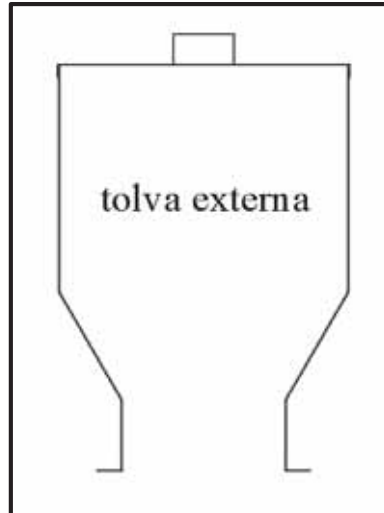
La ASME B36.19 es una normativa de estandarización de las dimensiones de las tuberías (con costura y sin costura) de acero inoxidable. Basándonos en esta normativa elegimos el tubo de 1/8 in (NPS) o 6 (DN) de SCH 80S, esta tubería tiene un diámetro exterior de 10.3mm y un espesor de 2.41mm, por lo cual el diámetro interior efectivo es de 5.48mm. La velocidad real del aire a la entrada del gasificador será:

$$v_e = \frac{4 * 2.69001 * 10^{-3}}{5 * \pi * (5.48 * 10^{-3})^2} = 22.81m/s$$

### 5.2.2.3 Tolva externa.

La tolva externa es el componente que sirve para el almacenamiento del combustible (biomasa), su configuración se muestra en la figura 37. La tolva externa posee una tapa superior, la cual debe poseer agujeros para evitar el incremento de la presión en el interior del gasificador. El material de la que debe ser fabricada y las dimensiones exactas se detallan en el plano PFG-001.

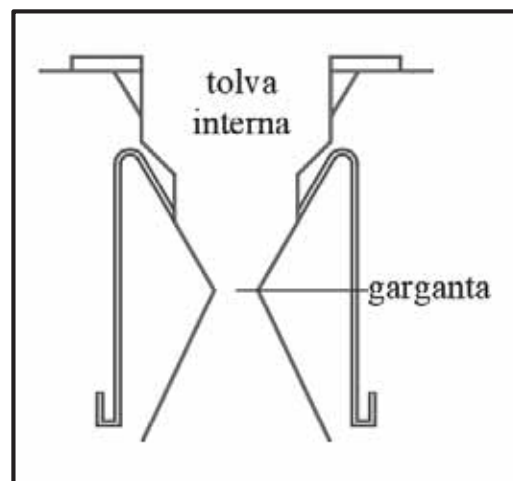




**Figura 37.** Configuración del componente tolva externa del gasificador. Fuente: elaboración propia

#### **5.2.2.4 Tolva interna-reactor.**

La tolva interna y la garganta (reactor) forman una sola pieza, a esta pieza se unirán las tuberías para la entrada de aire. La tolva interna es el depósito del combustible inmediatamente antes de reaccionar y sufrir transformación, mientras la garganta es el punto donde ocurren las diferentes reacciones químicas. La configuración de esta pieza se muestra en la figura 38, el dimensionamiento exacto y el material de la que será fabricada se detallan en los planos PFG-008 y PFG-009.



**Figura 38.** Configuración del componente tolva interna-reactor del gasificador. Fuente: elaboración propia





### 5.2.2.5 Cuerpo cilíndrico.

El cuerpo cilíndrico del gasificador comprende tres elementos: envoltura interna, aislante térmico y cubierta exterior. La función principal del cuerpo cilíndrico es evitar que el calor se disipe al medio exterior, para garantizar que las reacciones que ocurren al interior del gasificador sean óptimas. La configuración del cuerpo cilíndrico se muestra en la figura 39, el dimensionamiento exacto y el material de la que será fabricada este componente se detalla en el plano PFG-002.

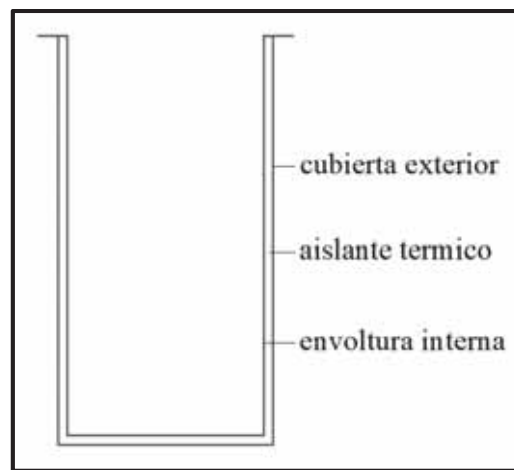
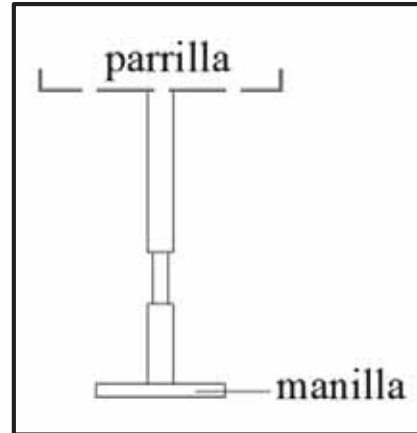


Figura 39. Configuración de la envoltura del gasificador. Fuente: elaboración propia

### 5.2.2.6 Parrilla.

La parrilla es un disco circular con muchos agujeros pequeños, la función de este es evitar la acumulación de cenizas y materiales sólidos productos de la combustión. La parrilla debe poseer dos movimientos: rotacional alrededor de su eje y traslacional a lo largo de su eje. El disco debe estar unida a una manilla, esta manilla debe ubicarse fuera del gasificador, para poder ser manipulado adecuadamente. La configuración de la parrilla se muestra en la figura 40, el dimensionamiento exacto y el material de la que será fabricada este componente se detalla en el plano PFG-007.





**Figura 40. Configuración de la parrilla del gasificador.** Fuente: elaboración propia

#### **5.2.2.7 Otros componentes.**

Entre las partes que no se mencionaron están: la abertura para la salida de gas pobre y la compuerta para la limpieza de las cenizas. La abertura para la salida de gas pobre será por la parte superior del gasificador, este conectará el gasificador con el ciclón. La compuerta para limpieza será por la parte inferior, este será una puerta de tal manera que permita el acceso para retirar cualquiera materia sólida producto de la combustión. El dimensionamiento y diseño de estas partes se detallan en los planos PFG-003 y PFG-004.

#### **5.2.3 Análisis de resistencia de materiales en el gasificador.**

##### **5.2.3.1 Falla por compresión en el gasificador.**

Según la configuración del gasificador (mostrado en los planos), el único elemento que entra en contacto con el suelo estático es la cubierta exterior. Los elementos como la envoltura interna, la capa de aislante térmico, la tolva externa, la tolva interna-reactor y la masa de la pulpa de café, están cargadas sobre la cubierta exterior. Por ello, el elemento más propenso a fallar por compresión será la cubierta exterior.





Primeramente, determinaremos la fuerza de compresión a la que está expuesta la cubierta exterior, para ello debemos determinar el peso de cada elemento del gasificador. Según el catálogo de productos de la empresa polimetales S.A.C. el peso teórico de una plancha y un tubo redondo se determinan a partir de las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$w_p = (L * A * E) * F$$

$$w_t = (D * E) * 0.025132$$

Donde:

$w_p$ : peso de una plancha de acero inoxidable ( $Kg/plancha$ )

$w_t$ : peso de un tubo de acero inoxidable ( $Kg/m$ )

$L$ : largo de la plancha ( $m$ )

$A$ : ancho de la plancha ( $m$ )

$E$ : espesor ( $mm$ )

$F$ : factor para el inoxidable ( $F = 8$ )

$D$ : diámetro exterior del tubo ( $mm$ )

Los materiales a utilizar para la construcción del gasificador son: plancha de acero inoxidable ASTM A240 C-304L de 2mm de espesor N1 (ANEXO 2), ASTM A240 C-310S de 3mm de espesor 2B (ANEXO 3), tubo redondo ASTM A249 C-304L de 1/8 SCH 80S AP y manta de fibra cerámica del espesor indicado en los planos. Las planchas de acero inoxidable tienen la dimensión de 1500x3000mm.

En el siguiente cuadro se detalla el peso según la superficie, longitud o volumen requerido de cada material.





**Tabla 27**

*Peso por material requerido*

<b>Material</b>	<b>Superficie (S) / longitud(L) / Volumen(V) requerido</b>	<b>Peso teórico(PT) / densidad(D)</b>	<b>Peso total</b>
Plancha C-304L de 2mm	4.20251(S)	16Kg/m <sup>2</sup> (PT)	67.2402Kg
Plancha C-310S de 3mm	0.83466m <sup>2</sup> (S)	24Kg/m <sup>2</sup> (PT)	20.0317Kg
Tubo C-304L	18.66106m(L)	0.6239Kg/m(PT)	11.6417Kg
Manta de fibra cerámica	0.02997m <sup>3</sup> (V)	64Kg/m <sup>3</sup> (D)	1.9181Kg
Pulpa de café	0.10185m <sup>3</sup> (V)	124.4Kg/m <sup>3</sup> (D)	12.6699Kg
<b>Total</b>			<b>113.5016Kg</b>

fuelle: elaboración propia

Se emplea el acero inoxidable AISI C-304L y AISI C-310S por las propiedades mecánicas estables y por su resistencia a la acción corrosiva que presentan al operar a altas temperaturas (superiores a 338.758°, ítem 6.1.2) según las fichas técnicas mostradas en los ANEXOS 2 y 3.

Al peso total calculado en la tabla 27 incrementaremos un 50% de exceso, por ello:

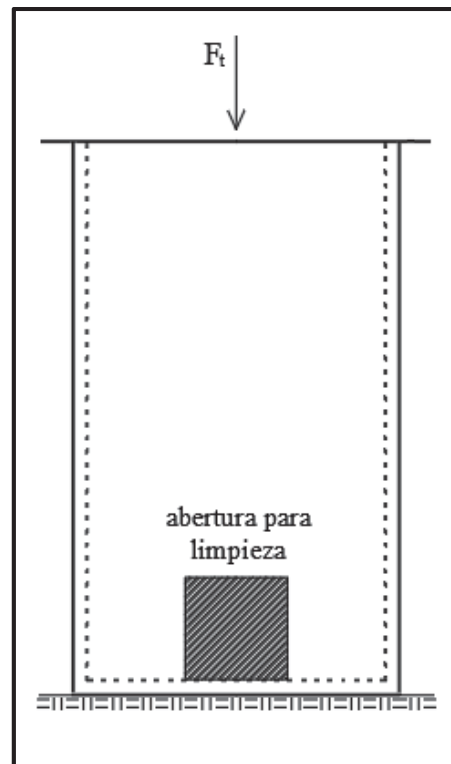
$$W_T = 1.5 * 113.5016Kg = 170.2525Kg = 1669.6063N$$

La cubierta exterior es el único elemento del gasificador que transmitirá la fuerza total hacia el apoyo fijo en la base, se debe aclarar que el peso total calculado en la tabla 27 incluye el peso de la cubierta exterior, así como de todos los elementos que forman parte del gasificador. El peso total y la fuerza total es igual en este caso  $W_T = F_t = 1669.6063N$ , por tratarse de un solo elemento cargado axialmente. El punto más crítico en fallar por compresión es la que posee menor

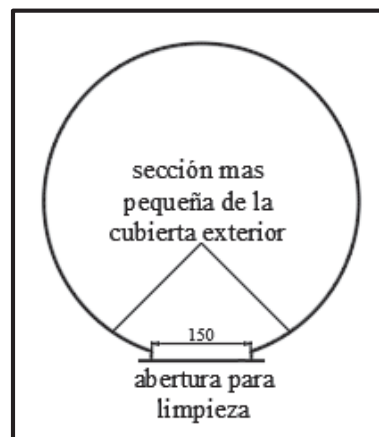




sección de área, es decir, la sección que se ubica a la altura de la compuerta de 15x15cm (la cual servirá para retirar los residuos sólidos sobrantes del proceso de gasificación).



**Figura 41. Fuerza axial total sobre la cobertura exterior.** Nota: la cubierta exterior tiene la forma geométrica de un cilindro



**Figura 42. Sección transversal más pequeña en la cubierta exterior, a la altura de la abertura para la limpieza.** Nota: las unidades están en mm





Para una sola carga axial, el esfuerzo normal máximo  $\sigma_{max} = F_t/A$  siempre se presenta en la sección transversal ( $\theta = 0^\circ$ ) y el esfuerzo cortante máximo  $\tau_{max} = \sigma_{max}/2$  se presenta en un plano orientado a  $45^\circ$  con respecto a la dirección axial (Riley, Sturges, & Morris, 2001). De manera que el esfuerzo cortante máximo en la fluencia es  $\tau_{max} = S_y/2$  (Budynas & Nisbett, 2008).

El área de la sección expuesta es:

$$A = 2700.7291mm^2 = 0.0027007291m^2$$

El esfuerzo axial de compresión en el área expuesta es:

$$\sigma = \frac{F_t}{A} = \frac{1669.6063N}{0.0027007291m^2} = 618.206Kpa = 0.618Mpa$$

El esfuerzo cortante máximo será:

$$\tau_{max} = \frac{618.206Kpa}{2} = 309.103Kpa = 0.309Mpa$$

Para el acero inoxidable ASTM A240 C-304L la resistencia a la tracción mínima es 485 Mpa y su límite elástico mínimo es 170 Mpa (ficha técnica del acero austenítico C-304L). Para metales dúctiles, se acostumbra suponer que las propiedades a compresión tienen los mismos valores que aquellas a tensión (Riley, Sturges, & Morris, 2001).

El factor de seguridad para el esfuerzo axial a compresión con respecto al límite elástico del acero inoxidable C-304L será:

$$\sigma = 0.618Mpa \ll 170Mpa$$

$$FS_a = \frac{170Mpa}{0.618Mpa} = 275.081$$

El factor de seguridad para el esfuerzo cortante con respecto al límite elástico del acero inoxidable C-304L será:

$$\tau_{max} = 0.309Mpa \ll \frac{170Mpa}{2} = 85Mpa$$





$$FS_c = \frac{170\text{Mpa}}{0.309\text{Mpa}} = 550.162$$

A partir de la evaluación de los factores de seguridad, concluimos que es imposible que la cubierta exterior del gasificador falle por aplastamiento y por esfuerzo cortante, debido a que los factores de seguridad son elevados.

### 5.2.3.2 Falla por pandeo en el gasificador.

El pandeo es la deflexión lateral en columnas esbeltas largas cargadas axialmente a compresión. La carga axial máxima que puede soportar una columna cuando está al borde del pandeo se le denomina la carga crítica de pandeo o la carga de pandeo de Euler y tiene la siguiente magnitud (Riley, Sturges, & Morris, 2001):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Donde:

$P_{cr}$ : carga crítica de pandeo

$E$ : módulo de elasticidad

$I$ : segundo momento del área transversal

$L$ : longitud de la columna

El módulo de elasticidad para el acero inoxidable C-304L es  $E = 193\text{Gpa}$ , para la cubierta exterior la altura es  $L = 0.8123\text{m}$  y su segundo momento de área transversal, se determina con la siguiente expresión:

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} (0.4804^4 - 0.4764^4) = 8.599 * 10^{-5} m^4$$

Entonces la carga crítica de pandeo será:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * 193 * 10^9 \text{pa} * 8.599 * 10^{-5} m^4}{0.8123^2 m^2} = 248.240 MN$$





El área de la sección transversal de la cubierta exterior es  $A = 0.0030058758m^2$ , entonces el esfuerzo crítica de Euler será:

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = 82584.916Mpa; \quad \sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2}$$

La cantidad adimensional  $L/r$  se denomina la relación de esbeltez y se determina con respecto al eje alrededor del cual tiende a presentarse la flexión (Riley, Sturges, & Morris, 2001). La relación de esbeltez será:

$$L/r = 4.803$$

Los miembros cortos a compresión ( $L/r < 40$  para columnas de acero) pueden tratarse como bloques a compresión en los cuales la fluencia se presenta antes del pandeo (Riley, Sturges, & Morris, 2001).

En conclusión, no se presentará pandeo en la cubierta exterior del gasificador debido a que la relación de esbeltez es pequeña, pero tendrá la tendencia a fallar por aplastamiento, sin embargo, en la sección anterior se realizó este análisis y se garantizó que no ocurrirá falla por aplastamiento.

#### **5.2.4 Análisis de gasificador como tanque a presión.**

El gas pobre generado en el gasificador posee una temperatura de  $338.758^{\circ}C$  (Ítem 6.1.2), este gas en un ambiente herméticamente cerrado causaría elevación de presión, sin embargo, se tiene instalado un ventilador entre el gasificador y el ciclón, este ventilador cumple la función permanente de aspirar el gas generado, por lo cual imposibilita que el gasificador se presurize. Sin embargo, por seguridad y garantía de operación se realiza el cálculo del gasificador como un tanque a presión.

El código ASME, Sección VIII División 1, especifica claramente algunas limitaciones, entre las principales tenemos:







**Tabla 28**

*Limitaciones del código ASME, evaluación del gasificador como tanque a presión*

<b>Parámetro evaluado</b>	<b>Limitación código ASME</b>	<b>Evaluación en gasificador</b>	<b>estado</b>
Espesor mínimo	$R/t \geq 10$	$218/2 \geq 10$	Cumple
Elementos principales móviles	No elementos móviles	No tiene	Cumple
Diámetro interior mínimo	6"	16.17"	Cumple
La presión máxima de diseño	3000 psi	<3000psi	Cumple
Estacionaria	Estacionaria	Estacionaria	Cumple

Fuente: (Leon Estrada, 2001)

El código ASME también indica que:

Si el peso específico del producto es menor que el del agua, se usará el peso específico del agua para calcular la presión hidrostática del producto, si el peso específico del producto es mayor que el del agua, se usará el valor del peso específico del producto para calcular el valor de la presión hidrostática. (Leon Estrada, 2001, pág. 143)

Se conoce que el peso específico del gas pobre es menor a la del agua, por ello para nuestros cálculos consideraremos el peso específico del agua.

Para el diseño y cálculo del gasificador como tanque a presión se tienen las siguientes consideraciones:

- a) Se considera como un tanque cilíndrico vertical.
- b) El cálculo se realiza únicamente para el tanque interno (envoltura interna) considerando que será hermético de tapas planas tanto por la parte superior como por la parte inferior.





#### 5.2.4.1 Presión hidrostática ( $P_H$ ).

La presión hidrostática es aquella que un fluido en reposo genera por su propio peso.

$$P_H = P_e H$$

Donde:

$P_H$ : presión hidrostática

$P_e$ : peso específico

$H$ : altura de la columna de agua

La presión más alta se manifiesta en la parte más baja del recipiente, por ello:

$$P_H = 9807(\text{KN}/\text{m}^3) * 0.891(\text{m}) = 8.738\text{KN}/\text{m}^2 = 1.267\text{psi}$$

#### 5.2.4.2 Presión de operación ( $P_O$ ).

Es identificado como la presión de trabajo y es la presión manométrica a la cual estará sometido un equipo en condiciones de operación normal.

Para el gasificador se considera que la presión de operación será igual a la presión atmosférica ( $1 \text{ atm} = 15\text{psi} = 101.325 \text{ Kpa}$ ).

#### 5.2.4.3 Presión de diseño ( $P$ ).

Es el valor de la presión de diseño está dada por la que resulte mayor de las siguientes ecuaciones:

$$P = (P_O + P_H)1.1 \quad \text{ó} \quad P = P_O + P_H + 30\text{lb}/\text{pul}g^2$$

De ello:

$$P = (15\text{psi} + 1.267\text{psi})1.1 = 17.894\text{psi}$$

$$P = 15\text{psi} + 1.267\text{psi} + 30\text{psi} = 46.267\text{psi}$$

#### 5.2.4.4 Espesor del cuerpo cilíndrico ( $t$ ).

El espesor mínimo del cilindro en términos del radio interior será:





$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

Donde:

$t$  = espesor mínimo requerido del cuerpo (pulg.)

$P$  = presión del diseño interna (psi.)

$R$  = radio interior (pulg.)

$S$  = valor del máximo esfuerzo admisible (psi)

$E$  = eficiencia de la junta

De ello se tiene que:

**Tabla 29**

*Parámetros de cálculo de espesor para el cilindro del gasificador*

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR	FUENTE
Presión de diseño	Psi	46.267	Ítem 5.2.4.3
Radio interior	Pulg	8.583	Plano PFG-002
Esfuerzo	Psi	24656.4 (170Mpa)	Ítem 5.2.3.1
Eficiencia de soldadura	...	0.6	ANEXO 7

Fuente: elaboración propia

$$t = \frac{46.267 * 8.583}{24656.4 * 0.6 - 0.6 * 46.267} = 0.0269 \text{pulg} = 0.683 \text{mm}$$

Considerando una corrosión permisible de 1/32 pulg, entonces el espesor de fabricación será:

$$t = 0.0269 \text{pulg} + 1/32 \text{pulg} = 0.058 \text{pulg} = 1.48 \text{mm}$$

### 5.3 Diseño del Ciclón

Diseñaremos un ciclón de alta eficiencia. “Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de  $5\mu\text{m}$  con eficiencias hasta el 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes” (Echeverri Londoño, 2006, pág. 125).

Los requerimientos del gas pobre para trabajar en motores de combustión interna, esto para evitar el desgaste prematuro, en general son:





**Tabla 30**

*Requerimiento del gas pobre para su uso en motores de combustión interna*

Parámetro	Motor de CI	Unidades	Referencia
Partícula	< 50	$mg/m^3N$	(Fonseca Gonzales, 2003)
Tamaño partícula	< 10	$\mu m$	Sanchez, 2007 como se citó en (Aristizabal Alvarez & Valencia Naranjo, 2015)
Alquitranes	< 100	$mg/m^3N$	(Fonseca Gonzales, 2003)
Ácidos	< 50	$mg/m^3N$	(Fonseca Gonzales, 2003)

Fuente: elaboración propia

El flujo de gas pobre a la salida del reactor, es decir, a la temperatura real  $T_{SR} = 611.908K = 338.758^\circ C$  (Ítem 6.1.2) se calculara mediante la siguiente expresión:

$$\dot{V}_{xr} = \frac{\dot{m}_x * R * T_{SR}}{M_x * P}$$

Donde:

$\dot{V}_{xr}$ : flujo volumétrico a la temperatura real del componente x del gas pobre ( $m^3/h$ )

$\dot{m}_x$ : flujo masico del componente x del gas pobre ( $Kg/h$ )

$T_{SR}$ : temperatura del gas pobre a la salida del reactor ( $K$ )

$R$ : constante universal de los gases ( $R = 8.314 \frac{Kpa * m^3}{Kmol * ^\circ K}$ )

$M_x$ : peso molecular del componente x del gas pobre ( $Kg/Kmol$ , APÉNDICE 4)

$P$ : presión atmosférica ( $P = 101.325Kpa$ )

En la tabla 31 se muestra el flujo volumétrico de cada componente del gas pobre, así como el flujo total.





**Tabla 31**

*Flujo volumétrico real del gas pobre (338.758 °C)*

<b>Componente</b>	<b>Flujo másico (Kg/h)</b>	<b>Peso molecular (Kg/Kmol)</b>	<b>Flujo volumétrico real (m<sup>3</sup>/h)</b>
<i>CO</i>	3.69815	28	6.63141
<i>CO<sub>2</sub></i>	3.48683	44	3.97885
<i>CH<sub>4</sub></i>	0.14088	16	0.44209
<i>H<sub>2</sub></i>	0.31421	2	7.88793
<i>N<sub>2</sub></i>	8.75618	28	15.70131
<b>Total</b>			<b>34.64160</b>

La densidad de la ceniza de la pulpa de café, la densidad y la viscosidad del gas pobre obtenido de la pulpa de café, no son datos existentes. Sin embargo, para fines de cálculo y diseño del ciclón tomaremos parámetros existentes y generalizados.

La densidad y la viscosidad del gas pobre en función de la temperatura se determina de la siguiente gráfica:



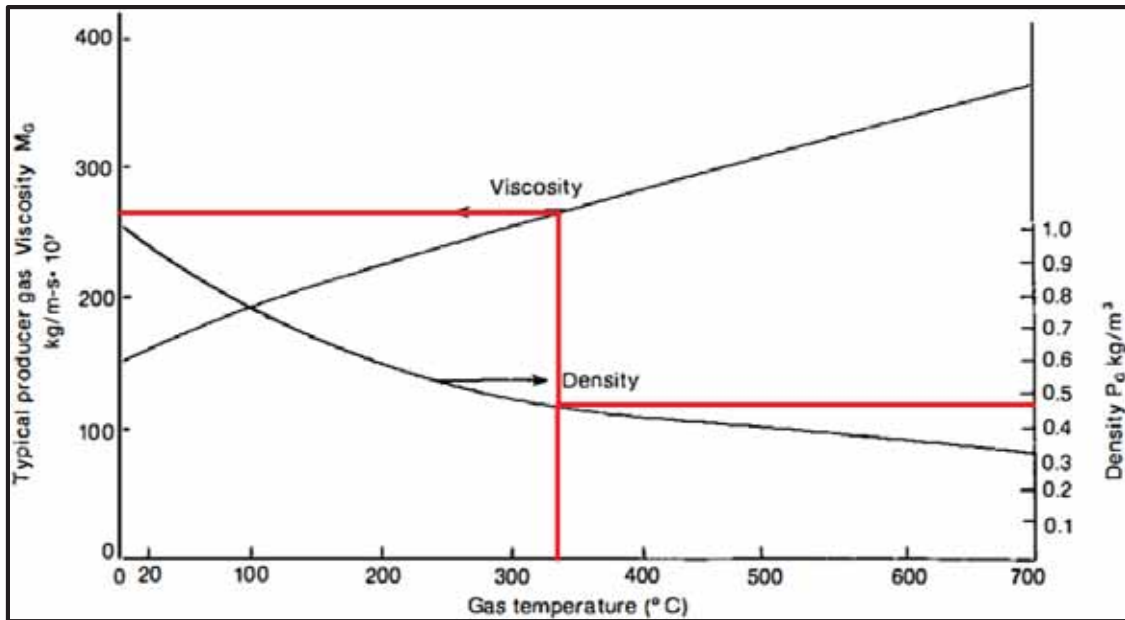


Figura 43. Viscosidad y densidad del gas pobre en función de la temperatura. Fuente: (Reed & Das, 1988, pág. 79)

En la tabla 32 se muestra el resumen de los datos requeridos para el diseño del ciclón.

**Tabla 32**

*Datos requeridos del material particulado y del gas pobre para el diseño del ciclón*

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Densidad de la partícula (ceniza) ( $\rho_p$ )	2000	$Kg/m^3$	(Reed & Das, 1988) como se citó en (Aristizabal Alvarez & Valencia Naranjo, 2015)
Densidad del gas pobre ( $\rho$ )	0.47	$Kg/m^3$	Figura 43
Viscosidad del gas pobre ( $\mu$ )	$260 * 10^{-7}$	$Kg/m * s$	Figura 43

Fuente: elaboración propia

En la siguiente figura se muestra la configuración y los parámetros dimensionales del ciclón.

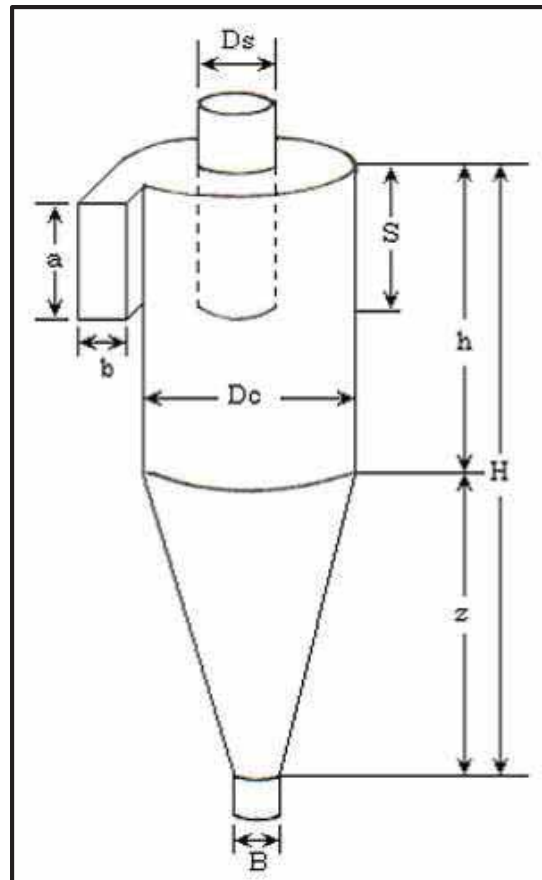


Figura 44. Configuración y dimensiones del ciclón. Fuente: (Echeverri Londoño, 2006)

La velocidad de entrada del gas al ciclón, según la experiencia debe situarse en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s (Echeverri Londoño, 2006). Consideraremos una velocidad de entrada de  $V_i = 16\text{m/s}$ .

Se elige un ciclón de alta eficiencia del tipo Stairmand, la cual tiene las siguientes características:





**Tabla 33**

*Dimensionamiento del ciclón*

Dimensión	Relación respecto a $D_c$		Parámetro	Valor	Unidad
	Nomenclatura	Stairmand			
Diámetro del ciclón	$D_c/D_c$	1.0	$D_c$	0.07755	m
Altura de entrada	$a/D_c$	0.5	$a$	0.03878	m
Ancho de entrada	$b/D_c$	0.2	$b$	0.01551	m
Altura de salida	$S/D_c$	0.5	$S$	0.03878	m
Diámetro de salida	$D_s/D_c$	0.5	$D_s$	0.03878	m
Altura parte cilíndrica	$h/D_c$	1.5	$h$	0.11633	m
Altura parte cónica	$z/D_c$	2.5	$z$	0.19388	m
Altura total del ciclón	$H/D_c$	4.0	$H$	0.31020	m
Diámetro salida partículas	$B/D_c$	0.375	$B$	0.02908	m
Factor de configuración	$G$	551.22	-	-	-
Numero cabezas de velocidad	$N_H$	6.4	-	-	-
Numero de vórtices	$N$	5.5	-	-	-

Conocido el caudal y la velocidad de entrada del gas al ciclón, podemos determinar el diámetro del ciclón ( $D_c$ ) y consecuentemente los otros parámetros.

$$\text{Área} = 0.5D_c * 0.2D_c = \frac{0.00962m^3/s}{16m/s} \Rightarrow D_c = 0.07755m$$

Para realizar los cálculos respectivos consideraremos que la concentración de partículas en el gas es de  $2.0g/m^3$  (Echeverri Londoño, 2006).

Para determinar la eficiencia del ciclón, primeramente, determinaremos si existe resuspensión o no. Calculamos la velocidad equivalente con la siguiente relación (Echeverri Londoño, 2006):







$$W = \sqrt[3]{\frac{4 * g * \mu * (\rho_p - \rho)}{3 * \rho^2}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 9.81 * 260 * 10^{-7} * (2000 - 0.47)}{3 * 0.47^2}} = 1.455 \text{ m/s}$$

Donde:

$W$ : velocidad equivalente ( $m/s$ )

$g$ : gravedad ( $m/s^2$ )

Calculamos la velocidad de saltación con la siguiente expresión (Echeverri Londoño, 2006):

$$V_s = \frac{4.913 * W * K_b^{0.4} * D_c^{0.067} * \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - K_b}} = \frac{4.913 * 1.455 * 0.2^{0.4} * 0.07755^{0.067} * \sqrt[3]{16^2}}{\sqrt[3]{1 - 0.2}}$$

$$= 21.636 \text{ m/s}$$

Donde:

$V_s$ : velocidad de saltación ( $m/s$ )

$K_b$ : relación entre el ancho de la entrada y el diámetro del ciclón ( $K_b = b/D_c = 0.2$ )

La relación entre la velocidad de entrada y la velocidad de saltación es  $V_i/V_s = 16/21.636 = 0.739$ , como  $V_i/V_s < 1.35$ , no hay resuspensión del material particulado.

Como no existe resuspensión de las partículas, procedemos a calcular la eficiencia del ciclón, para ello debemos determinar el exponente de vórtice y el tiempo de relación. El exponente de vórtice se determina con la siguiente expresión (Echeverri Londoño, 2006):

$$n = 1 - (1 - 0.67 * D_c^{0.14}) \left[ \frac{T}{283} \right]^{0.3} = 1 - (1 - 0.67 * 0.07755^{0.14}) \left[ \frac{611.908}{283} \right]^{0.3} = 0.33$$

Donde:

$n$ : exponente del vórtice (adimensional)

$T$ : temperatura real del gas pobre (611.908K)

El tiempo de relación se determina con la siguiente expresión (Echeverri Londoño, 2006):





$$T_i = \frac{\rho_p * D_{pi}^2}{18\mu} = \frac{2000 * (5 * 10^{-6})^2}{18 * 260 * 10^{-7}} = 1.068 * 10^{-4} s$$

Donde:

$T_i$ : tiempo de relación (s)

$D_{pi}$ : diámetro de la partícula ( $D_{pi} = 5\mu m = 5 * 10^{-6} m$ )

Entonces la eficiencia fraccional para una partícula de  $D_{pi} = 5\mu m$  será (Echeverri Londoño, 2006):

$$\eta_i = 1 - e^{\left[ -2 \left( \frac{G * T_i * Q * (n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0.5}{n+1}} \right]} = 1 - e^{\left[ -2 \left( \frac{551.22 * 1.068 * 10^{-4} * 0.00962 * (0.33+1)}{0.07755^3} \right)^{\frac{0.5}{0.33+1}} \right]} = 0.909$$

Donde:

$\eta_i$ : eficiencia fraccional para una partícula de  $5\mu m$  diámetro

$G$ : factor de configuración (tabla 33)

$Q$ : flujo volumétrico de gas pobre ( $Q = 0.00962 m^3/s$ )

La eficiencia para partículas de  $5\mu m$  de diámetro será de 0.909, la eficiencia del ciclón aumenta conforme el tamaño de las partículas incrementa. La eficiencia total, es decir, para la mezcla de los diferentes tamaños de partículas, será mayor que la determinada anteriormente.

En la siguiente grafica se muestra la variación de la eficiencia del ciclón con respecto a la variación del tamaño de las partículas.



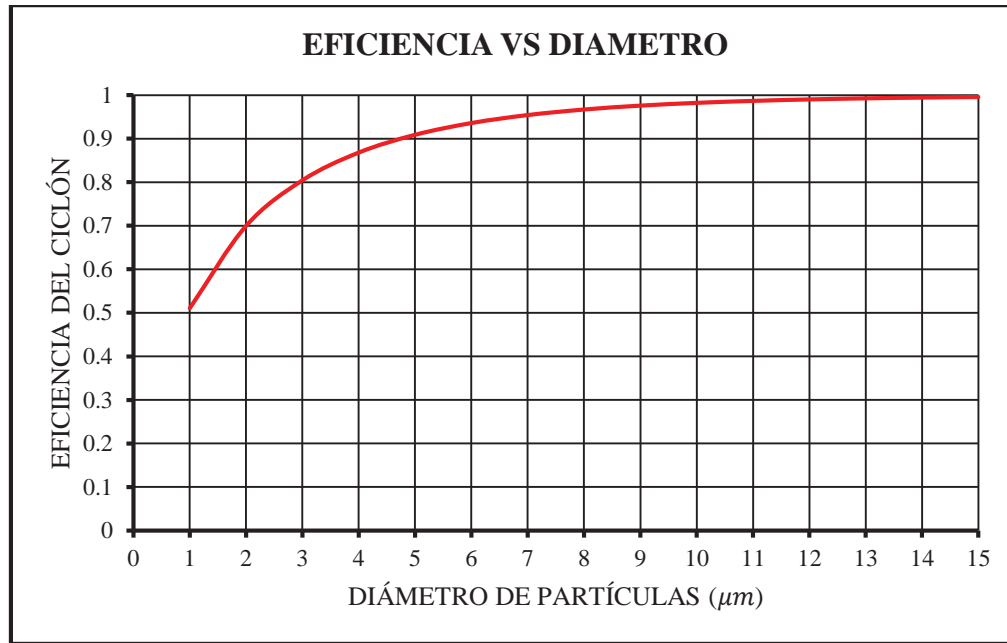


Figura 45. Eficiencia del ciclón vs diámetro de partículas. Fuente: elaboración propia

El ciclón será fabricado de acero inoxidable ASTM A240 C-304L de 5mm de espesor, plano PDGF-001.

### 5.3.1 Caída de presión en el ciclón.

La caída de presión en el ciclón, se calcula con la siguiente relación (Echeverri Londoño, 2006):

$$\Delta P_c = \frac{1}{2} * \rho * V_i^2 * N_H$$
$$\Delta P_c = \frac{1}{2} * 0.47 * 16^2 * 6.4 = 385.024 \text{ pa}$$

### 5.4 Caída de Presión en Tuberías de Conducción de Gas y Aire

En el sistema de nuestro trabajo de tesis será necesario emplear ventiladores con el objetivo de mover el flujo de gas pobre por el interior de los tubos (recorrido gasificador-ciclón-intercambiador-motor) y también aire por la coraza del intercambiador. La distribución de ventiladores se muestra en la figura 46:

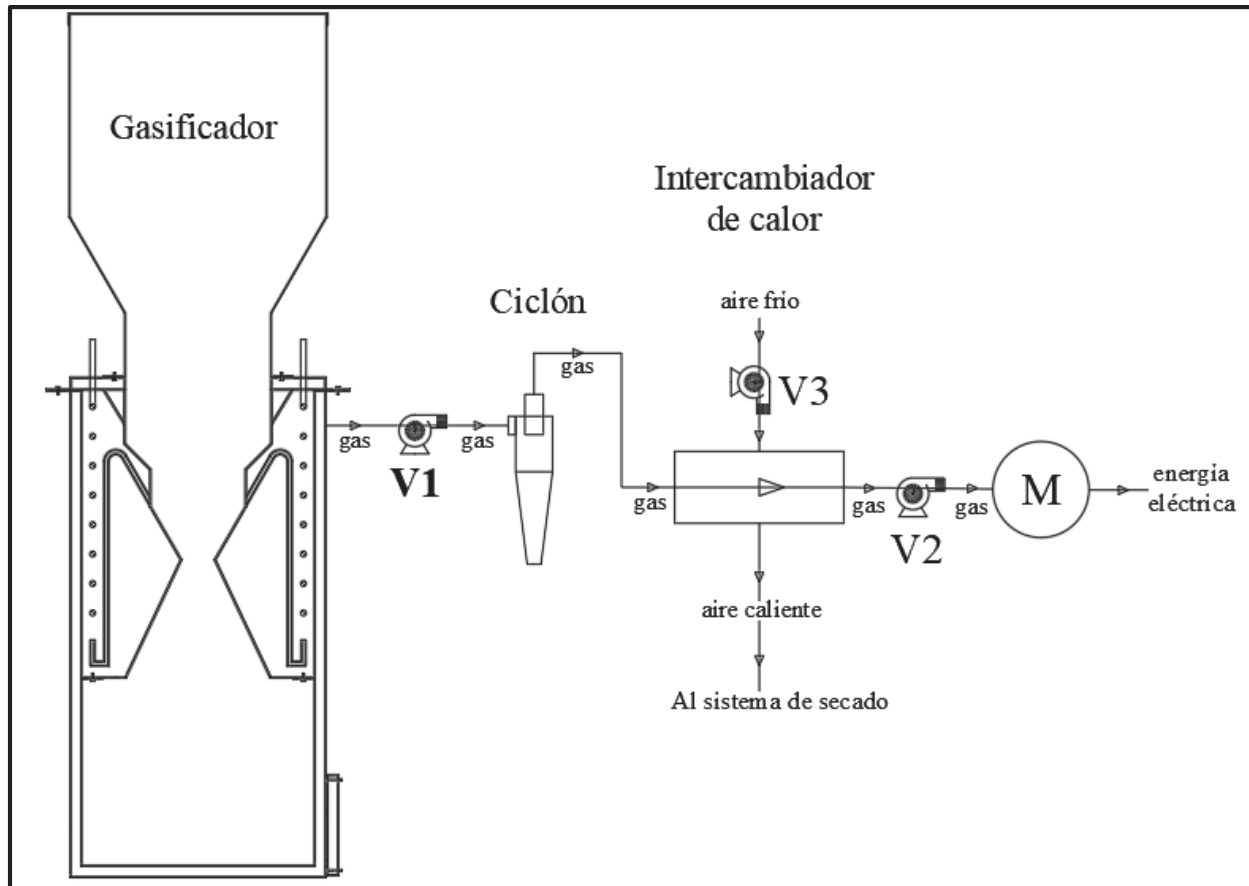


Figura 46. Distribución de ventiladores en el sistema de gasificación. Fuente: elaboración propia

#### 5.4.1 Caídas de presión en tuberías y accesorios.

La caída de presión se determina a partir de la siguiente ecuación (Sánchez Jaramillo, Palacio Gallego, & Álvarez Álvarez, 2006):

$$Q = \frac{0.13}{G^{0.425}} \left( \frac{P_1^2 - P_2^2}{L} \right)^{0.575} D^{2.725}$$

$$P_2 = \left( P_1^2 - \frac{34.75LQ^{1.739}G^{0.739}}{D^{4.739}} \right)^{0.5}$$

Donde:

$Q$ : caudal bajo condiciones normales ( $m^3/h$ )

$G$ : gravedad específica



$L$ : longitud total del tramo ( $m$ )

$D$ : diámetro interno de la tubería ( $mm$ )

$P_1$ : presión de entrada al tramo ( $bar$ )

$P_2$ : presión de salida del tramo ( $bar$ )

La longitud total del tramo estará constituida por la longitud real del tramo, más la longitud equivalente ( $L_e$ ) de los accesorios instalados en dicho tramo. La longitud equivalente se calcula con la siguiente ecuación:

$$L_e = \frac{\text{rel. longitud}}{\text{diámetro del tramo}} * \text{diámetro interior (mm)} \div 1000$$

La relación longitud/diámetro se presenta en la tabla de la figura 47 (Sánchez Jaramillo, Palacio Gallego, & Álvarez Álvarez, 2006):

Accesorio	Relación Longitud/Diámetro
Codo A 90°	30
Codo A 45°	14
TEE A 90°	60
TEE A 90°	20

**Figura 47. Relación longitud/diámetro en accesorios.** Fuente: (Sánchez Jaramillo, Palacio Gallego, & Álvarez Álvarez, 2006)

#### 5.4.1.1 Velocidad del gas en cada tramo.

La velocidad en cada tramo se determina con la siguiente ecuación (Sánchez Jaramillo, Palacio Gallego, & Álvarez Álvarez, 2006):

$$v_f = 353.7 \left( \frac{Q_{st}}{D^2} \right) \left( \frac{P_{st}}{P_f} \right) \left( \frac{T_f}{T_{st}} \right)$$





Donde:

$Q_{st}$ : caudal estándar ( $m^3/h$ )

$D$ : diámetro interno de la tubería ( $mm$ )

$P_{st}$ : presión estándar ( $1.01325\ bar$ )

$P_f$ : presión absoluta ( $bar$ )

$T_{st}$ : temperatura estándar ( $298.15\ K$ )

$T_f$ : temperatura del gas ( $K$ )

#### 5.4.2 Tramo recorrido de gas pobre.

##### 5.4.2.1 Tramo ciclón - intercambiador.

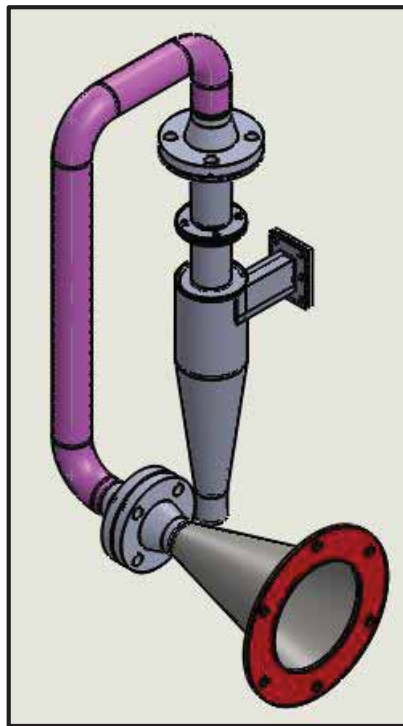


Figura 48. Tuberías tramo ciclón – intercambiador. Fuente: elaboración propia

La Norma Técnica Peruana NTP 111.011 recomienda utilizar tubos de acero negro para instalaciones de gas.





De la norma ANSI/ASME B 36.10 recomendada por la norma NTP 111.011 elegimos tubería de  $1\frac{1}{2}$ " SCH 40S.

De la norma ANSI/ASME B16.5 seleccionamos la brida clase 150 lbs correspondiente para la tubería de  $1\frac{1}{2}$ " SCH 40S. La unión entre la tubería y la brida será soldada.

5.4.2.1.1 *Velocidad en tramo ciclón - intercambiador.*

Se calcula a partir de los siguientes datos:

**Tabla 34**

*Datos para el cálculo de velocidad en el tramo ciclón - intercambiador*

Parámetro	Valor	Unidad
$Q_{st}$	16.878998	$m^3/h$
$D$	40.9	$mm$
$P_{st}$	1.01325	$bar$
$P_f$	1.00862971	$bar$
$T_{st}$	298.15	$bar$
$T_f$	611.908	$K$

Fuente: elaboración propia

$$v_{fc-i} = 353.7 \left( \frac{16.88}{40.9^2} \right) \left( \frac{1.013}{1.008} \right) \left( \frac{611.91}{298.15} \right) = 7.36 \text{ m/s}$$

Donde:

$v_{fc-i}$ : velocidad tramo ciclón - intercambiador

5.4.2.1.2 *Caída de presión en tramo ciclón - intercambiador.*

La longitud de tubo recto es:

$$L_R = 1196mm = 1.196m$$

La longitud equivalente referente a los codos de 90° es:





$$L_e = 3 * \frac{30 * 40.9}{1000} = 3.681m$$

La longitud total será:

$$L = 1.196m + 3.681m = 4.88m$$

La gravedad específica es la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad de otra sustancia de referencia, se evalúa en condiciones normales (25°C). De la figura 43 se determina la densidad para el gas pobre siendo  $0.91Kg/m^3$  aproximadamente.

$$G = \frac{\text{densidad gas pobre (25°C)}}{\text{densidad del aire (25 °C)}} = \frac{0.91Kg/m^3}{1.205Kg/m^3} = 0.76$$

Los datos necesarios para el cálculo de la caída de presión en tramos rectos y codos 90° son:

**Tabla 35**

*Datos para el cálculo de caída presión en el tramo ciclón - intercambiador*

Parámetro	Valor	Unidad
$Q$	16.878998	$m^3/h$
$G$	0.76	
$L$	4.88	$m$
$D$	40.9	$mm$
$P_1$	1.00862971	$bar$

Fuente: elaboración propia

Entonces:

$$P_2 = \left( 1.009^2 - \frac{34.75 * 4.88 * 16.879^{1.739} * 0.76^{0.739}}{40.9^{4.739}} \right)^{0.5} = 1.008482937bar$$

$$\Delta P_{TCI} = P_1 - P_2 = 1.00862971 - 1.008482937 = 0.000146773bar = 14.68pa$$

Donde:

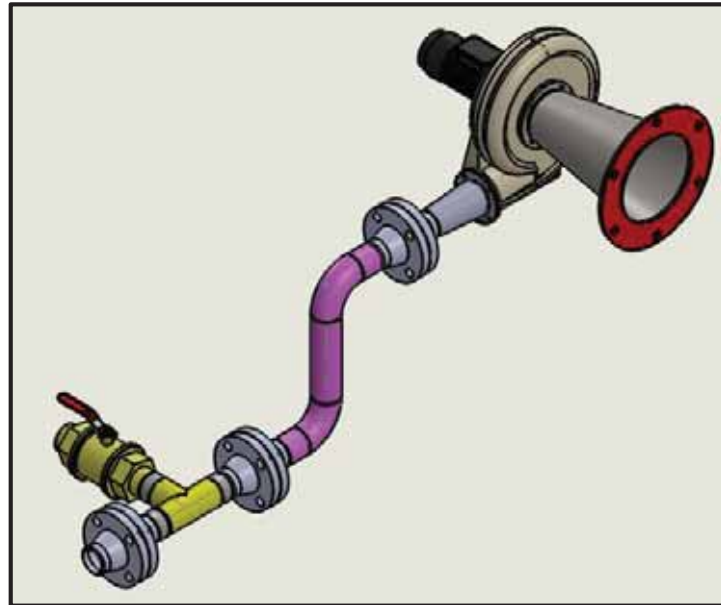
$\Delta P_{TCI}$ : caída de presión tramo ciclón-intercambiador







#### 5.4.2.2 Tramo intercambiador – generador eléctrico.



**Figura 49. Tuberías tramo intercambiador - generador eléctrico.** Fuente: elaboración propia

De la Norma Técnica Peruana NTP 111.011 se utiliza tubos de acero negro.

De la norma ANSI/ASME B 36.10 recomendada elegimos tubería de  $1\frac{1}{2}$ " SCH 40S.

De la norma ANSI/ASME B16.5 seleccionamos la brida clase 150 lbs.

##### 5.4.2.2.1 Velocidad en tramo intercambiador – generador eléctrico.

Se calcula a partir de los siguientes datos:





**Tabla 36**

*Datos para el cálculo de velocidad en el tramo intercambiador – generador eléctrico*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$Q_{st}$	17.16212	$m^3/h$
$D$	40.9	$mm$
$P_{st}$	1.01325	$bar$
$P_f$	1.008490672	$bar$
$T_{st}$	298.15	$bar$
$T_f$	303.15	$K$

Fuente: elaboración propia

$$v_{fi-g} = 353.7 \left( \frac{17.16}{40.9^2} \right) \left( \frac{1.013}{1.008} \right) \left( \frac{303.15}{298.15} \right) = 3.71 \text{ m/s}$$

Donde:

$v_{fi-g}$ : velocidad tramo intercambiador – generador eléctrico

#### 5.4.2.2.2 Caída de presión en tramo intercambiador – generador eléctrico.

La longitud de tubo recto es:

$$L_R = 1095.93 \text{ mm} = 1.096 \text{ m}$$

La longitud equivalente referente a los codos de 90° es:

$$L_e = 2 * \frac{30 * 40.9}{1000} = 2.45 \text{ m}$$

La longitud equivalente referente al tee 90° es:

$$L_e = 1 * \frac{60 * 40.9}{1000} = 2.45 \text{ m}$$

La longitud total será:

$$L = 1.096 \text{ m} + 2.45 \text{ m} + 2.45 \text{ m} = 6.004 \text{ m}$$





La gravedad específica será:

$$G = \frac{\text{densidad gas pobre (25°C)}}{\text{densidad del aire (25 °C)}} = \frac{0.91\text{Kg/m}^3}{1.205\text{Kg/m}^3} = 0.76$$

Los datos necesarios para el cálculo de la caída de presión en tramos rectos, codos 90° y tee 90° son:

**Tabla 37**

*Datos para el cálculo de caída de presión en el tramo intercambiador – generador eléctrico.*

Parámetro	Valor	Unidad
$Q$	17.16212	$\text{m}^3/\text{h}$
$G$	0.76	
$L$	5.81	$\text{m}$
$D$	40.9	$\text{mm}$
$P_1$	1.008490672	$\text{bar}$

Fuente: elaboración propia

Entonces:

$$P_2 = \left( 1.008^2 - \frac{34.75 * 6.004 * 17.16^{1.739} * 0.76^{0.739}}{40.9^{4.739}} \right)^{0.5} = 1.008302219\text{bar}$$

$$\Delta P_{TIGE} = P_1 - P_2 = 1.008490672 - 1.008309957 = 0.000188453\text{bar} = 18.845\text{pa}$$

Donde:

$\Delta P_{TIGE}$ : caída de presión tramo intercambiador-generador eléctrico

### 5.4.3 Tramo recorrido de aire.

#### 5.4.3.1 Velocidad en tramo ventilador 3 – intercambiador.

Para el tramo del ventilador 3 hacia el intercambiador de calor, únicamente se tiene un reductor concéntrico, por lo cual únicamente se calcula la velocidad del flujo de gas en la parte más angosta del tramo.



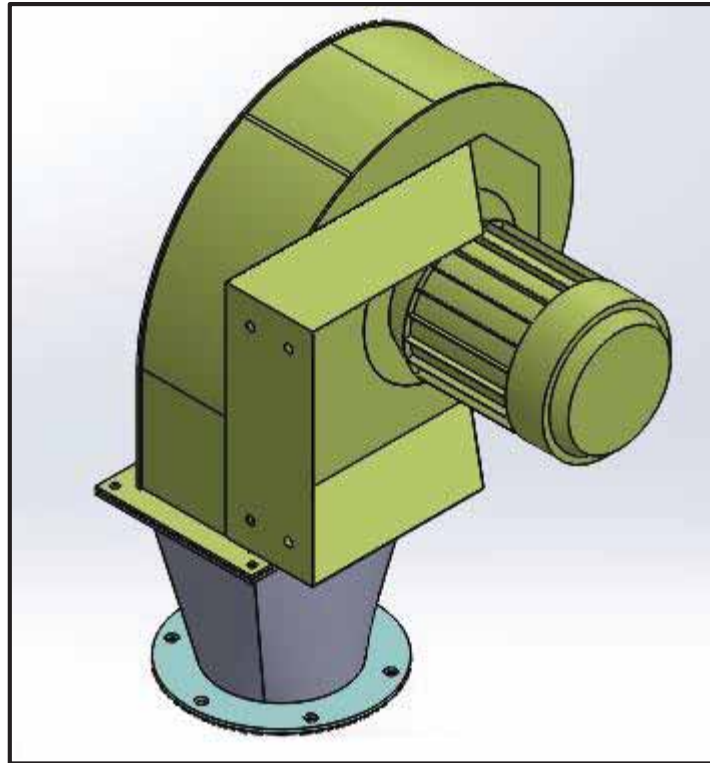


Figura 50. Tramo ventilador 3 - intercambiador. Fuente: elaboración propio

Los datos necesarios para el cálculo son:

**Tabla 38**

*Datos para el cálculo de velocidad en tramo ventilador 3 – intercambiador.*

Parámetro	Valor	Unidad
$Q_{st}$	526.208	$m^3/h$
$D$	150	$mm$
$P_{st}$	1.01325	$bar$
$P_f$	1.01325	$bar$
$T_{st}$	298.15	$bar$
$T_f$	298.15	$K$

Fuente: elaboración propia

$$v_{fv3-i} = 353.7 \left( \frac{526.208}{150^2} \right) \left( \frac{1.013}{1.013} \right) \left( \frac{298.15}{298.15} \right) = 8.27 \text{ m/s}$$





Donde:

$v_{fv3-i}$ : velocidad tramo ventilador 3-intercambiador

#### 5.4.3.2 Velocidad en tramo intercambiador – salida.

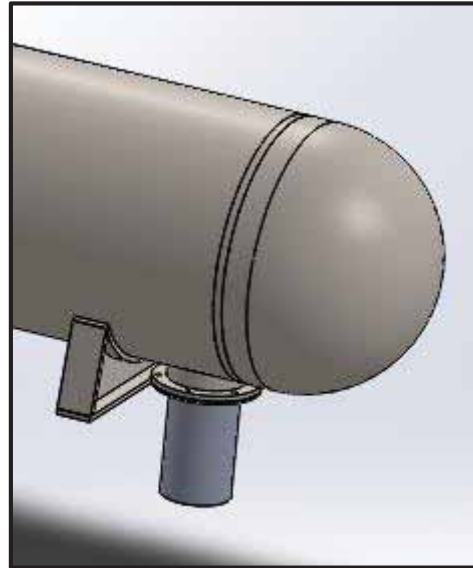


Figura 51. Tramo intercambiador - salida. Fuente: elaboración propia.

Para el tramo intercambiador – salida únicamente se calcula la velocidad de salida del flujo de aire caliente, los datos necesarios son:

**Tabla 39**

*Datos para el cálculo de velocidad en tramo intercambiador – salida.*

Parámetro	Valor	Unidad
$Q_{st}$	526.208	$m^3/h$
$D$	150	$mm$
$P_{st}$	1.01325	$bar$
$P_f$	1.00983	$bar$
$T_{st}$	298.15	$bar$
$T_f$	328.15	$K$

Fuente: elaboración propia





$$v_{fi-s} = 353.7 \left( \frac{526.208}{150^2} \right) \left( \frac{1.013}{1.01} \right) \left( \frac{328.15}{298.15} \right) = 9.14 \text{ m/s}$$

Donde:

$v_{fi-s}$ : velocidad tramo intercambiador-salida

## 5.5 Selección de Ventiladores

### 5.5.1 Selección del ventilador V1.

El ventilador denominado V1 será la encargada de conducir el gas desde el gasificador hacia el ciclón. En este tramo existen pérdidas de presión de distintos tipos como: por la resistencia que el combustible (pulpa de café) ejerce al paso de aire, pérdidas en el ciclón, así como pérdidas en el tramo de conducción de un equipo a otro (gasificador-ciclón). De todas estas pérdidas la más significativa es la pérdida en el ciclón, las otras pérdidas mencionadas ponderaremos incrementando el 20% de la pérdida significativa. Por ello, la pérdida de presión total en el ventilador V1 será:

$$\Delta P_{V1} = \Delta P_c + 20\%(\Delta P_c)$$

$$\Delta P_{V1} = 385.024 \text{ pa} + 20\%(385.024 \text{ pa})$$

$$\Delta P_{V1} = 462.029 \text{ pa}$$

En este punto el gas pobre se encuentra a la temperatura de 338.758°C (Ítem 6.1.2). Los parámetros para la selección del ventilador V1 se muestran en la tabla 40:

**Tabla 40**

*Parámetros para la selección del ventilador V1*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Flujo volumétrico	$\dot{V}_g$	34.64160	$m^3/h$	Tabla 31
Caída de presión	$\Delta P_{V1}$	462.029	pa	---
densidad	$\rho$	0.47	$Kg/m^3$	Tabla 32

Nota: 462.029pa=47.1138mmca (milímetros de columna de agua)





Para la selección del ventilador recurrimos al catálogo general de Sodeca. El ventilador seleccionado es del tipo centrífugo:

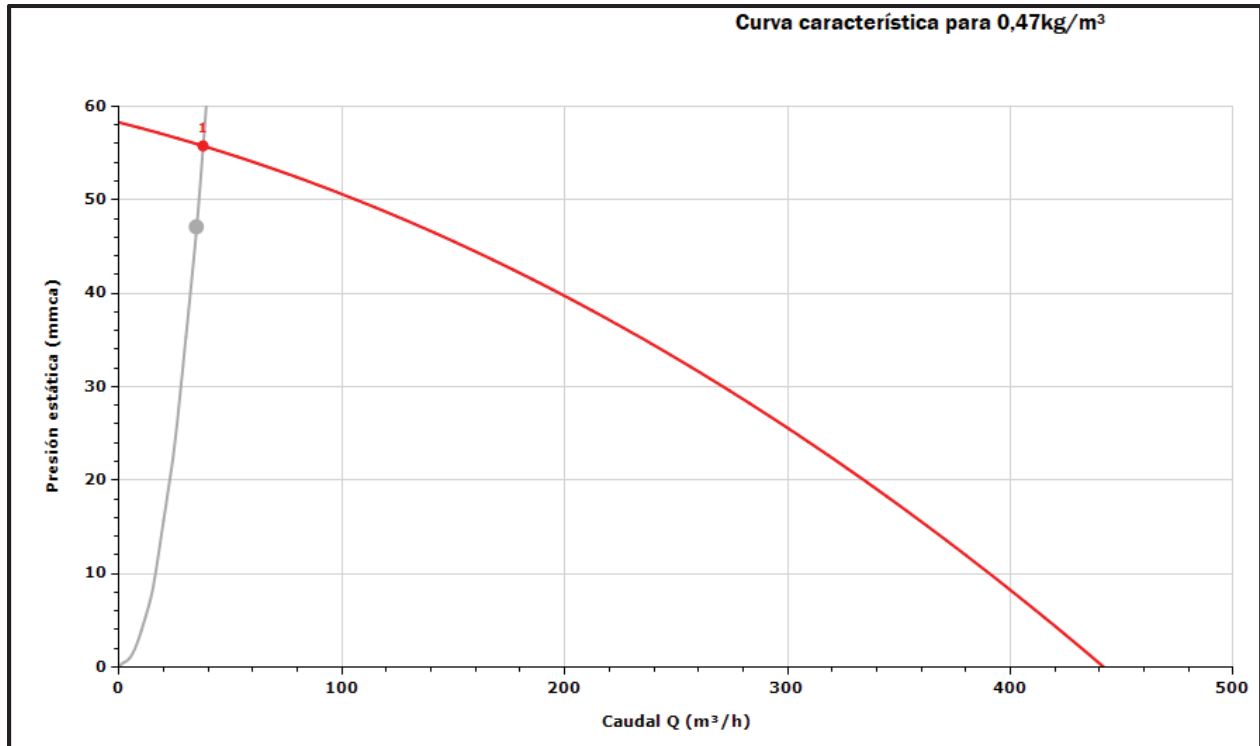
**Tabla 41**

*Características del ventilador V1 seleccionado*

Modelo	Q(m <sup>3</sup> /h)	Pe(mmca)	Potencia Mec. Nominal (KW)
CMA-324-2T 60HZ	37.91	55.76(546.45pa)	0.18

Nota: los detalles de la selección se muestran en el ANEXO 4

La grafica de selección es la siguiente:



**Figura 52. Grafica de selección de ventilador V1**

### 5.5.2 Selección del ventilador V2.

El ventilador denominado V2 será la encargada de superar la caída de presión en el intercambiador de calor y dirigir el flujo desde el ciclón hacia el generador eléctrico. En este tramo





la caída de presión más significativa se calcula en los tubos del intercambiador de calor, también se calcula la caída de presión en el tramo ciclón – intercambiador, así como en el tramo intercambiador – generador eléctrico, para los accesorios como difusores y toberas cónicos en este tramo, se pondera una caída de presión de 86.6% de la caída de presión total en las tuberías.

$$\Delta P_{V2} = \Delta P_{t103} + \Delta P_{TCI} + \Delta P_{TIGE} + 13.8\%(\Delta P_{TCI} + \Delta P_{TIGE})$$

$$\Delta P_{V2} = 357.194pa + 14.68pa + 18.845pa + 86.6\%(\Delta P_{TCI} + \Delta P_{TIGE})$$

$$\Delta P_{V2} = 419.744pa$$

En el punto ubicado del ventilador V2, la temperatura del gas pobre es de 30°C (Tabla 55), por ello el flujo de gas pobre a la temperatura de salida del intercambiador se calculará mediante la siguiente expresión:

$$\dot{V}_{xr} = \frac{\dot{m}_x * R * T_{SI}}{M_x * P}$$

Donde:

$\dot{V}_{xr}$ : flujo volumétrico a la temperatura real del componente x del gas pobre ( $m^3/h$ )

$\dot{m}_x$ : flujo masico del componente x del gas pobre ( $Kg/h$ )

$T_{SI}$ : temperatura del gas pobre a la salida del intercambiador ( $K$ )

$R$ : constante universal de los gases ( $R = 8.314 \frac{Kpa*m^3}{Kmol*°K}$ )

$M_x$ : peso molecular del componente x del gas pobre ( $Kg/Kmol$ , APÉNDICE 4)

$P$ : presión atmosférica ( $P = 101.325Kpa$ )

En la tabla 42 se muestra el flujo volumétrico de cada componente del gas pobre, así como el flujo total.







**Tabla 42**

*Flujo volumétrico del gas pobre a la salida del intercambiador de calor (30°C)*

Componente	Flujo másico (Kg/h)	Peso molecular (Kg/Kmol)	Flujo volumétrico real (m <sup>3</sup> /h)
CO	3.69815	28	3.28532
CO <sub>2</sub>	3.48683	44	1.97119
CH <sub>4</sub>	0.14088	16	0.21902
H <sub>2</sub>	0.31421	2	3.90788
N <sub>2</sub>	8.75618	28	7.77871
<b>Total</b>			<b>17.16212</b>

Los parámetros para la selección del ventilador V2 se muestran en la tabla 43:

**Tabla 43**

*Parámetros para la selección del ventilador V2*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Flujo volumétrico	$\dot{V}_g$	17.16212	m <sup>3</sup> /h	Tabla 42
Caída de presión	$\Delta P_{V2}$	419.744	pa	---
densidad	$\rho$	0.93	Kg/m <sup>3</sup>	Figura 43

Nota: 419.744pa=42.802mmca (milímetros de columna de agua)

Para la selección del ventilador recurrimos al catálogo general de Sodeca. El ventilador seleccionado es del tipo centrífugo:

**Tabla 44**

*Características del ventilador V2 seleccionado*

Modelo	Q(m <sup>3</sup> /h)	Pe(mmca)	Potencia Mec. Nominal (KW)
CMA-218-2T 60HZ	17.74	45.76(448.45pa)	0.09

Nota: los detalles de la selección se muestran en el ANEXO 5

La grafica de selección es la siguiente:



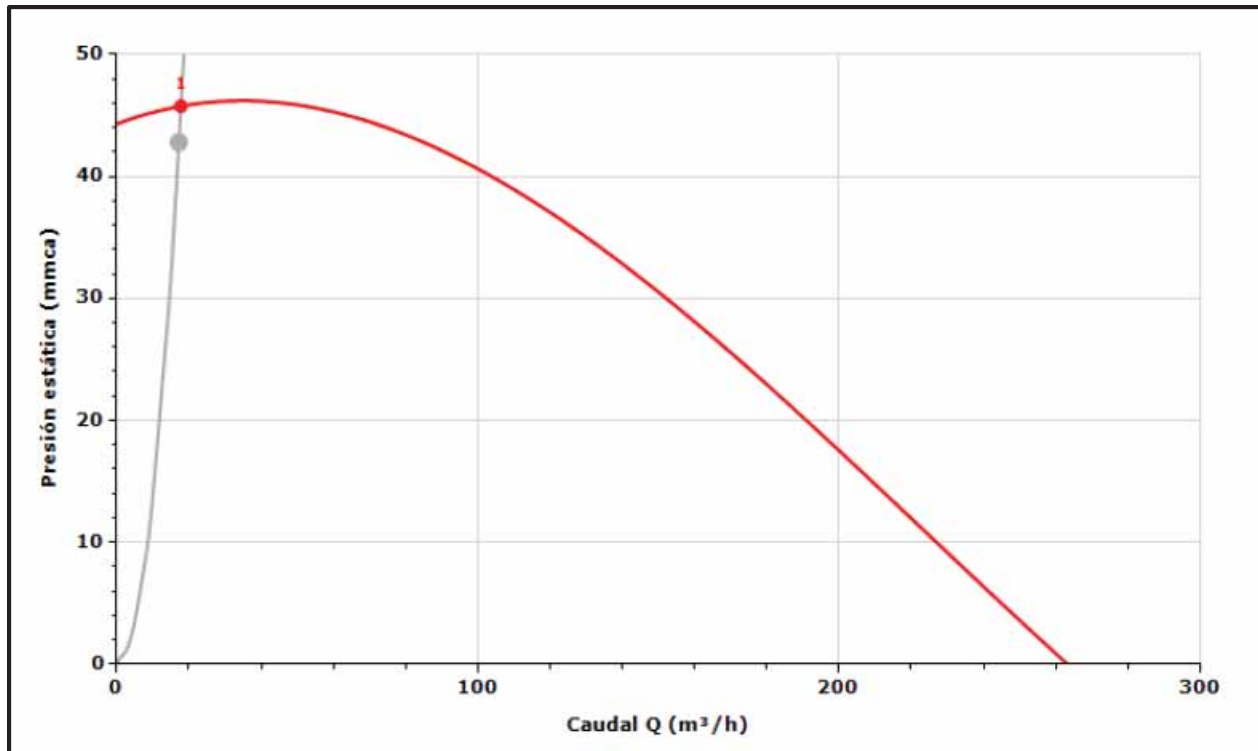


Figura 53. Gráfica de selección de ventilador V2

### 5.5.3 Selección del ventilador V3.

El ventilador V3 será la encargada de inducir aire frío ( $25^{\circ}\text{C}$ ,  $1.184\text{Kg}/\text{m}^3$ ) hacia el intercambiador de calor. El flujo volumétrico de aire que se debe inducir es:

$$\dot{V}_g = \frac{\text{flujo masico (Kg/s)}}{\text{densidad (Kg/m}^3)} = \frac{\dot{m}_c}{\text{densidad}}$$
$$\dot{V}_g = \frac{0.17306387\text{Kg/s}}{1.184\text{Kg/m}^3} = 0.146169\text{m}^3/\text{s} = 526.208\text{m}^3/\text{h}$$

La caída de presión que deberá superar el ventilador V3 será la del lado de la coraza del intercambiador de calor, así como la de la tobera. Para la selección del ventilador se considera únicamente la caída de presión en el lado de la coraza, por lo cual para la tobera consideraremos el excedente de caída de presión debido a la selección.

$$\Delta P_{V3} = \Delta P_{ci}$$





$$\Delta P_{V3} = 343.535 \text{ pa}$$

Los parámetros para la selección del ventilador V3 se muestran en la tabla 45:

**Tabla 45**

*Parámetros para la selección del ventilador V3*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Flujo volumétrico	$\dot{V}_g$	526.208	$m^3/h$	---
Caída de presión	$\Delta P_{V3}$	343.535	$pa$	---
densidad	$\rho$	1.184	$Kg/m^3$	(Cengel & Ghajar, 2011)

Nota:  $342.073 \text{ pa} = 34.8817 \text{ mmca}$  (milímetros de columna de agua), la densidad del aire se determinó para una temperatura de  $25^\circ\text{C}$

Para la selección del ventilador recurrimos al catálogo general de Sodeca. El ventilador seleccionado es del tipo centrífugo:

**Tabla 46**

*Características del ventilador V3 seleccionado*

Modelo	$Q(m^3/h)$	Pe(mmca)	Potencia Mec. Nominal (KW)
CMP-922-4T 60HZ	530.35	35.43	0.55

Nota: los detalles de la selección se muestran en el ANEXO 6



La grafica de selección es la siguiente:

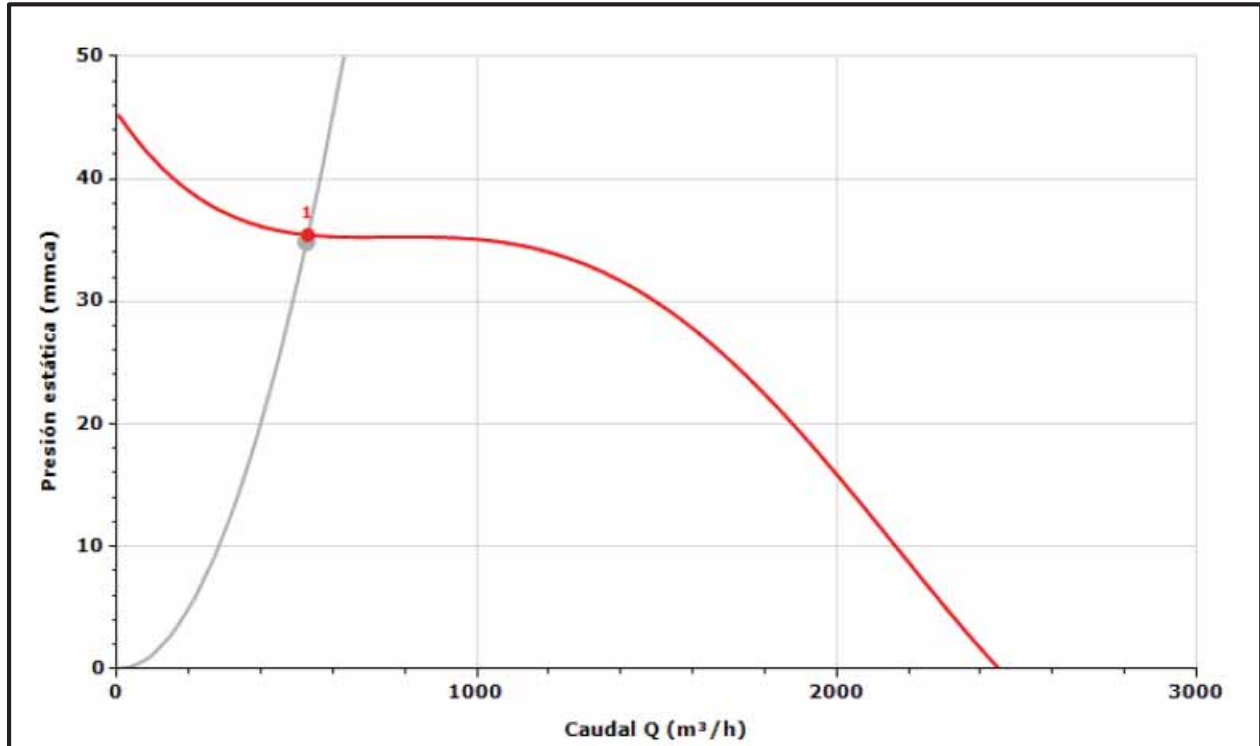


Figura 54. Grafica de selección de ventilador V3

## 5.6 Evaluación de Eficiencias Térmicas

### 5.6.1 Eficiencia térmica del sistema de gasificación con respecto a la potencia nominal.

Determinamos la energía que entra y sale del sistema de gasificación considerando 2 horas de operación, la energía que entra al sistema es la correspondiente a la pulpa de café y la energía que sale del sistema es la correspondiente a la energía térmica y eléctrica.

Calculamos la energía que entra al sistema de gasificación:



**Tabla 47**

*Datos para cálculo de la energía que entra al sistema de gasificación*

Dato	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Flujo másico	$\dot{m}_{pch}$	6.33495	$Kg/h$	Ítem 3.2.1.3
Poder calorífico inferior	$PCI_{pc}$	20.718	$MJ/Kg$	Ítem 3.5.4

Fuente: elaboración propia

$$E_{entr} = 2h * 6.33495Kg/h * 20.718MJ/Kg$$

$$E_{entr} = 2h * 6.33495Kg/h * 20.718MJ/Kg$$

$$E_{entr} = 262.49498MJ$$

Calculamos la energía que sale del sistema de gasificación:

**Tabla 48**

*Datos para cálculo de la energía que sale del sistema de gasificación*

Datos	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Potencia térmica	$Q_i$	5228.25941	$W$	Ítem 6.2.4
Potencia eléctrica	---	3900	$W$	Ítem 5.1.1

Fuente: elaboración propia

$$E_{sal} = (5228.25941 + 3900)J/s * 2 * 3600s$$

$$E_{sal} = 65.72347MJ$$

Entonces la eficiencia térmica del sistema de gasificación será (Figura 13):

$$\eta_{Gnom} = \frac{65.72347MJ}{262.49498MJ} * 100$$

$$\eta_{Gnom} = 25.04\%$$





## CAPITULO VI

### Diseño Térmico

#### 6.1 Diseño Térmico del Gasificador

##### 6.1.1 Balance de masa en el gasificador.

El balance de masa consiste en la aplicación de la ley de conservación de la masa que expresa que “la masa no se crea ni se destruye”. El gasificador de nuestro sistema corresponde a un sistema abierto estacionario. Para realizar el cálculo del balance de masa, se deben considerar todos los materiales o sustancias que entran al equipo, así como las que salen en unidades másicas. Al equipo en estudio (gasificador) únicamente ingresa pulpa de café (biomasa) y aire del ambiente, salen los gases producto de la gasificación (gas pobre) y materiales no quemados y cenizas.

##### 6.1.1.1 Sustancias que ingresan al gasificador.

Al gasificador de nuestro sistema ingresa pulpa de café con una de humedad de 15%, esto es  $\dot{m}_{pch} = 6.33495 \text{ Kg/h}$ . Además ingresa aire necesario para la gasificación (25% del estequiométrico)  $\dot{m}_{aire} = 11.41628 \text{ Kg/h}$ .

##### 6.1.1.2 Sustancias que salen del gasificador.

En el APÉNDICE 4 se calculó el flujo másico de los componentes del gas pobre en función de flujo másico de pulpa de café seca, estos son:

$$\dot{m}_{CO} = 0.7186 * 5.14618 = 3.69815 \text{Kg/h}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 0.6776 * 5.14618 = 3.48683 \text{Kg/h}$$

$$\dot{m}_{CH_4} = 0.0274 * 5.14618 = 0.14088 \text{Kg/h}$$

$$\dot{m}_{H_2} = 0.0611 * 5.14618 = 0.31421 \text{Kg/h}$$

$$\dot{m}_{N_2} = 1.7015 * 5.14618 = 8.75618 \text{Kg/h}$$





Además de los componentes del gas pobre, también salen del gasificador vapor de agua y cenizas.

Como se dijo anteriormente, al gasificador ingresa pulpa de café con una humedad de 15%, se espera que como parte de la reacción del proceso salga vapor de agua del gasificador a consecuencia de la humedad, para estimar dicha cantidad se va a suponer que toda el agua presente en la pulpa de café sale del equipo sin reaccionar (Mairena Calvo, 2010).

$$0.15 = \frac{m_{humeda} - m_{seca}}{m_{seca}}$$

“La masa de agua presente en la biomasa corresponde a la diferencia entre la masa húmeda menos la masa seca, o mejor dicho la masa seca multiplicada por un factor de 0.15, es decir (Mairena Calvo, 2010, pág. 36):

$$\dot{m}_{H_2O} = 0.15\dot{m}_{pcs} = 0.15 * 5.14618 = 0.77193Kg/h$$

Es importante mencionar que el porcentaje de vapor de agua en los gases de salida es despreciable, esto porque el vapor de agua reacciona casi por completo con el carbono del material biomásico para formar hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono (Mairena Calvo, 2010).

Como se puede apreciar en la tabla 12, la pulpa de café contiene cantidades muy pequeñas de N y S, es por ello que estos no fueron tomados en cuenta en las reacciones realizadas en el APÉNDICE 4, por lo tanto, se supone que estos materiales salen del gasificador junto con las cenizas, por ello el flujo total de cenizas será la suma del porcentaje de cenizas del material (6.58%) más el porcentaje de N y S presente en el mismo.

$$\dot{m}_{cen\ total.} = 0.0658\dot{m}_{pcs} + (\%N + \%S)\dot{m}_{pcs}$$

$$\dot{m}_{cen\ total.} = 0.0658 * 5.14618 + (0.0302 + 0.0021) * 5.14618 = 0.50484Kg/h$$

En la tabla 49 se resume el flujo másico de entrada y el flujo másico de salida.





**Tabla 49**

*Resumen del balance de masa en el gasificador*

<b>Componente</b>	<b>Entrada (Kg/h)</b>	<b>Salida (Kg/h)</b>
Pulpa de café húmedo	6.33495	---
Aire	11.41628	---
Cenizas	---	0.50484
Vapor de agua	---	0.77193
CO	---	3.69815
H <sub>2</sub>	---	0.31421
CH <sub>4</sub>	---	0.14088
CO <sub>2</sub>	---	3.48683
N <sub>2</sub>	---	8.75618
<b>Total</b>	<b>17.75123</b>	<b>17.67301</b>

Fuente: elaboración propia

### 6.1.2 Balance de energía en el gasificador.

Según la ley de conservación de la energía, la energía total que ingresa a un sistema debe ser igual a la que sale, por lo tanto se tiene (Mairena Calvo, 2010):

$$E_{ent} = E_{sal}$$

Donde:

$E_{ent}$ : es la energía que ingresa al gasificador.

$E_{sal}$ : es la energía que sale del gasificador.

La energía que ingresa al gasificador corresponde a la energía del material biomásico y a la entalpia del aire, mientras la energía que sale corresponde a los gases de combustión (gas pobre) y a su entalpia.

$$\dot{m}_{pch} * PCI_{pc} + H_{aire} = \dot{V}_g * PC_g + H_{gas}$$







De la ecuación anterior, si la entrada del aire se da en condiciones normales ( $T=298.15$  K), la entalpía del aire será cero con respecto a esta misma temperatura de referencia, es decir, la variación de temperatura del aire a la entrada será cero y por ende la entalpía del aire también. Entonces la ecuación del balance de energía quedará:

$$\dot{m}_{pch} * PCI_{pc} = \dot{V}_g * PC_g + H_{gas}$$

De la ecuación conocemos todas las variables, excepto la entalpía del gas, despejando la entalpía del gas tenemos:

$$H_{gas} = 6.33495 \frac{Kg}{h} * 20.718 \frac{MJ}{Kg} - 16.878998 \frac{Nm^3}{h} * 5332.07 \frac{KJ}{Nm^3} = 11.45785KW$$

A partir de esta igualdad podemos determinar la temperatura a la que sale el gas, para el cual se cumple la conservación de la energía.

La variación de la entalpía está dada por (Departamento de física aplicada III, universidad de sevilla, 2013):

$$\Delta H = n * c_p * \Delta T$$

Donde:

$\Delta H$ : variación de la entalpía en (KW)

$n$ : número de moles en unidades de (Kmol/s)

$c_p$ : capacidad calorífica molar a presión constante (KJ/Kmol \* K)

$\Delta T$ : variación de la temperatura con respecto a la temperatura de referencia (K)

El número de moles en unidades de (Kmol/h) se calculó en el APÉNDICE 4, la cual está dada en función al flujo másico de la pulpa de café seca ( $n = 0.1341 * 5.14618 = 0.68995Kmol/h$ ). La temperatura de referencia es 298.15 K (condiciones normales). La capacidad calorífica de cada componente del gas pobre se presenta en el siguiente cuadro:





**Tabla 50**

*Calor específico molar a presión constante en función de la temperatura del gas pobre*

Componente	Calor específico molar $c_p$ (KJ/Kmol * K)
CO	$28.160 + 1.6751 * 10^{-3}T + 5.3717 * 10^{-6}T^2 - 2.2219 * 10^{-9}T^3$
CO <sub>2</sub>	$22.257 + 59.808 * 10^{-3}T - 35.010 * 10^{-6}T^2 + 7.4693 * 10^{-9}T^3$
CH <sub>4</sub>	$19.887 + 50.242 * 10^{-3}T + 12.686 * 10^{-6}T^2 - 11.011 * 10^{-9}T^3$
H <sub>2</sub>	$29.107 - 1.9159 * 10^{-3}T + 4.0038 * 10^{-6}T^2 - 0.87044 * 10^{-9}T^3$
N <sub>2</sub>	$28.901 - 1.5713 * 10^{-3}T + 8.0805 * 10^{-6}T^2 - 2.8726 * 10^{-9}T^3$
<b>Total</b>	<b><math>128.312 + 108.2379 * 10^{-3}T - 4.868 * 10^{-6}T^2 - 9.50664 * 10^{-9}T^3</math></b>

Nota: los valores mostrados en la tabla fueron extraídos de (Segura, 1993, pág. 647)

Iguualamos la ecuación de la entalpia del gas.

$$\frac{0.68995}{3600} (128.312 + 108.2379 * 10^{-3}T - 4.868 * 10^{-6}T^2 - 9.50664 * 10^{-9}T^3)(T - 298.15) = 11.45785$$

Resolvemos la ecuación mediante el método de tanteo y determinamos el valor de la temperatura. La temperatura calculada es la temperatura a la que sale el gas pobre del reactor del gasificador:

$$T_{SR} = 611.908K = 338.758^{\circ}C$$

El balance de energía será:

$$E_{ent} = 36.45787KW$$

$$E_{sal} = 25.00002KW + 11.45785KW = 36.45787KW$$

### 6.1.3 Análisis de transferencia de calor en el gasificador.

Antes de realizar el análisis de transferencia de calor en el gasificador, realizaremos algunas aclaraciones para simplificar el proceso de cálculo. En la figura 32 (temperaturas en el gasificador) se puede apreciar que las mayores temperaturas se presentan a lo largo de la garganta, por ello en la garganta se presentará distintos modos de transferencia de calor (conducción, convección y





radiación), lógicamente la transferencia de calor fluirá desde el punto de mayor temperatura hacia el de menor temperatura, es decir, desde la garganta del reactor hacia el gas pobre presente alrededor de este. Al gasificador ingresará aire y pulpa de café en condiciones normales ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ), al entrar en contacto tanto el aire como la pulpa de café con el gas pobre, se presentará una transferencia de calor desde el gas pobre hacia el aire y la pulpa de café. Por un lado, la garganta del reactor elevará la temperatura del gas pobre y por otro lado tanto el aire como la pulpa de café tendrán la tendencia de enfriarlo. Para fines de cálculo asumiremos que aproximadamente el calor transferido desde el reactor, será la misma que la que se transferirá hacia el aire y la pulpa de café. De este modo podemos decir que la temperatura al interior de la envoltura interna será únicamente la correspondiente al gas pobre que sale del reactor.

En los cálculos anteriores se determinó que el gas pobre tendrá una temperatura de 611.908 K a la salida del reactor, sin embargo, para fines de diseño térmico y para garantizar la operación óptima del equipo consideraremos que la temperatura de salida del gas del reactor será de  $600^{\circ}\text{C}$  (figura 32), además se considerará que esta temperatura será uniforme en el gas que se encuentra en el interior de la envoltura interna, así como en la pared interna de la misma.

#### ***6.1.3.1 Transferencia de calor en sentido radial del gasificador (sección cilíndrica).***

Los elementos que intervienen en la transferencia de calor por la sección cilíndrica del gasificador se muestra en la figura 55. El diagrama de resistencia térmica para la envoltura interna, aislante térmico y cubierta exterior, será como la que se muestra en la figura 56, esto considerando que el flujo de calor será radial.



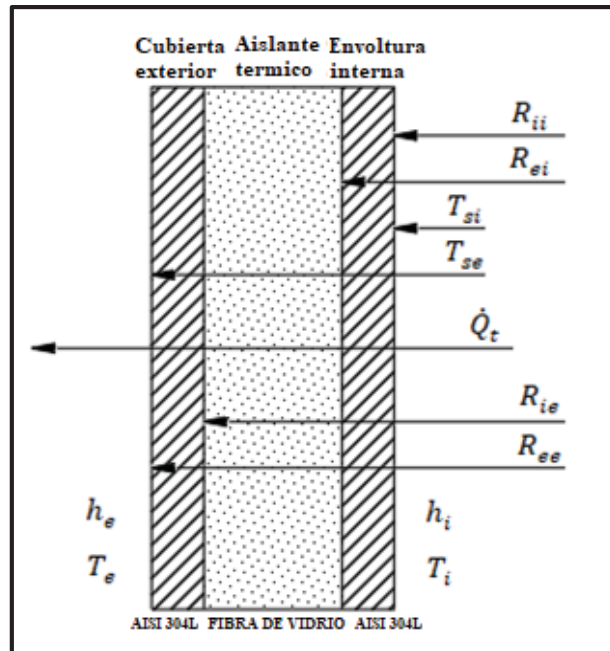


Figura 55. Configuración de la transferencia de calor en la sección circular del gasificador. Fuente: elaboración propia

Donde:

$R_{ii}$ : radio interno de la envoltura interna (m)

$R_{ei}$ : radio externo de la envoltura interna (m)

$R_{ie}$ : radio interno de la cubierta exterior (m)

$R_{ee}$ : radio externo de cubierta exterior (m)

$T_i$ : temperatura en el interior (K)

$T_e$ : temperatura en el exterior (K)

$T_{si}$ : temperatura en la superficie interna de la envoltura interna (K)

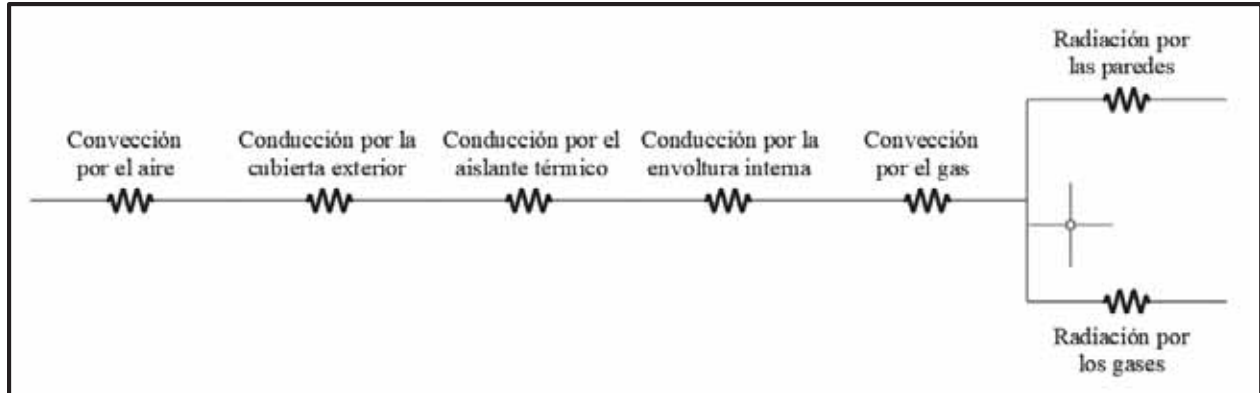
$T_{se}$ : temperatura en la superficie externa de la cubierta exterior (K)

$h_i$ : coeficiente de convección interior ( $W/m^2 * K$ )

$h_e$ : coeficiente de convección exterior ( $W/m^2 * K$ )

$\dot{Q}_t$ : calor total transferido (W)





**Figura 56. Circuito de transferencia de calor por la envoltura interna, aislante térmico y cubierta exterior.**  
Fuente: elaboración propia.

Con respecto al circuito térmico de la transferencia de calor, se hacen las siguientes aclaraciones:

- a) La radiación de pared a pared es nula, esto se debe a que la temperatura en la pared interna de la envoltura interna será constante, además se consideró que la radiación que emite la pared externa del reactor será absorbida por el aire y por la pulpa de café húmedo que ingresa, como se detalló anteriormente.
- b) Se desprecia la convección por el gas, esto se debe a que a altas temperaturas la resistencia al paso del flujo de calor de los gases es mínima.

De las aclaraciones anteriores, los modos de transferencia de calor a considerar son: radiación por los gases, conducción por la envoltura interna, conducción por el aislante térmico, conducción por la cubierta externa y convección por el aire.

Determinar el flujo de calor radiante de un gas a una superficie contigua es complejo. Los gases como el hidrógeno ( $H_2$ ), el oxígeno ( $O_2$ ) y el nitrógeno ( $N_2$ ) no emiten ni absorben radiación (Huaripoma Vega, 2015). De la tabla 14 consideraremos el dióxido de carbono para realizar el respectivo cálculo.





La emisión de gas por unidad de área de la superficie se expresa como (Incropera & Dewitt, 1999):

$$q_r = \varepsilon_g * \sigma_g * T_g^4$$

Donde:

$\varepsilon_g$ : emisividad del gas

$\sigma_g$ : constante de Stefan Boltzmann ( $\sigma_g = 5.67 * 10^{-8} W/m^2 * K^4$ )

$T_g$ : temperatura del gas ( $T_g = 600^\circ C = 873.15K$ )

La emisividad  $\varepsilon_g$  se correlaciona en términos de la temperatura  $T_g$  y la presión total del gas  $P$ , la presión parcial  $P_{CO_2}$  de la especie radiante, y el radio  $L$  del hemisferio. Se introduce el concepto de una longitud media de haz  $L_e$ , que se puede interpretar como el radio de una masa de gas hemisférica cuya emisividad es equivalente a la de la geometría de interés (Incropera & Dewitt, 1999). Los resultados para  $L_e$  se muestran en la tabla 51. Al reemplazar  $L$  por  $L_e$  se puede determinar la emisividad asociada con la geometría de interés.





**Tabla 51**

*Longitudes medias de haz  $L_e$  para varias geometrías de gas*

<b>Geometría</b>	<b>Longitud característica</b>	<b><math>L_e</math></b>
Esfera (radiación a la superficie)	Diámetro (D)	0.65D
Cilindro circular infinito (radiación a superficie curva)	Diámetro (D)	0.95D
Cilindro circular semiinfinito (radiación a la base)	Diámetro (D)	0.65D
Cilindro circular de igual altura y diámetro (radiación a toda la superficie)	Diámetro (D)	0.60D
Planos paralelos infinitos (radiación a los planos)	Espaciado entre planos (L)	1.80L
Cubo (radiación a cualquier superficie)	Lado (L)	0.66L
Forma arbitraria de volumen V (radiación a una superficie de área A)	Razón volumen al área (V/A)	3.6V/A

fuerce: (Incropera & Dewitt, 1999, pág. 754)

Consideraremos la envoltura interna (donde se acumulara el gas pobre) del gasificador como un cilindro circular infinito, por ello,  $L = L_e = 0.95D$ . Considerando que la presión total del gas pobre a la salida del reactor es de 1 atm, determinamos la presión parcial del dióxido de carbono, mediante la ley de Dalton de las presiones parciales.

$$P_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_{total}} * P_{total}$$

El número de moles del dióxido de carbono y el número de moles totales del gas se determinó en el APÉNDICE 4, por ello  $n_{CO_2} = \frac{0.6776\dot{m}_{pcs}}{44}$  y  $n_{total} = 0.1341\dot{m}_{pcs}$ , además  $D = 436mm = 1.4304pies$ . con estos datos determinamos  $P_{CO_2}$  y  $L$ .

$$P_{CO_2} = \frac{0.0154\dot{m}_{pcs}}{0.1341\dot{m}_{pcs}} * 1atm = 0.115atm$$

$$L = L_e = 0.95 * 1.4304pies = 1.359pies$$





$$P_{CO_2} * L = 0.115 atm * 1.359 pies = 0.156 pies * atm$$

Con este resultado y con la temperatura de  $873.15^\circ K$  ingresamos en la siguiente gráfica:

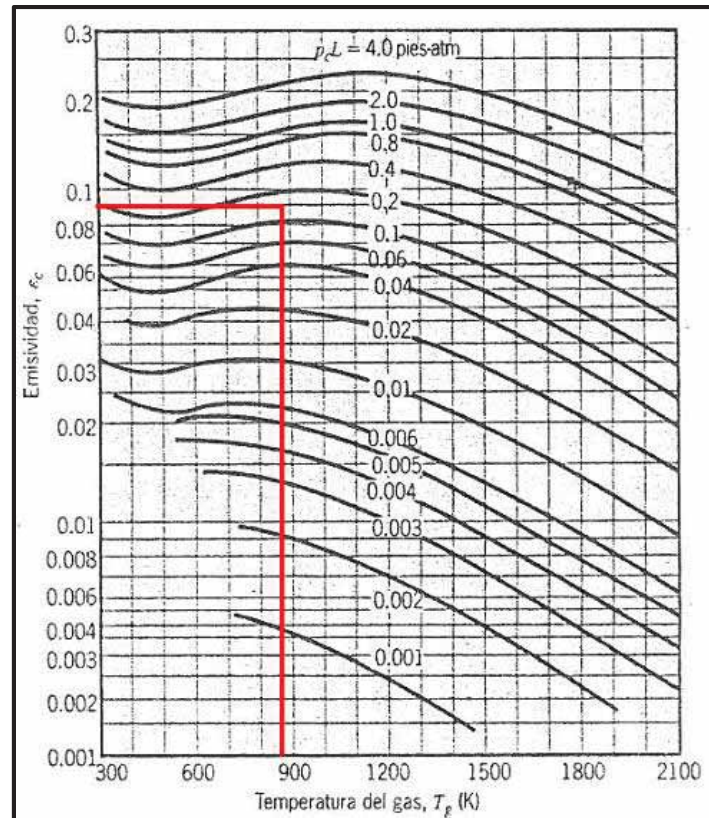


Figura 57. Emisividad de dióxido de carbono en una mezcla con gases no radiantes a 1 atm de presión total y de forma hemisférica. Fuente: (Incropera & Dewitt, 1999, pág. 752)

Del gráfico, la emisividad para el  $CO_2$  es aproximadamente  $\epsilon_g = 0.09$ . Entonces:

$$q_r = 0.09 * 5.67 * 10^{-8} * 873.15^4 = 2966.067 W/m^2$$

El calor por radiación se calcula con la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_r = q_r * A_s$$







Donde:

$\dot{Q}_r$ : calor por radiación (W)

$q_r$ : calor por unidad de área debido a la radiación (W/m<sup>2</sup>)

$A_s$ : área superficial (m<sup>2</sup>)

$$\dot{Q}_r = 2966.067 \text{ W/m}^2 * (\pi * 0.436 * 0.891)m^2 = 3619.887W$$

Hasta aquí hemos calculado el calor por la radiación de los gases. Ahora se debe hallar el calor que se trasmite por conducción y convección, es decir, conducción por la envoltura interna, conducción por el aislante térmico, conducción por la cubierta externa y convección por el aire.

Los datos a considerar son: conductividad térmica del acero inoxidable AISI 304 en la envoltura interna  $K_{304EI} = 25.4 \text{ W/m} * K$  a 1000K y en la cubierta exterior  $K_{304CE} = 14.9 \text{ W/m} * K$  a 300K (Cengel & Ghajar, 2011, pág. 869), conductividad térmica del aislante térmico (manta de fibra cerámica)  $K_{mfc} = 0.19 \text{ W/m} * K$  a 600°C y coeficiente convectivo del aire. El coeficiente de convección libre del aire varía desde 3 hasta 25 W/m<sup>2</sup> \* K (Gonzales Marroquin, 1998), para nuestros cálculos consideraremos  $h_e = 11 \text{ W/m}^2 * K$  (Huaraz Choi, 2013).

Las resistencias térmicas se calculan con las siguientes expresiones:

$$R_{EI} = \frac{\ln(R_{ei}/R_{ii})}{2 * \pi * K_{304EI} * H} = \frac{\ln(0.22/0.218)}{2 * \pi * 25.4 * 0.891} = 0.0000642K/W$$

$$R_{MFC} = \frac{\ln(R_{ie}/R_{ei})}{2 * \pi * K_{mfc} * H} = \frac{\ln(0.2382/0.22)}{2 * \pi * 0.19 * 0.891} = 0.0747K/W$$

$$R_{CE} = \frac{\ln(R_{ee}/R_{ie})}{2 * \pi * K_{304CE} * H} = \frac{\ln(0.2402/0.2382)}{2 * \pi * 14.9 * 0.891} = 0.00010024K/W$$

$$R_{CA} = \frac{1}{2 * \pi * h_e * R_{ee} * H} = \frac{1}{2 * \pi * 11 * 0.2402 * 0.891} = 0.0676K/W$$

$$\dot{Q}_{cc} = \frac{T_i - T_e}{R_{EI} + R_{MFC} + R_{CE} + R_{CA}} = \frac{873.15 - 298.15}{0.0000642 + 0.0747 + 0.00010 + 0.0676} = 4035.265W$$





Donde:

$R_{EI}$ : resistencia térmica de la envoltura interna ( $K/W$ )

$R_{MFC}$ : resistencia térmica del aislante ( $K/W$ )

$R_{CE}$ : resistencia térmica de la cubierta exterior ( $K/W$ )

$R_{CA}$ : resistencia convectiva del aire ( $K/W$ )

$H$ : altura del gasificador ( $m$ )

$\dot{Q}_{cc}$ : calor por conducción y convección ( $W$ )

El calor total transferido será:

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_r + \dot{Q}_{cc} = 3619.887W + 4035.265W = 7655.152W$$

El cálculo anterior se realizó para un espesor de manta de fibra cerámica de 18.2mm, además para espesores de envoltura interna y cubierta exterior es de 2mm. Para estas condiciones, ahora debemos verificar que la temperatura en la superficie externa de la cubierta exterior sea la adecuada, es decir, que no sea una temperatura que pueda causar quemadura al contacto.

$$\dot{Q}_t = \frac{T_i - T_{se}}{R_{EI} + R_{MFC} + R_{CE}}$$

$$T_{se} = 873.15 - 7655.152 * 0.0749 = 299.863K = 26.713^\circ C$$

Los cálculos anteriores se realizaron suponiendo que todo el calor generado por la radiación del dióxido de carbono fluiría en el sentido radial del gasificador, sin embargo, este calor también fluiría en el sentido axial (bases del gasificador). Esto implica que la temperatura en la superficie externa de la cubierta exterior será aún menor.





### 6.1.3.2 Transferencia de calor en sentido axial del gasificador (bases del gasificador).

Realizaremos el análisis en la base inferior del gasificador. Según la tabla 51, para la base en análisis consideraremos cilindro circular semiinfinito (radiación a la base), de ello  $L = L_e = 0.65D$ , entonces:

$$P_{CO_2} * L = 0.115atm * 0.65 * 1.4304pies = 0.1069pies * atm$$

Con este valor y con la temperatura de 873.15K determinamos la emisividad en la figura 57  $\epsilon_g = 0.08$ , entonces:

$$q_r = 0.08 * 5.67 * 10^{-8} * 873.15^4 = 2636.504 W/m^2$$

El calor por radiación será:

$$\dot{Q}_r = 2636.504 W/m^2 * \left(\frac{\pi * 0.436^2}{4}\right)m^2 = 393.633W$$

Ahora debemos calcular la transferencia de calor por conducción y convección por la base, a partir de las siguientes expresiones:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.436^2}{4} = 0.149m^2$$

$$R_{TI} = \frac{E_{EI}}{K_{304EI} * A} = \frac{0.002}{25.4 * 0.149} = 0.000527K/W$$

$$R_{MFC} = \frac{E_{MFC}}{K_{mfc} * A} = \frac{0.0193}{0.19 * 0.149} = 0.680K/W$$

$$R_{TE} = \frac{E_{CE}}{K_{304CE} * A} = \frac{0.002}{14.9 * 0.149} = 0.000899K/W$$

$$R_{CA} = \frac{1}{h_e * A} = \frac{1}{11 * 0.149} = 0.609K/W$$

$$\dot{Q}_{cc} = \frac{T_i - T_e}{R_{EI} + R_{MFC} + R_{CE} + R_{CA}} = \frac{873.15 - 298.15}{0.000527 + 0.680 + 0.000899 + 0.609} = 445.499W$$





Donde:

$R_{TI}$ : resistencia térmica en la tapa interior ( $K/W$ )

$R_{MFC}$ : resistencia térmica del aislante ( $K/W$ )

$R_{TE}$ : resistencia térmica en la tapa exterior ( $K/W$ )

$R_{CA}$ : resistencia convectiva del aire ( $K/W$ )

$A$ : área de la base del gasificador ( $m^2$ )

$\dot{Q}_{cc}$ : calor por conducción y convección ( $W$ )

El calor total será:

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_r + \dot{Q}_{cc} = 393.633W + 445.499W = 839.132W$$

Los cálculos anteriores se realizaron para espesores de: tapa interior 2mm, aislante térmico 19.3mm y tapa exterior 2mm. De forma similar que, en transferencia radial, debemos verificar que la temperatura en la cara externa de la tapa exterior sea la adecuada al contacto.

$$\dot{Q}_t = \frac{T_i - T_{se}}{R_{TI} + R_{MFC} + R_{TE}}$$

$$T_{se} = 873.15 - 839.132 * 0.682 = 301.039K = 27.889^\circ C$$

Los cálculos anteriores se realizaron suponiendo que todo el calor generado por la radiación del dióxido de carbono fluiría en el sentido axial por la base inferior del gasificador, sin embargo, este calor también fluiría en el sentido radial, así como por la base superior del gasificador, esto implica que la temperatura en la superficie externa en la tapa externa será aún menor.

El diseño completo del gasificador se muestra en el plano PDG-002 adjunto a este trabajo de investigación.





## 6.2 Diseño Térmico para el Intercambiador de Calor

El intercambiador de calor tiene la función de transferir calor desde un fluido caliente hasta otro frío. El sistema del intercambiador planteado para nuestro trabajo de investigación es del tipo coraza y tubos, cuya función será la de recuperar calor, donde el fluido caliente será el gas pobre y el fluido frío aire en condiciones normales. El aire frío será calentada con la finalidad de ser empleada en el secado de los granos de café, este proceso se realiza en la maquina secadora.

Las características del intercambiador de calor a diseñar se resumen en la tabla 52.

**Tabla 52**

*Características del intercambiador de calor a diseñar*

<b>Característica del intercambiador</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de intercambiador de calor	Tubos y coraza.
Descripción de flujo	Modo de operación de contraflujo cruzado, mezclado del lado de la coraza y sin mezclar del lado de los tubos. Con el fluido caliente del lado de los tubos y el fluido frío del lado de la coraza.
Numero de pasos	2 pasos en los tubos y 1 paso en la coraza

Fuente: elaboración propia

El intercambiador a diseñar tiene la siguiente configuración:



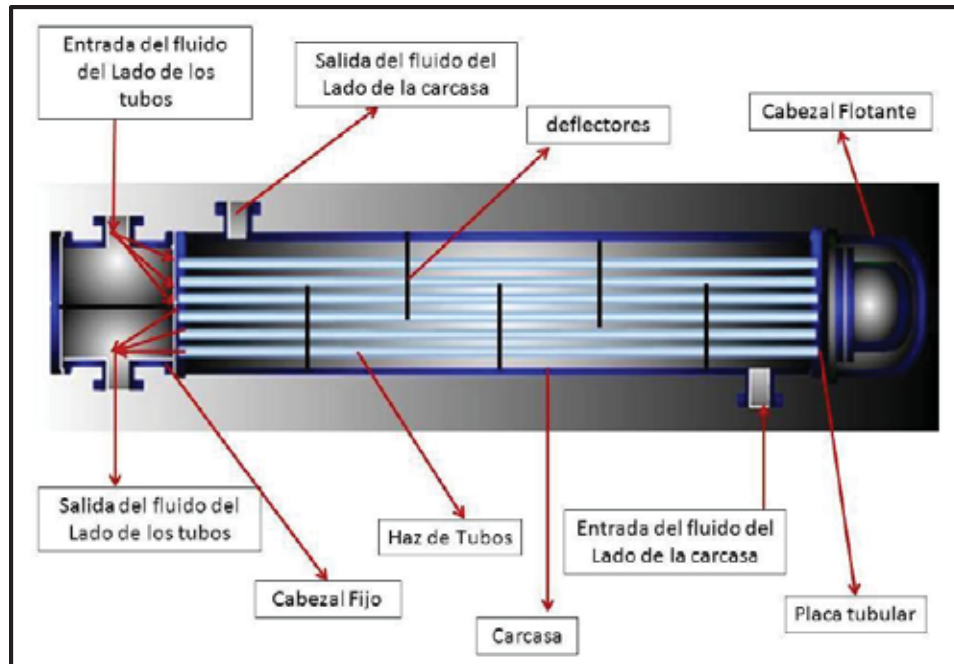


Figura 58. Partes de un intercambiador tubos y coraza. Nota: extraído de (Cabanzón Labat, 2018, pág. 17)

## 6.2.1 Normativa aplicable al diseño de intercambiadores de calor.

### 5.4.1.1 Diseño térmico y mecánico.

- ✓ Heat Exchanger Design Handbook (HEDH).

### 5.4.1.2 Diseño mecánico.

- ✓ Normas ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos). Sección VIII (recipientes a presión).
- ✓ Recomendaciones TEMA (Tubular Exchanger Manufacturer Association).

Para un diseño completo y detallado de los intercambiadores de calor se deben considerar todas estas normativas. En nuestro trabajo de tesis nos centraremos en el diseño térmico del intercambiador, para ello consideraremos todos los requerimientos y recomendaciones necesarias. El diseño mecánico detallado será propiedad de la empresa consultada para su cotización de este



equipo. Se debe aclarar que el equipo debe diseñarse para operar bajo las condiciones térmicas calculadas en este proyecto de tesis.

### 6.2.2 Calculo del calor especifico del gas pobre.

Para calcular el calor especifico del gas pobre, determinamos el calor especifico molar de cada componente del gas, a partir de las ecuaciones mostradas en la tabla 50. Los cálculos del calor especifico molar se realizarán para una temperatura promedio de  $457.529\text{K}=184.379^\circ\text{C}$ . Para determinar en calor especifico de cada componente en unidades de  $\text{KJ}/\text{Kg} * \text{K}$  dividiremos el calor especifico molar entre el peso molecular respectivo.

**Tabla 53**

*Calor especifico de cada componente del gas pobre en unidades de  $\text{KJ}/\text{Kg} * \text{K}$*

Componente del gas	Calor especifico molar ( $\text{KJ}/\text{Kmol} * \text{K}$ )	Peso molecular ( $\text{Kg}/\text{Kmol}$ )	Calor especifico $c_p$ ( $\text{KJ}/\text{Kg} * \text{K}$ )
CO	29.83807546	28	1.06564555
CO <sub>2</sub>	43.00753193	44	0.97744391
CH <sub>4</sub>	44.47518018	16	2.77969876
H <sub>2</sub>	28.98517969	2	14.4925898
N <sub>2</sub>	29.59847264	28	1.05708831

Para determinar el calor especifico del gas pobre se tiene que (Huaraz Choi, 2013):

$$c_{ph} = \sum_{i=1}^n x_i * c_{pi}$$

Donde:

$c_{ph}$ : calor especifico de la mezcla a presión constante

$x_i$ : fracción molar del componente i

$c_{pi}$ : calor especifico del componente i a presión constante

$n$ : número total de componentes en la mezcla





**Tabla 54**

*Calor específico del gas pobre*

Componente del gas	% Molar	Calor específico $c_p$ (KJ/Kg * K)	Calor específico del componente $c_{pi}$ (KJ/Kg * K)
CO	19.14	1.06564555	0.20396456
CO <sub>2</sub>	11.49	0.97744391	0.1123083
CH <sub>4</sub>	1.28	2.77969876	0.03558014
H <sub>2</sub>	22.77	14.4925898	3.29996271
N <sub>2</sub>	45.33	1.05708831	0.47917813
<b>Calor específico de la mezcla (<math>c_{ph}</math>) en unidades de (KJ/Kg * K)</b>			<b>4.13099385</b>

### 6.2.3 Condiciones térmicas de intercambio de calor (gas pobre-aire).

Las condiciones térmicas del fluido caliente (gas pobre) a la entrada y salida del intercambiador serán:







**Tabla 55**

*Datos y propiedades del fluido caliente (gas pobre)*

Datos	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura de entrada	$T_{h,i}$	338.758	$^{\circ}C$	Ítem 6.1.2
Temperatura de salida	$T_{h,o}$	30	$^{\circ}C$	(Aristizabal Alvarez & Valencia Naranjo, 2015, pág. 49)
Temperatura promedio	$\bar{T}_h$	184.379	$^{\circ}C$	---
Flujo másico	$\dot{m}_h$	0.004554512	$Kg/s$	Tabla 31
Densidad	$\rho_h$	0.63	$Kg/m^3$	Figura 43
Calor específico	$c_{ph}$	4.13099385	$KJ/Kg * K$	Tabla 54
Viscosidad dinámica	$\mu_h$	$215 * 10^{-7}$	$Kg/m * s$	Figura 43
Viscosidad cinemática	$\nu_h$	$3.265 * 10^{-5}$	$m^2/s$	(*)
Conductividad térmica	$k_h$	0.03675	$W/mK$	(*)
Numero de prandtl	$Pr_h$	0.6988	---	(*)

Nota: para todos los (\*) se supone que las propiedades del gas pobre serán iguales a la del aire. Las propiedades fueron evaluados a la temperatura promedio de 184.379°C.

En el secado de granos de café.

Hay que tener en cuenta que los granos son seres vivos y la temperatura se secado podría afectarles notablemente, sobre todo si se trata de altas temperaturas. En este caso, se puede provocar daños irreversibles como el llamado springer. Las altas temperaturas dañan el embrión y el grano muere. Se distingue por la aparición de un punto negro en el embrión y el grano empieza a adquirir un color grisáceo. Esto ocurre cuando se trabaja con temperaturas superiores a los 65°C en el oreado y el presecado, y temperaturas superiores a los 60°C, en el secado. (Besora Magem, pág. 9)





De la referencia anterior, elegimos la temperatura de 55°C para el aire a la salida del intercambiador de calor, de forma que no ocasionara problemas durante el secado de los granos del café.

Las condiciones térmicas del fluido frío (aire) a la entrada y salida del intercambiador serán:

**Tabla 56**  
*Datos y propiedades del fluido frío (aire)*

Datos	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia
Temperatura de entrada	$T_{c,i}$	25	°C	---
Temperatura de salida	$T_{c,o}$	55	°C	---
Temperatura promedio	$\bar{T}_c$	40	°C	(*)
Densidad	$\rho_c$	1.127	$Kg/m^3$	(*)
Calor específico	$c_{pc}$	1.007	$KJ/Kg * K$	(*)
Viscosidad dinámica	$\mu_c$	$1.918 * 10^{-5}$	$Kg/m * s$	(*)
Viscosidad cinemática	$\nu_c$	$1.702 * 10^{-5}$	$m^2/s$	(*)
Conductividad térmica	$k_c$	0.02662	$W/mK$	(*)
Numero de prandtl	$Pr_c$	0.7255	---	(*)

Nota: los (\*) fueron extraídos de (Cengel & Ghajar, 2011, pág. 884), para una temperatura promedio de 40°C.

#### 6.2.4 Balance global de energía en el intercambiador de calor.

El intercambio de calor que se requiere puede obtenerse a partir del balance global de energía en el intercambiador, para el fluido caliente se considera un 10% de pérdidas de energía hacia los alrededores, por lo cual la ecuación será:

$$0.9 * \dot{m}_h * c_{ph} * (T_{h,i} - T_{h,o}) = \dot{m}_c * c_{pc} * (T_{c,o} - T_{c,i})$$

Se conocen todas las variables del fluido caliente, de ello el calor que se debe transferir desde el fluido caliente hacia el frío por unidad de tiempo, además considerando el 10% de perdidas será:

$$Q_i = 0.9 * 0.004554512 \left( \frac{Kg}{s} \right) * 4.13099385 \left( \frac{KJ}{Kg * K} \right) * (338.758 - 30)^\circ C$$





$$Q_i = 5.22825941KW = 5228.25941W$$

Además de la ecuación del balance global de energía en el intercambiador, se puede calcular el flujo másico del fluido frío (aire):

$$\dot{m}_c = \frac{Q_i}{c_{pc} * (T_{c,o} - T_{c,i})} = \frac{5.22825941KW}{1.007 \left( \frac{KJ}{KgK} \right) * (55 - 25)^\circ C} = 0.17306387Kg/s$$

### 6.2.5 Coeficiente de transferencia de calor por convección del lado de tubos (fluido caliente).

Los datos y parámetros necesarios para determinar coeficiente de transferencia de calor por convección del lado de los tubos son:

**Tabla 57**

*Datos para cálculo del coeficiente convectivo del lado de los tubos*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro interior	$D_{it}$	13.8	mm
Diámetro exterior	$D_{ot}$	17.1	mm
Material	Acero inoxidable	---	---
Numero de tubos	$N_t$	103	---
Pasos de coraza	$n_c$	1	---
Pasos de tubos	$n_t$	2	---

Nota: según la ASME B36.19 la dimensión de la tubería seleccionada es: 3/8 in (NPS) o 10 (DN) de SCH 10S. Para la selección de los parámetros anteriores se realizaron cálculos preliminares e iterativos.

El flujo másico por un tubo será:

$$\dot{m}_{h1} = \frac{\dot{m}_h}{N_t} = \frac{0.004554512Kg/s}{103} = 0.0000442186Kg/s$$

El área interna del tubo es:

$$A_{it} = \frac{\pi D_{it}^2}{4} = \frac{\pi * 0.0138^2}{4} = 1.49571 * 10^{-4}m^2$$





La velocidad media del fluido por el interior de los tubos, se determina con la siguiente ecuación (Cabanzón Labat, 2018, pág. 29):

$$V_t = \frac{\dot{m}_{h1}}{A_{it} * \rho_h} = \frac{0.0000442186 \text{Kg/s}}{1.49571 * 10^{-4} \text{m}^2 * 0.63 \text{Kg/m}^3} = 0.469263 \text{m/s}$$

Con los datos anteriores determinamos el número de Reynolds (Incropera & Dewitt, 1999):

$$Re_D = \frac{V_t * D_{it}}{\nu_h} = \frac{0.469263 \text{m/s} * 0.0138 \text{m}}{3.265 * 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}} = 198.340737$$

Como el flujo es laminar, determinamos el coeficiente convectivo promedio al interior de los tubos con la siguiente ecuación (Incropera & Dewitt, 1999, pág. 440):

$$\bar{h}_i = \frac{48}{11} \left( \frac{k_h}{D_{it}} \right) = \frac{48}{11} \left( \frac{0.03675 \text{W/mK}}{0.0138 \text{m}} \right) = 11.620553 \text{W/m}^2 \text{K}$$

### 6.2.6 Coeficiente de transferencia de calor por convección del lado de la coraza (fluido frío).

Los datos y parámetros necesarios para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección del lado de la coraza son:

**Tabla 58**

*Datos para cálculo del coeficiente convectivo del lado de la coraza*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro interior	$D_{ic}$	549.44	mm
Diámetro exterior	$D_{oc}$	599	mm
Material	Acero inoxidable	---	---

Nota: según la ASME B36.19 la dimensión de la tubería seleccionada es: 22 in (NPS) o 550 (DN) de SCH 5S.

Calculamos la superficie disponible para el paso del aire por la coraza con la siguiente relación:

$$A_{idc} = \frac{\pi D_{ic}^2}{4} - N_t * n_t * \frac{\pi D_{ot}^2}{4}$$

$$A_{idc} = 0.189790 \text{m}^2$$





Determinamos la velocidad media del fluido con la siguiente relación:

$$V_c = \frac{\dot{m}_c}{A_{idc} * \rho_c} = \frac{0.17306387 \text{ Kg/s}}{0.189790 \text{ m}^2 * 1.127 \text{ Kg/m}^3} = 0.809114 \text{ m/s}$$

Con los datos anteriores determinamos el número de Reynolds (Incropera & Dewitt, 1999):

$$Re_D = \frac{V_c * D_{ot}}{\nu_c} = \frac{0.809114 \text{ m/s} * 0.0171 \text{ m}}{1.702 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 812.917022$$

Del cálculo anterior resulta flujo laminar.

Ahora debemos determinar el número de Nusselt en las condiciones promedio globales. Empleamos la correlación empírica de Hilpert (Incropera & Dewitt, 1999), usamos la correlación de Hilpert debido a la convección forzada por el exterior de un tubo y además por el flujo normal del gas pobre sobre el cilindro circular (tubo):

$$\overline{Nu}_D = C Re_D^m Pr^{1/3}$$

Donde C y m se selecciona del siguiente cuadro:

**Tabla 59**  
*Constantes para cilindro circular en flujo cruzado*

$Re_D$	C	m
0.4-4	0.989	0.330
4-40	0.911	0.385
40-4000	0.683	0.466
4000-40000	0.193	0.618
40000-400000	0.027	0.805

Nota: extraído de (Incropera & Dewitt, 1999, pág. 370).

Reemplazando en la correlación de Hilpert, tenemos que:

$$\overline{Nu}_D = 0.683 * 812.917022^{0.466} * 0.7255^{\frac{1}{3}} = 13.933109$$





Calculamos el coeficiente convectivo promedio al exterior de los tubos con la siguiente expresión:

$$\bar{h}_o = \frac{\overline{Nu}_D * k_c}{D_{ot}} = \frac{13.933109 * 0.02662W/mK}{0.0171m} = 21.690022W/m^2K$$

El coeficiente convectivo promedio al exterior de los tubos ( $\bar{h}_o$ ), fue calculado considerando que el intercambiador no tiene deflectores.

### 6.2.7 Calculo de la longitud de tubos.

Conocido los coeficientes de transferencia de calor por convección interna y externa de los tubos, procedemos a calcular la longitud de intercambio, para ello se realizan los siguientes análisis.

El coeficiente global de transferencia de calor se relaciona con la resistencia térmica total, como indica la siguiente relación (Incropera & Dewitt, 1999, pág. 78):

$$UA = \frac{1}{R_{tot}}$$

Además, se puede obtener otra expresión útil al relacionar la transferencia total de calor con la diferencia de temperatura media logarítmica, esto para llevar a cabo el análisis de intercambiadores de calor. Esta expresión está dada por (Incropera & Dewitt, 1999, pág. 588):

$$UA = \frac{Q_i}{\Delta T_{ml}}$$

De ello:

$$\frac{Q_i}{\Delta T_{ml}} = \frac{1}{R_{tot}}$$

Donde:

$Q_i$ : transferencia de calor en el intercambiador

$R_{tot}$ : resistencia térmica total en el intercambiador



$\Delta T_{ml}$ : diferencia de temperaturas media logarítmica

La diferencia de temperaturas media logarítmica se determina con la siguiente relación (Incropera & Dewitt, 1999):

$$\Delta T_{ml} = F \Delta T_{ml,CF}$$

De la ecuación anterior, F es un factor de corrección que se determina de la siguiente gráfica:

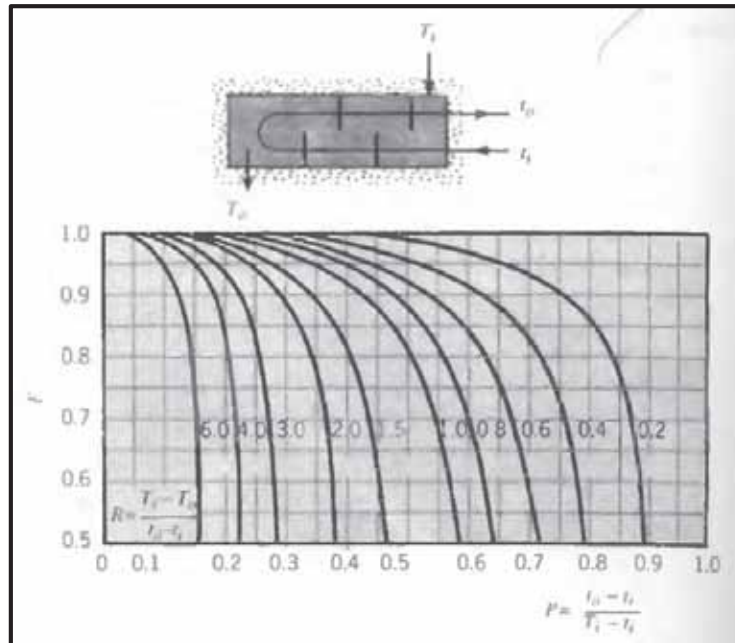


Figura 59. Factor de corrección para intercambiador de calor de coraza y tubo con una coraza y cualquier múltiplo de dos pasos de tubo (2,4, etc., paso de tubo). Fuente: (Incropera & Dewitt, 1999)

Calculamos R y P, con las siguientes relaciones:

$$R = \frac{T_i - T_o}{t_o - t_i} = \frac{T_{c,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{h,i}} = \frac{25 - 55}{30 - 338.758} = 0.097 \cong 0$$

$$P = \frac{t_o - t_i}{T_i - T_o} = \frac{T_{h,o} - T_{h,i}}{T_{c,i} - T_{h,i}} = \frac{30 - 338.758}{25 - 338.758} = 0.98$$

“(…), si el cambio de temperatura de un fluido es despreciable, P o R es cero y F es 1” (Incropera & Dewitt, 1999, pág. 592). Entonces el factor de corrección F será 1.

El término  $\Delta T_{ml,CF}$  se determina con la siguiente relación (Incropera & Dewitt, 1999, pág. 590):



$$\Delta T_{ml,CF} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} = \frac{5K - 283.758K}{\ln(5K/283.758K)} = 69.02199092K$$

Donde:

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} = 338.758^\circ C - 55^\circ C = 283.758^\circ C (283.758K)$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i} = 30^\circ C - 25^\circ C = 5^\circ C (5K)$$

Entonces  $\Delta T_{ml}$  será:

$$\Delta T_{ml} = 1 * 69.02199092K = 69.02199092K$$

Ahora calculamos la resistencia térmica total en el intercambiador de calor, considerando que la resistencia térmica por conducción en los tubos y la resistencia térmica debida a las incrustaciones para una unidad de área superficial son insignificantes.

$$R_{tot} = \frac{1}{\bar{h}_i n_t N_t \pi D_{it} L} + \frac{1}{\bar{h}_o n_t N_t \pi D_{ot} L}$$

Reemplazando valores en la ecuación antes mencionada, determinamos la longitud del tubo, mediante la siguiente expresión:

$$\frac{Q_i}{\Delta T_{ml}} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{h}_i n_t N_t \pi D_{it} L} + \frac{1}{\bar{h}_o n_t N_t \pi D_{ot} L}}$$

Entonces la longitud de tubos será:

$$L = 1.045m$$

Como se precisó en el ítem 5.4.6 la longitud calculada ( $L = 1.045m$ ) es considerando que el intercambiador diseñado no posee deflectores. Los deflectores son discos de metal perforados atravesados por los tubos, se colocan a lo largo del intercambiador y se utilizan para cambiar el sentido de flujo de las corrientes y así aumentar la velocidad y turbulencia del fluido del lado de la carcasa, aumentando la eficiencia del proceso (Montiel Prieto, 2017).







Tomaremos como referencia la longitud calculada y realizaremos cálculos iterativos hasta encontrar una longitud adecuada de tubos y un número adecuado de deflectores para el diseño de nuestro intercambiador de calor. De acuerdo al TEMA la separación mínima entre dos deflectores adyacentes debe ser de 1/5 del diámetro interno de la carcasa o dos pulgadas, cualquiera que sea mayor, normalmente la separación óptima entre deflectores adyacentes es del 30%-60% del valor del diámetro interno de la carcasa (Montiel Prieto, 2017).

Considerando una longitud de tubos de 0.898m y un total de 4 deflectores, recalculamos bajo estas condiciones el coeficiente convectivo promedio al exterior de los tubos, la cual debe ser mayor que la calculada anteriormente.

Calculamos la superficie para el paso del aire por la coraza con la siguiente relación:

$$A_{dc} = \frac{D_{ic} * L}{5} = \frac{0.54944m * 0.898m}{5} = 0.098679m^2$$

Determinamos la velocidad media del fluido con la siguiente relación:

$$V_c = \frac{\dot{m}_c}{A_{dc} * \rho_c} = \frac{0.17306387Kg/s}{0.098679m^2 * 1.127Kg/m^3} = 1.556166m/s$$

Con los datos anteriores determinamos el número de Reynolds (Incropera & Dewitt, 1999):

$$Re_D = \frac{V_c * D_{ot}}{\nu_c} = \frac{1.556166m/s * 0.0171m}{1.702 * 10^{-5}m^2/s} = 1563.480378$$

Del calculo anterior el flujo es laminar.

Determinamos el número de Nusselt, a partir de la correlación de Zhukauskas (Incropera & Dewitt, 1999, pág. 380):

$$\overline{Nu}_D = C Re_{D,max}^m Pr^{0.6} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4}$$

$$\left[ \begin{array}{l} N_L \geq 20 \\ 0.7 < Pr < 500 \\ 1000 < Re_{D,max} < 2 * 10^6 \end{array} \right]$$





Donde:

$Pr$ : Prandtl a temperatura promedio del fluido frío ( $Pr = 0.7255$ )

$Pr_s$ : Prandtl a temperatura en la superficie del tubo

$N_L$ : número de líneas (en el intercambiador diseñado el número de líneas es de 100)

Las constantes C y m se determinan de la tabla de la figura 60.

Configuración	$Re_{D, \max}$	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 (aislado)	
Escalonado	$10^2 - 10^3$		
Alineado	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.27	0.63
( $S_T/S_L > 0.7$ ) <sup>a</sup>			
Escalonado	$10^3 - 2 \times 10^5$	$0.35(S_T/S_L)^{1/5}$	0.60
( $S_T/S_L < 2$ )			
Escalonado	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.40	0.60
( $S_T/S_L > 2$ )			
Alineado	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.021	0.84
Escalonado	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.022	0.84

<sup>a</sup>Para  $S_T/S_L < 0.7$ , la transferencia de calor es ineficiente y los tubos alineados no se deben usar

Figura 60. Constantes C y m para el banco de tubos en flujo cruzado.

De la figura 63, el espaciamiento transversal es  $S_T = 37.62$  y el espaciamiento lineal es  $S_L = 24.97$ . La relación  $S_T/S_L = 1.51$ , además  $Re_{D, \max} = 1563.480378$ , con ello se determina C y m de la tabla de la figura 60:

$$C = 0.35(S_T/S_L)^{1/5} = 0.38$$

$$m = 0.60$$





Para determinar  $Pr_s$  se considera que la temperatura en la superficie del tubo será la correspondiente al promedio del fluido caliente (gas pobre), de la tabla 55  $Pr_s = 0.6988$  a temperatura promedio de  $184.379\text{ }^\circ\text{C}$ .

Entonces:

$$\overline{Nu}_D = 0.38 * 1563.480378^{0.60} * 0.7255^{0.6} \left( \frac{0.7255}{0.6988} \right)^{1/4}$$

$$\overline{Nu}_D = 26.096192$$

Calculamos el coeficiente convectivo promedio al exterior de los tubos con la siguiente expresión:

$$\bar{h}_o = \frac{\overline{Nu}_D * k_c}{D_{ot}} = \frac{26.096192 * 0.02662\text{W/mK}}{0.0171\text{m}} = 40.624598\text{W/m}^2\text{K}$$

Reemplazamos los valores calculados en la siguiente relación.

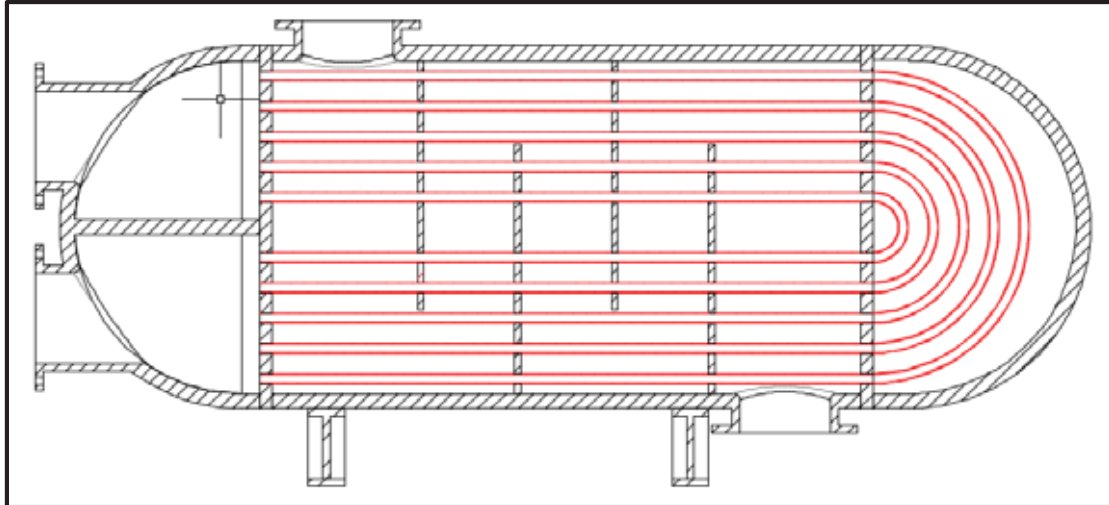
$$\frac{Q_i}{\Delta T_{ml}} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{h}_i n_t N_t \pi D_{it} L} + \frac{1}{\bar{h}_o n_t N_t \pi D_{ot} L}}$$

$$\frac{5228.25941}{69.0219909} = \frac{1}{\frac{1}{11.62055 * 2 * 104\pi * 0.0138 * 0.96} + \frac{1}{40.6245 * 2 * 104\pi * 0.0171 * 0.96}}$$

$$75.747\text{W/K} \cong 75.717\text{W/K}$$

Del cálculo anterior concluimos que intercambiador a diseñar tendrá una longitud de tubos de  $0.898\text{m}$  y 4 deflectores. La configuración del intercambiador al interior será:





**Figura 61. Configuración del intercambiador de calor.** Fuente: elaboración propia

### 6.2.8 Caída de presión del lado de los tubos.

La caída de presión es necesaria para sostener el flujo interno de gas puesto que este parámetro determina el requerimiento de potencia del ventilador. Se debe a la resistencia que ofrecen los tubos al flujo y al cambio de dirección, por lo que evaluamos la caída de presión como la suma de ambos efectos. Consideraremos que la caída de presión debido al cambio de dirección del fluido es 4 veces el cabezal de velocidad por el número de pasos. O sea, ambos efectos se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\Delta P_t = f \frac{L}{D_{it}} \frac{\rho_h V_t^2}{2} + n_t * 4 * \frac{\rho_h V_t^2}{2}$$

Donde  $f$  es el factor de fricción y  $L$  representa la longitud total de la trayectoria del fluido. Las propiedades del gas se evalúan a la temperatura promedio de  $184.379^\circ\text{C}$ , como se muestra en la tabla 55.

El número de Reynolds para el flujo del gas se calculó en el ítem 6.2.5 y resulta  $Re_D = 198.340737$ , como el flujo es laminar, entonces el factor de fricción  $f$  se determina con la siguiente ecuación (Incropera & Dewitt, 1999):



$$f = \frac{64}{Re_D} = \frac{64}{198.340737} = 0.323$$

Entonces:

$$\Delta P_t = 0.323 \frac{1.796}{0.0138} \frac{0.63 * 0.469263^2}{2} + 2 * 4 * \frac{0.63 * 0.469263^2}{2} = 3.468pa$$

La pérdida calculada corresponde a un solo tubo (paso 1 y paso 2). La pérdida total por los 103 tubos será:

$$\Delta P_{t103} = 103 * 3.468pa = 357.194pa$$

### 6.2.9 Caída de presión del lado de la coraza.

Para determinar la caída de presión asociado con el flujo a través de un banco de tubos, se puede utilizar la siguiente relación (Incropera & Dewitt, 1999):

$$\Delta P_{ci} = N_L \chi \left( \frac{\rho_c * V_{max}^2}{2} \right) f$$

Las propiedades del aire se evalúan a la temperatura promedio de 40°C, como se muestra en la tabla 56. En la figura 62 se muestra el arreglo de tubos en un banco (escalonado).

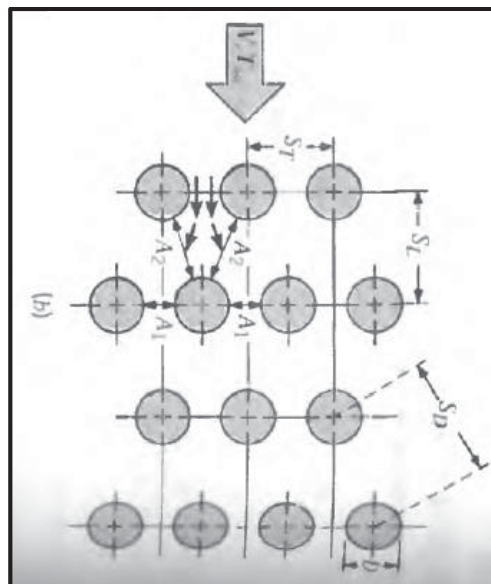
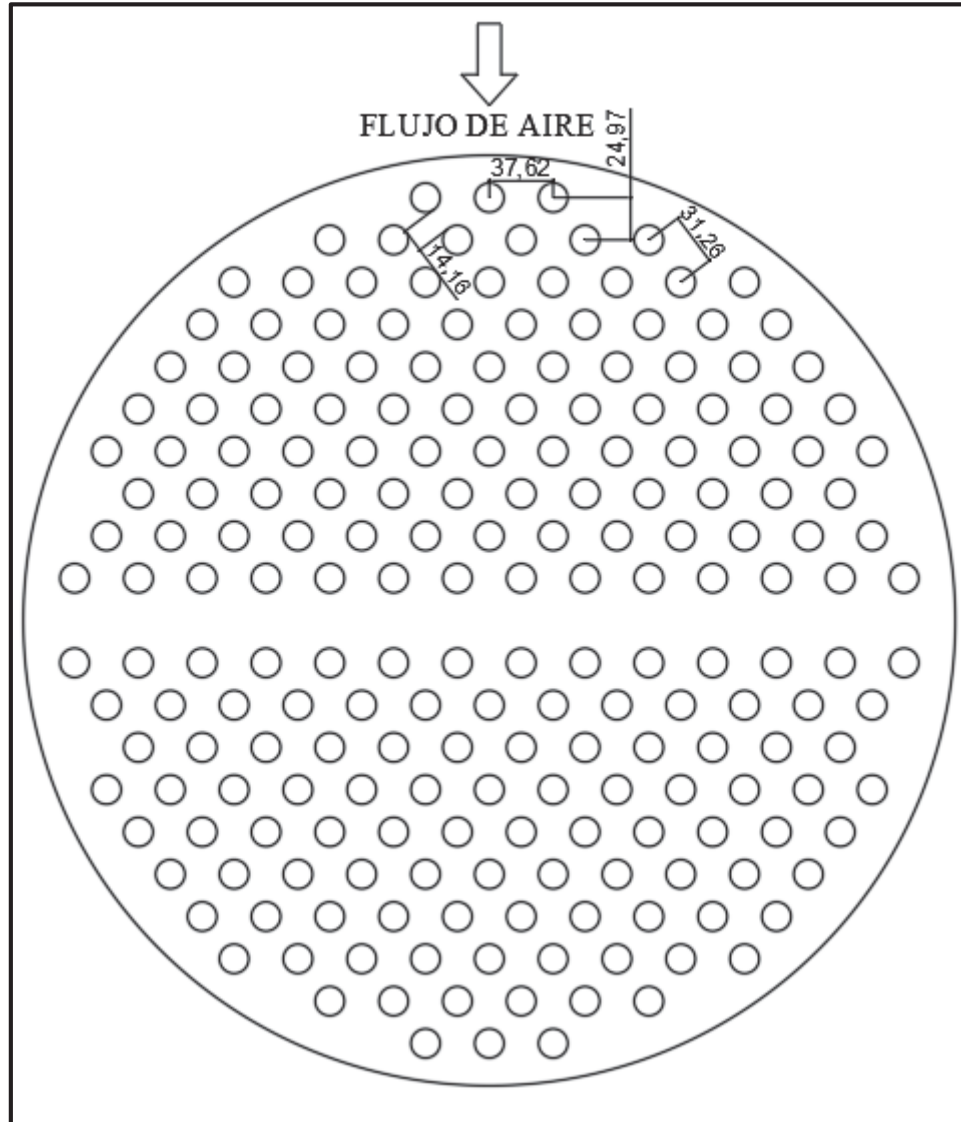


Figura 62. Arreglos de tubos en un banco (escalonados). Fuente: (Incropera & Dewitt, 1999)



La configuración del arreglo de tubos para nuestro intercambiador es:



**Figura 63. Configuración del arreglo de tubos para el intercambiador de nuestro trabajo de tesis.** Nota: unidades en milímetros

Para la configuración escalonada, la velocidad máxima ocurre en el plano transversal  $A_2$  si las filas están espaciadas de modo que (Incropera & Dewitt, 1999):

$$2(S_D - D) < (S_T - D)$$
$$2(31.26 - 17.1) < (37.62 - 17.1)$$
$$28.32 < 20.52$$



La relación anterior no cumple, entonces la velocidad máxima ocurre en el plano transversal  $A_1$ . En cuyo caso la velocidad máxima está dada por (Incropera & Dewitt, 1999):

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V_c$$

$$V_{max} = \frac{37.62}{37.62 - 17.1} * 1.556166m/s = 2.852971m/s$$

Entonces el número de Reynolds será:

$$Re_{D,max} = \frac{V_{max} * D_{ot}}{\nu_c} = \frac{2.852971m/s * 0.0171m}{1.702 * 10^{-5}m^2/s} = 2866.381$$

El factor de fricción  $f$  y el factor de correlación  $\chi$  se presentan de forma gráfica en la figura 64, se aplica a un arreglo escalonado de tubos en la forma de un triángulo equilátero ( $S_T = S_D$ ), y el factor de corrección permite la extensión de los resultados a otros arreglos escalonados.

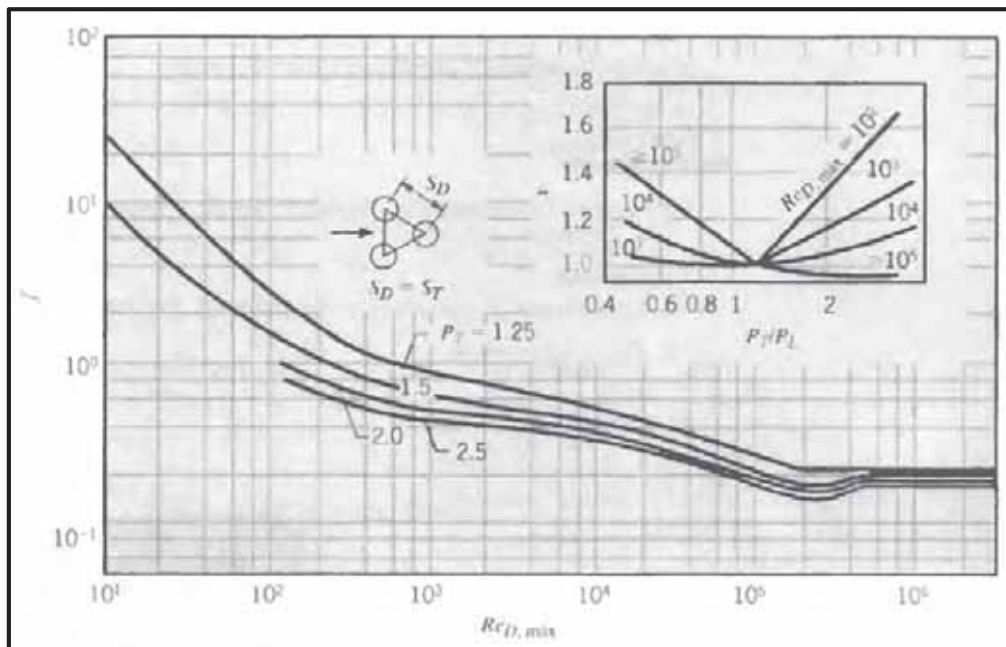


Figura 64. Factor de fricción  $f$  y el factor de correlación  $\chi$ . Arreglo de haces de tubos escalonados. Fuente: (Incropera & Dewitt, 1999)





Donde:

$$P_L \equiv \frac{S_L}{D} = \frac{24.97}{17.1} = 1.46$$

$$P_T \equiv \frac{S_T}{D} = \frac{37.62}{17.1} = 2.2$$

$$\frac{P_T}{P_L} = \frac{2.04}{1.30} = 1.51$$

Entonces:

$$\Delta P_{ci} = 100 * 1.07 \left( \frac{1.127 \text{Kg/m}^3 * (2.852971 \text{m/s})^2}{2} \right) 0.7 = 343.535 \text{pa}$$







## CAPITULO VII

### Especificaciones Técnicas

En el presente capítulo se presenta las especificaciones técnicas de equipos y combustible empleado en el presente proyecto de tesis.

#### 7.1 Especificación Técnica Tolva de Gasificador

**Tabla 60**

*Especificaciones técnicas tolva de gasificador*

Especificaciones Técnicas Tolva de Gasificador			
1. Información General			
Ítem	Parámetro	Unidad	Descripción
1.1	Nombre del equipo	...	Tolva de gasificador
1.2	Función	...	Almacenar combustible biomásico
1.3	Cantidad	<i>und</i>	1
1.4	Biomasa de almacenada	...	Pulpa de café
1.5	Tipo de instalación		Vertical
2. Parámetros de Construcción			
Ítem	Parámetro	Unidad	Descripción
2.1	Material	ASTM	A240 C-304L (acero inoxidable)
2.2	Espesor	<i>mm</i>	2
2.3	Dimensiones Generales		
2.3.1	Diámetro mayor	<i>mm</i>	484.4
2.3.2	Diámetro menor	<i>mm</i>	276
2.3.3	Altura	<i>mm</i>	733.4
2.4	Volumen de almacenamiento	<i>m<sup>3</sup></i>	0.16
2.5	Tapa (SI/NO)	...	SI
2.7	Norma de soldadura	...	
2.9	Empaquetadura	...	Garlock style 9800
2.10	Pintura		





2.10.1	Exterior (SI/NO)	...	NO
2.10.2	Interior (SI/NO)	...	NO
2.10.3	Espesor total de película	mm	...
2.11	Verificación dimensional (SI/NO)	...	SI
2.12	Verificación de acabados (SI/NO)	...	SI
2.14	Verificación de materiales (SI/NO)	...	SI
2.15	Inspección con tintes penetrantes (SI/NO)	...	SI
2.16	Pernos de conexión	ASTM	A325

Fuente: elaboración propia

## 7.2 Especificación Técnica Pulpa de Café

**Tabla 61**

*Especificaciones técnicas pulpa de café*

Especificaciones Técnicas de la Pulpa de Café			
1. Información General			
Ítem	Parámetro	Unidad	Descripción
1.1	Tipo de combustible	...	Biomasa solido
1.2	Tipo de biomasa	...	residuo agrícola (pulpa de café)
2. Características			
Ítem	Parámetro	Unidad	Descripción
2.1	Composición química		
2.1.1	Carbono	%	51.33
2.1.2	Hidrogeno	%	6.79
2.1.3	Oxigeno	%	38.65
2.1.4	Nitrógeno	%	3.02
2.1.5	Azufre	%	0.21
2.2	Humedad	%	15
2.3	Cenizas	%	6.58
2.4	Tamaño promedio de partículas	cm	Adecuado para gas. dowdraft





2.6	Densidad real	$Kg/m^3$	958
2.7	Densidad aparente	$Kg/m^3$	124.4
2.8	Poder calorífico superior (PCS)	$Kj/Kg$	21760.215
2.9	Poder calorífico inferior (PCI)	$Kj/Kg$	20718.129

Fuente: elaboración propia

### 7.3 Especificación Técnica Gas Pobre Producido

**Tabla 62**

*Especificaciones técnicas gas pobre producido*

<b>Especificaciones Técnicas del Gas Pobre Producido</b>			
<b>1. Información General</b>			
<b>Ítem</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
1.1	Tipo de combustible	...	Gas
1.2	Tipo de gas	...	Gas pobre
<b>2. Característica</b>			
<b>Ítem</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
2.1	Composición química de gas		
2.1.1	Monóxido de carbono	%	19.14
2.1.2	Dióxido de carbono	%	11.49
2.1.3	Hidrogeno molecular	%	22.77
2.1.4	Metano	%	1.28
2.1.5	Nitrógeno molecular	%	45.33
2.2	Poder calorífico de gas	$Kj/Nm^3$	5332.07
2.3	Temperatura de producción	°C	338.758

Fuente: elaboración propia





## 7.4 Especificación Técnica de Gasificador

**Tabla 63**

*Especificaciones técnicas del gasificador*

<b>Especificaciones Técnicas del Gasificador</b>			
<b>1. Información General</b>			
<b>Ítem</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
1.1	Equipo	...	Gasificador
1.2	Tipo de gasificador	...	Dowdraft
1.3	Agente gasificante	...	Aire
1.4	Tipo de biomasa	...	Residuos agrícolas (pulpa de café)
1.5	Sistema de recarga	...	Manual
1.6	Sistema de encendido	...	Manual
<b>2. Parámetros de Construcción</b>			
<b>Ítem</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
2.1	Norma de diseño	ASME	SECCIÓN VIII, DIVISIÓN 1
2.2	Material	ASTM	A240 C-304L / A240 C-310S (acero inoxidable)
2.3	Espesor	mm	2 / 3
2.4	Dimensiones Generales		
2.4.1	Diámetro	mm	480.4
2.4.2	Altura	mm	1131.24
2.5	Empaquetadura	...	Garlock style 9800
2.6	Pintura		
2.6.1	Exterior (SI/NO)	...	NO
2.6.2	Interior (SI/NO)	...	NO
2.6.3	Espesor total de película	mm	...
2.7	Verificación dimensional (SI/NO)	...	SI
2.8	Verificación de acabados (SI/NO)	...	SI
2.9	Verificación de materiales (SI/NO)	...	SI
2.10	Inspección con tintes penetrantes (SI/NO)	...	SI
2.11	Pernos de conexión	ASTM	A325





### 3. Parámetros de Operación

Ítem	Parámetro	Unidad	Descripción
3.1	Potencia del gasificador	Kw	25
3.2	Flujo másico de biomasa	Kg/h	6.33
3.3	Flujo de gas producido	m <sup>3</sup> /h	16.88
3.4	Eficiencia del gasificador	%	66
3.5	Aire para gasificación	Kg/h	11.42
3.6	Flujo de aire al ingreso	m <sup>3</sup> /h	9.68
3.7	Autonomía de operación	H	2
3.8	Velocidad de aire al ingreso	m/s	22.81
3.9	Flujo de cenizas	Kg/h	0.5
3.10	Temperatura de operación	°C	338.758
3.11	Poder calorífico del gas pobre	Kj/m <sup>3</sup>	5332.07

Fuente: elaboración propia

### 7.5 Especificación Técnica de Ciclón

**Tabla 64**

*Especificaciones técnicas del ciclón*

Especificaciones Técnicas del Ciclón			
1. Información General			
ítem	parámetro	unidad	descripción
1.1	Equipo	...	Ciclón de alta eficiencia
1.2	Tipo de ciclón	...	Stairmand
2. Parámetros de Construcción			
ítem	parámetro	unidad	descripción
2.1	Norma de conexiones de bridas		
2.2	Material	ASTM	A240 C-304L (acero inoxidable)
2.3	Espesor	mm	5
2.4	Dimensiones Generales cuerpo cilíndrico		
2.4.1	Diámetro	mm	83.55
2.4.2	Altura	mm	119.52





2.5	Dimensiones Generales cuerpo cónico		
2.5.1	Diámetro mayor	mm	83.55
2.5.2	Diámetro menor	mm	35.08
2.5.3	Altura	mm	193.88
2.6	Dimensiones depósito de partículas		
2.6.1	Diámetro	mm	232.08
2.6.2	Altura	mm	300
2.7	Empaquetadura	...	Garlock style 9800
2.8	Pintura		
2.8.1	Exterior (SI/NO)	...	NO
2.8.2	Interior (SI/NO)	...	NO
2.8.3	Espesor total de película	mm	...
2.9	Verificación dimensional (SI/NO)	...	SI
2.10	Verificación de acabados (SI/NO)	...	SI
2.11	Verificación de materiales (SI/NO)	...	SI
2.12	Inspección con tintes penetrantes (SI/NO)	...	SI
2.13	Peso	Kg	
2.14	Pernos de conexión		

### 3. Parámetros de Operación

ítem	Parámetro	Unidad	descripción
3.1	Velocidad de ingreso de gas	m/s	16
3.2	Densidad de partículas en gas	$Kg/m^3$	2000
3.3	Densidad de gas pobre	$Kg/m^3$	0.47
3.4	Viscosidad de gas pobre	$Kg/ms$	$260 * 10^{-7}$
3.5	Tamaño de partículas	$Kg/h$	igual o mayor a 5mm
3.6	Eficiencia	%	igual o mayor a 90.9

Fuente: elaboración propia





## 7.6 Especificación Técnica Intercambiador de Calor

**Tabla 65**

*Especificaciones Técnicas Intercambiador de Calor*

<b>Especificaciones Técnicas Intercambiador de Calor</b>			
<b>1. Información General</b>			
<b>Ítem</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
1.1	Equipo	...	Intercambiador de calor
1.2	Tipo	...	Coraza - tubos
1.3	Descripción de flujo	...	Operación en contraflujo cruzado, mezclado por el lado de la coraza y sin mezclar por el lado de tubos. Fluido caliente lado de tubos y fluido frío lado de coraza
1.4	Numero de pasos	...	2 pasos en tubos y 1 paso en coraza
1.5	Posición	...	Horizontal
<b>2. Parámetros de Construcción</b>			
<b>Ítem</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
2.1	Normas de diseño	...	HEDH / ASME / TEMA
<b>3. Parámetros de Operación</b>			
<b>Ítem</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
3.1	Temperatura entrada gas pobre	°C	338.758
3.2	Temperatura salida gas pobre	°C	30
3.3	Flujo másico gas pobre	<i>Kg/s</i>	0.00455
3.4	Temperatura entrada aire	°C	25
3.5	Temperatura salida aire	°C	55
3.6	Flujo másico aire	<i>Kg/s</i>	0.173

Fuente: elaboración propia

Las especificaciones técnicas constructivas no se consideran en la tabla anterior debido a que el diseño mecánico del equipo será de responsabilidad del proveedor.

## 7.7 Especificación Técnica del Generador Eléctrico

Las especificaciones técnicas del generador eléctrico se indica en el ANEXO 1.





## CAPITULO VIII

### Evaluación de Costos

Este capítulo contempla los gastos fijos y variables de fabricación, montaje y operación del sistema de gasificación, además precisa la evaluación comparativa del costo energético del sistema propuesto frente a otras fuentes energéticas convencionales que se emplean en la actualidad.

#### 8.1 Costo de Equipo

##### 8.1.1 Costo del sistema de gasificación.

Contempla los costos de materiales, habilitado y fabricación del gasificador, ciclón, conexiones y bastidor. No contempla el intercambiador de calor debido a que este se cotizo como un equipo independiente. La cotización del sistema de gasificación se realizó en tiendas y empresas locales, siendo el siguiente:

**Tabla 66**  
*Metrado de materiales*

Metrado							
Ítem	Descripción	Unidad	Metrado	P.U	Parcial	Subtotal	Total (S/.)
<b>1.0</b>	<b>GASIFICADOR</b>					<b>1854.26</b>	
	Plancha acero inoxidable						
1.1	ASTM A240 C-310S espesor 3mm	m2	0.87	271.83	237.61		
	Plancha acero inoxidable						
1.2	ASTM A240 C-304L espesor 2mm	m2	4.38	221.71	970.27		
	Plancha acero inoxidable						
1.3	ASTM A240 C-304L espesor 3mm	m2	0.02	319.13	5.42		
	Tubo acero inoxidable ASTM						
1.4	A240 C-304L 1/8" SCH 80S AP	ml	19.03	8.33	158.61		
	Tubo acero inoxidable ASTM						
1.5	A240 C-304L 1" SCH 10S AP	ml	0.36	35.00	12.50		







1.6	Tubo acero inoxidable ASTM A240 C-304L 1/2" SCH 40S AP	ml	0.24	64.17	15.16
1.7	Barra de acero inoxidable C-304L espesor 5/16"	ml	1.00	13.33	13.33
1.8	Angular inoxidable C-304L 1 1/2" X 1 1/2" X 1/8"	ml	0.16	30.83	4.93
1.9	Barra circular lisa inoxidable C-304L 1/2"	ml	0.20	86.67	17.68
1.10	Barra circular lisa inoxidable C-304L 3/8"	ml	0.37	13.33	4.95
1.12	Aislante termico fibra de vidrio	rollo	2.00	149.90	299.80
1.13	Empaquetadura garlock style 9800 Ø 570.40mm	und	2.00	50.00	100.00
1.14	Perno y tuerca M6X20	und	20.00	0.50	10.00
1.15	Arandelas para M6X20	und	20.00	0.20	4.00
<b>2.0</b>	<b>CICLON</b>				<b>118.58</b>
2.1	Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L espesor 5mm	m2	0.11	671.8624	73.90
2.1	Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L espesor 3mm	m2	0.14	319.13	44.68
<b>3.0</b>	<b>CONEXIONES</b>				<b>951.16</b>
3.1	Brida estándar NPS 1.5 in clase 150	und	9.00	40.00	360.00
3.2	Tubería ASTM A36 NPS 1.5 in SCH 40S	ml	1.08	13.33	14.37
3.3	Plancha acero ASTM A36 espesor 3mm	m2	0.42	62.50	26.25
3.4	Plancha acero ASTM A36 espesor 5mm	m2	0.14	104.17	14.58
3.5	Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L espesor 5mm	m2	0.03	S/671.86	20.16
3.6	Empaquetadura garlock style 9800 Ø 130mm	und	9.00	30.00	270.00
3.7	Empaquetadura garlock style 9800 Ø 240mm	und	4.00	40.00	160.00
3.8	Perno y tuerca M10X25	und	4.00	0.70	2.80
3.9	Arandelas para M10X25	und	4.00	0.40	1.60
3.10	Perno y tuerca M8X25	und	10.00	0.60	6.00
3.11	Arandelas para M8X25	und	10.00	0.30	3.00





3.12	Perno y tuerca M6X20	und	4.00	0.50	2.00
3.13	Arandelas para M6X20	und	4.00	0.20	0.80
3.14	Perno y tuerca M6X25	und	4.00	0.50	2.00
3.15	Arandelas para M6X25	und	4.00	0.20	0.80
3.16	Perno y tuerca M12X40	und	24.00	1.20	28.80
3.17	Perno y tuerca M12X55	und	20.00	1.50	30.00
3.18	Arandelas para M12X55	und	20.00	0.40	8.00
<b>4.0</b>	<b>BASTIDOR</b>				<b>533.53</b>
4.1	Tubo rectangular 60 X 40 X 2 mm ASTM A36	ml	18.77	9.83	184.61
4.2	Tubo rectangular 60 X 40 X 3.2 mm ASTM A36 2mm	ml	2.36	9.83	23.23
4.3	Angular 25 x 25 x 2 mm ASTM A36	ml	13.61	2.17	29.48
4.4	Tubo 1 1/2 in x 2mm ASTM A36	ml	21.61	7.77	167.80
4.5	Plancha metálica 2 mm ASTM A36	m2	1.98	43.40	85.97
4.6	Plancha estriada metálica 2 mm ASTM A36	m2	0.94	45.14	42.44
<b>COSTO DIRECTO (S/.)</b>					<b>3,457.54</b>

Fuente: elaboración propia

**Tabla 67**  
*Consumibles*

Consumibles							
Item	Descripción	Unidad	Requerido	P.U	Parcial	Subtotal	Total (S/.)
<b>1.0</b>	<b>GASIFICADOR</b>					<b>537.50</b>	
1.1	Disco de corte STANLEY 4 1/2" X 1/25" X 7/8"	und	30.00	2.50	75.00		
1.2	Disco de desbaste KLINGSPOR 115X6X22	und	10.00	7.20	72.00		
1.3	Material de aporte	KG	4.00	65.00	260.00		
1.4	Varilla de Tungsteno	und	1.00	16.00	16.00		
1.5	Argón	m3	0.50	45.00	22.50		
1.6	Disco flap 4 1/2"x7/8"	und	2.00	13.00	26.00		
1.7	Papel de lija	und	2.00	13.00	26.00		
1.8	Jabón de limpieza acero inox	und	1.00	10.00	10.00		
1.9	Paño para pulir	und	2.00	15.00	30.00		





<b>2.0</b>	<b>CICLON</b>					<b>142.90</b>
2.1	Disco de corte STANLEY 4 1/2" X 1/25" X 7/8"	und	8.00	2.50	20.00	
2.2	Disco de desbaste KLINGSPOR 115X6X22	und	2.00	7.20	14.40	
2.3	Material de aporte	KG	0.50	65.00	32.50	
2.4	Varilla de Tungsteno	und	1.00	16.00	16.00	
2.5	Argón	m3	0.20	45.00	9.00	
2.6	Disco flap 4 1/2"x7/8"	und	1.00	13.00	13.00	
2.7	Papel de lija	und	1.00	13.00	13.00	
2.8	Jabón de limpieza acero inox	und	1.00	10.00	10.00	
2.9	Paño para pulir	und	1.00	15.00	15.00	
<b>3.0</b>	<b>CONEXIONES</b>					<b>127.00</b>
3.1	Disco de corte 4" X 1/8" X 7/8" Norton	und	3.00	5.00	15.00	
3.2	Disco de desbaste 4" X 1/4" X 7/8" Norton	und	2.00	6.00	12.00	
3.3	Electrodos 6011 punto azul	KG	1.00	13.00	13.00	
3.4	Thinner	gl	1.00	14.00	14.00	
3.5	Pintura anticorrosivo	gl	1.00	38.00	38.00	
3.6	Pintura esmalte	gl	1.00	35.00	35.00	
<b>4.0</b>	<b>BASTIDOR</b>					<b>299.00</b>
4.1	Disco de corte 4" X 1/8" X 7/8" Norton	und	4.00	5.00	20.00	
4.2	Disco de corte 14" X 1/8" X 7/8" Norton	und	3.00	16.00	48.00	
4.3	Disco de desbaste 4" X 1/4" X 7/8" Norton	und	3.00	6.00	18.00	
4.4	Electrodos 6011 punto azul	KG	3.00	13.00	39.00	
4.5	Thinner	gl	2.00	14.00	28.00	
4.6	Pintura anticorrosivo	gl	2.00	38.00	76.00	
4.7	Pintura esmalte	gl	2.00	35.00	70.00	
<b>COSTO DIRECTO (S/.)</b>						<b>1,106.40</b>

Fuente: elaboración propia

**Tabla 68**  
*Horas hombre habilitado, fabricación y montaje*

HH habilitado, fabricación y montaje							
Ítem	Pieza	Descripción de trabajo	Cantidad (horas)	P.U	Parcial	Subtotal	Total (S/.)
<b>1.0</b>	<b>GASIFICADOR</b>					<b>1553.30</b>	
1.1	Tapa de tolva de gasificador	Corte de plancha de 2mm, rolado de plancha de 2mm, rolado de barra de 1", pulido,	2.00	30.00	60.00		





		soldeo para conformación de pieza y montaje			
1.2	Tolva gasificador	Corte de plancha de 2mm, rolado de plancha de 2mm, troquelado en plancha de 2mm, pulido, armado, soldeo para conformación de piezas y montaje	8.00	30.00	970.27
1.3	Tapa superior de gasificador (conexión tolva-gasificador) y reactor	Corte de plancha de 3mm, rolado de plancha de 3mm, troquelado en plancha de 3mm, pulido, armado, soldeo para conformación de piezas y montaje	4.00	30.00	5.42
1.4	Envoltura interna, aislante térmico, envoltura externa y base de gasificador	Corte de plancha de 2mm, rolado de plancha de 2mm, troquelado en plancha de 2mm, pulido, armado y soldeo para conformación de piezas, instalación de aislante térmico y montaje	7.00	30.00	210.00
1.5	Parrilla	Corte de plancha de 3mm, rolado de plancha de 3mm, troquelado en plancha de 3mm, habilitado de barra cuadrada de 5/16", habilitado de tubos de 1" y 1/2", armado, soldeo y montaje	3.00	30.00	90.00
1.6	Tuberías ingreso de aire	Habilitado y rolado de tuberías de 1/8", armado, soldeo y montaje	6.00	30.00	180.00
1.7	Acceso para encendido manual	Habilitado de tubería de 1/2", habilitado aislante térmico para bloqueo, instalación, soldeo y montaje	0.50	30.00	15.00
1.8	Tubo embridada a la salida de gas pobre (conexión con ventilador 1)	Habilitado de plancha de 2mm para tubo y brida, armado, soldeo y montaje	1.00	30.00	4.93
1.9	Compuerta para la limpieza de cenizas	Habilitado de plancha de 2mm y 3mm, habilitado de barra circular de 3/8", habilitado de angular de 1 1/2" x 1 1/2" x 1/8", armado, soldeo y montaje	8.00	30.00	17.68
<b>2.0</b>	<b>CICLON</b>				<b>210.00</b>





2.1	Tubería de entrada	Corte de plancha de 3mm, troquelado de bridas, pulido, soldeo para conformación de pieza y montaje	0.50	30.00	15.00
2.2	Cuerpo ciclón	Corte de plancha de 3mm, rolado de plancha de 3mm, torneado de plancha de 3mm, pulido, armado, soldeo para conformación de pieza y montaje	3.00	30.00	90.00
2.3	Recipiente almacén de cenizas	Corte de plancha de 3mm, rolado de plancha de 3mm, torneado de plancha de 3mm, pulido, armado, soldeo para conformación de pieza y montaje	2.50	30.00	75.00
2.4	Tubería de salida	Corte de plancha de 3mm, troquelado de bridas, pulido, soldeo para conformación de pieza y montaje	1.00	30.00	30.00
<b>3.0</b>	<b>CONEXIONES</b>				<b>360.00</b>
3.1	Conexión gasificador - ciclón	Habilitado de planchas de 2mm, troquelado en planchas de 2mm, rolado de planchas, pulido, armado, soldeo y montaje	1.00	30.00	30.00
3.2	Conexión ciclón - intercambiador	Habilitado de planchas de 2mm, 3mm y 1/2in, troquelado en planchas de 3mm y 1/2in, rolado de planchas de 2mm, pulido, armado, soldeo y montaje	3.00	30.00	90.00
3.3	Conexión intercambiador - generador	Habilitado de planchas de 2mm, 3mm y 1/2in, troquelado en planchas de 2mm y 1/2in, rolado de planchas de 2mm, pulido, armado, soldeo y montaje	3.00	30.00	90.00
3.4	Conexión ingreso de aire frío	Habilitado de planchas de 2mm, 3mm y 1/2in, troquelado en planchas de 2mm, pulido, armado, soldeo y montaje	3.00	30.00	90.00
3.5	Conexión salida de aire caliente	Habilitado de planchas de 2mm y 1/2in, troquelado en	2.00	30.00	60.00





		planchas de 1/2in, rolado de planchas de 2mm, pulido, armado, soldeo y montaje					
<b>4.0</b>	<b>BASTIDOR</b>						<b>630.00</b>
4.1	Soporte	habilitado de tubos rectangulares, ángulos, planchas, armado, soldeo y montaje	16.00	30.00	480.00		
4.2	Barandas	habilitado de tubos redondos, rolado, armado, soldeo y montaje	5.00	30.00	150.00		
<b>Costo directo (S/.)</b>							<b>2,753.30</b>

Fuente: elaboración propia

**Tabla 69**  
*Horas maquina*

<b>H maquina</b>							
Ítem	Descripción	Equipos	Cantidad (horas)	P.U	Parcial	Subtotal	Total (S/.)
<b>1.0</b>	<b>GASIFICADOR</b>					<b>685.50</b>	
1.1	Tapa de tolva de gasificador	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, taladro de mano	2.00	15.00	30.00		
1.2	Tolva gasificador	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, taladro de mesa y de mano	8.00	18.00	144.00		
1.3	Tapa superior de gasificador (conexión tolva-gasificador) y reactor	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, taladro de mesa y de mano	4.00	18.00	72.00		
1.4	Envoltura interna, aislante térmico, envoltura externa y base de gasificador	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, taladro de mesa y de mano	7.00	18.00	126.00		
1.5	Parrilla	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, taladro de mesa y de mano	3.00	18.00	54.00		





1.6	Tuberías ingreso de aire	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, taladro de mano	6.00	15.00	90.00
1.7	Acceso para encendido manual	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, taladro de mano	0.50	15.00	7.50
1.8	Tubo embreadada a la salida de gas pobre (conexión con ventilador 1)	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, taladro de mesa y de mano	1.00	18.00	18.00
1.9	Compuerta para la limpieza de cenizas	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, taladro de mesa y de mano	8.00	18.00	144.00
<b>2.0</b>	<b>CICLON</b>				<b>124.50</b>
2.1	Tubería de entrada	Amoladora, máquina de soldar TIG, taladro de mesa y de mano	0.50	15.00	7.50
2.2	Cuerpo ciclón	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, torno, taladro de mano	3.00	18.00	54.00
2.3	Recipiente almacén de cenizas	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, torno, taladro de mano	2.50	18.00	45.00
2.4	Tubería de salida	Amoladora, roladora, máquina de soldar TIG, taladro de mesa y de mano	1.00	18.00	18.00
<b>3.0</b>	<b>CONEXIONES</b>				<b>216.00</b>
3.1	Conexión gasificador - ciclón	Amoladora, taladro de mesa y de mano, máquina de soldar TIG, roladora	1.00	18.00	18.00
3.2	Conexión ciclón - intercambiador	Amoladora, taladro de mesa y de mano, máquina de soldar arco eléctrico, roladora	3.00	18.00	54.00
3.3	Conexión intercambiador - generador	Amoladora, taladro de mesa y de mano, máquina de soldar arco eléctrico, roladora	3.00	18.00	54.00
3.4	Conexión ingreso de aire frío	Amoladora, taladro de mesa y de mano, máquina de soldar arco eléctrico, roladora	3.00	18.00	54.00
3.5	Conexión salida de aire caliente	Amoladora, taladro de mesa y de mano, máquina	2.00	18.00	36.00





		de soldar arco eléctrico, roladora				
<b>4.0</b>	<b>BASTIDOR</b>					<b>315.00</b>
4.1	Soporte	Amoladora, máquina de soldar arco eléctrico	16.00	15.00	240.00	
4.2	Barandas	Amoladora, máquina de soldar arco eléctrico	5.00	15.00	75.00	
<b>Costo directo (S/.)</b>						<b>1,341.00</b>

Fuente: elaboración propia

El costo del sistema de gasificación será:

**Tabla 70**

*Costo del sistema de gasificación*

<b>Costo del sistema de gasificación</b>		
<b>Ítem</b>	<b>Equipo</b>	<b>Costo</b>
1.1	Costo en materiales (metrado)	3,457.54
1.2	Costo en consumibles	1,106.40
1.3	Costo HH habilitado, fabricación y montaje	2,753.30
1.4	Costo horas maquina	1,341.00
<b>Costo directo (S/.)</b>		<b>8,658.24</b>

Fuente: elaboración propia

### 8.1.2 Costo del intercambiador de calor.

El costo del intercambiador implica el diseño mecánico por parte del proveedor, bajo las condiciones de diseño térmico especificados en el presente trabajo de tesis. La cotización del intercambiador de calor se realizó en una empresa local, el costo de fabricación cotizado es de S/ 9 637.38, esta cotización se muestra en el ANEXO 9.

### 8.1.3 Costo de equipos complementarios.

Precisa los ventiladores y generador eléctrico, siendo los siguientes:







**Tabla 71**  
*Costo de equipos complementarios*

<b>Equipos complementarios</b>							
<b>Ítem</b>	<b>Equipos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>P.U</b>	<b>Parcial</b>	<b>Subtotal</b>	<b>Total (S/.)</b>
<b>1.0</b>	<b>Equipos complementarios</b>					<b>5,000.0</b>	
1.1	Ventilador 1 CMA-324-2T 60HZ	und	1.00	400.00	300.00		
1.2	Ventilador 2 CMA-218-2T 60HZ	und	1.00	480.00	380.00		
1.5	Ventilador 2 CMP-922-4T 60HZ	und	1.00	520.00	440.00		
1.6	Generador eléctrico panther Kohler PK7000E	und	1.00	3,600.00	3,600.00		
	<b>Costo Directo (S/.)</b>						<b>5,000.00</b>

Fuente: elaboración propia

#### 8.1.4 Costo total de sistema.

El costo total del sistema será:

**Tabla 72**  
*Costo total del sistema de gasificación*

<b>Costo Total del sistema de gasificación</b>		
<b>Ítem</b>	<b>Equipo</b>	<b>Costo</b>
1.1	Costo del sistema de gasificación	8,658.24
1.2	Costo del intercambiador	9637.38
1.3	Costo de equipos complementarios	5,000.00
	<b>Costo total (S/.)</b>	<b>23,295.62</b>

Fuente: elaboración propia





## 8.2 Evaluación de Costos

El objetivo de la presente evaluación de costos es calcular los indicadores económicos del proyecto de tesis, con el propósito de evaluar la competitividad económica del sistema estudiado con otras fuentes de energía convencional.

### 8.2.1 Costos.

#### 8.2.1.1 Costos fijos.

Son los costos relacionados con los costos de construcción y equipamiento, se considera los siguientes:

##### 8.2.1.1.1 Servicio de capital inmovilizado.

Comprende interés y amortización de capital. Interés es el coste que se paga por un crédito, siendo este un valor mensual o anual establecida por la prestamista. Amortización es la pérdida de valor de un activo con el paso del tiempo.

##### 8.2.1.1.2 Cargas tributarias.

Tiene una incidencia mínima y no se tiene en cuenta para los cálculos.

##### 8.2.1.1.3 Gastos de operación.

Incluye sueldos, herramientas y enseres.

##### 8.2.1.1.4 Gastos de mantenimiento y de renovación.

Incluye el reemplazo periódico de las piezas desgastadas y todas las actividades que incluyen el mantenimiento preventivo y correctivo planificado. Estos gastos aparecen a partir del segundo o tercer año de ejercicio alcanzando una tasa entre 1 a 2% anual.

Los costos fijos se determinan a partir de la siguiente ecuación:

$$G_f = P_{max} * i * p$$





Donde:

$G_f$ : gastos fijos

$P_{max}$ : potencia máxima de generación (KW)

$i$ : costo de la instalación por KW de potencia instalada (\$/KW)

$p$ : coeficiente de interés y amortización de capital

### 8.2.1.2 Costos variables.

#### 8.2.1.2.1 Gastos por combustible utilizado.

Es importante en el costo de producción, dependiendo del número de horas de utilización el costo influirá en la determinación del KWH generado.

#### 8.2.1.2.2 Gastos de lubricantes.

Es menor en comparación al costo del combustible.

#### 8.2.1.2.3 Consumo específico de combustible.

Depende de la eficiencia del equipo a utilizar y del tipo de combustible.

#### 8.2.1.2.4 Número de horas de utilización.

Depende del mercado del consumidor y de las características de los consumidores.

Los costos variables se determinan a partir de la siguiente ecuación:

$$G_v = P_{max} * c * h$$

Donde:

$G_v$ : gastos variables

$P_{max}$ : potencia máxima de generación (KW)

$c$ : costo de combustible en (\$/KW\*h)

$h$ : número de horas de utilización anual (h)





### 8.2.1.3 Costos totales.

Los costos totales (gastos anuales) será la suma de los gastos fijos y variables.

$$G = G_f + G_v = P_{max} * i * p + P_{max} * c * h$$

## 8.2.2 Evaluación de Costos en sistemas de generación.

### 8.2.2.1 Costo de KW instalado.

Si referimos los gastos totales para 1 KW de potencia instalada, el gasto anual unitario en dólares por potencia instalada (\$/KW) será:

$$\frac{G}{P_{max}} = i * p + c * h$$

Con la ecuación anterior evaluaremos la rentabilidad del costo de KW instalado entre el sistema de gasificación estudiado y un generador eléctrico a gasolina para potencias similares.

Los datos son:





**Tabla 73**

*Datos para la evaluación de costos*

	Datos	Valor	unidad	Fuente
Sistema de gasificación	Potencia generada	9.128	KW	
	Costo de combustible	0.35	S./Kg	
	Costo de equipo (sistema)	23295.62	S/.	
	Costo de equipo (sistema)	6974.74	\$	
	Tasa de cambio	3.34	—	
	Coeficiente de interés	19.71	%	
	Eficiencia de sistema	0.25	%	
	Poder calorífico combustible	20718	Kj/Kg	
eléctrico	Potencia generada	9	KW	
	Costo de combustible	12.96	S./gal	
	Costo de equipo (sistema)	5900	S/.	
	Costo de equipo (sistema)	1766.47	\$	
Generador gasolero	Tasa de cambio	3.34	—	
	Coeficiente de interés	19.71	%	
	Eficiencia de sistema	0.25	%	
	Poder calorífico combustible	42500	Kj/Kg	
	Densidad de combustible	730	Kg/m3	

Fuente: elaboración propia

**-Determinamos los parámetros para el sistema de gasificación:**

- a) Costo del sistema en dólares, considerando una tasa de cambio de 3.34.

$$C_{sist\ gasif} = \frac{23295.62S/.}{3.34} = 6974.74\$$$

- b) Coeficiente de interés y amortización de capital, en el ANEXO 8 se muestra la tasa de interés anual.





$CIA = \text{tas. de interes} + \text{tas. de amortizacion} + \text{gas. operacion} + \text{gas. mantenimeinto}$

$$CIA = 14.71\% + 2\% + 1\% + 2\% = 19.71\%$$

c) Costo de la instalación por KW de potencia generada.

$$i = \left( \frac{6974.74\$}{9.128KW} \right) = 764.10 \$/KW$$

d) Costo de combustible.

$$c = \left( 0.35 \frac{S/.}{Kg} \right) \left( \frac{1\$}{3.34S/.} \right) \left( \frac{1Kg}{20718Kj} \right) \left( \frac{3600Kj}{1KWh} \right) \left( \frac{1}{0.25} \right) = 0.07 \frac{\$}{KWh}$$

**-Determinamos los parámetros para el generador eléctrico gasoliner:**

e) Costo del sistema en dólares, considerando una tasa de cambio de 3.34.

$$C_{gene} = \frac{5900 S/.}{3.34} = 1766.47\$$$

f) Coeficiente de interés y amortización de capital, en el ANEXO 8 se muestra la tasa de interés anual.

$CIA = \text{tas. de interes} + \text{tas. de amortizacion} + \text{gas. operacion} + \text{gas. mantenimeinto}$

$$CIA = 14.71\% + 2\% + 1\% + 2\% = 19.71\%$$

g) Costo de la instalación por KW de potencia generada.

$$i = \left( \frac{1766.47\$}{9KW} \right) = 196.27 \$/KW$$

h) Costo de combustible.

$$c = \left( 12.96 \frac{S/.}{gal} \right) \left( \frac{264.172gal}{1m^3} \right) \left( \frac{1m^3}{730Kg} \right) \left( \frac{1\$}{3.34S/.} \right) \left( \frac{1Kg}{42500Kj} \right) \left( \frac{3600Kj}{1KWh} \right) \left( \frac{1}{0.25} \right)$$

$$= 0.48 \frac{\$}{KWh}$$





El costo de KW instalado en función a las horas de operación será:

**Tabla 74**

*Tabulación de costos de KW instalado*

<b>Horas</b>	<b>Gasificador</b>	<b>Generador</b>
250.00	168.81	157.63
255.00	169.18	160.01
260.00	169.54	162.39
265.00	169.91	164.76
270.00	170.27	167.14
275.00	170.63	169.52
280.00	171.00	171.90
285.00	171.36	174.28
290.00	171.73	176.66
295.00	172.09	179.04
300.00	172.46	181.42
305.00	172.82	183.80
310.00	173.18	186.17
315.00	173.55	188.55
320.00	173.91	190.93
325.00	174.28	193.31
330.00	174.64	195.69
335.00	175.00	198.07
340.00	175.37	200.45
345.00	175.73	202.83
350.00	176.10	205.20

Fuente: elaboración propia



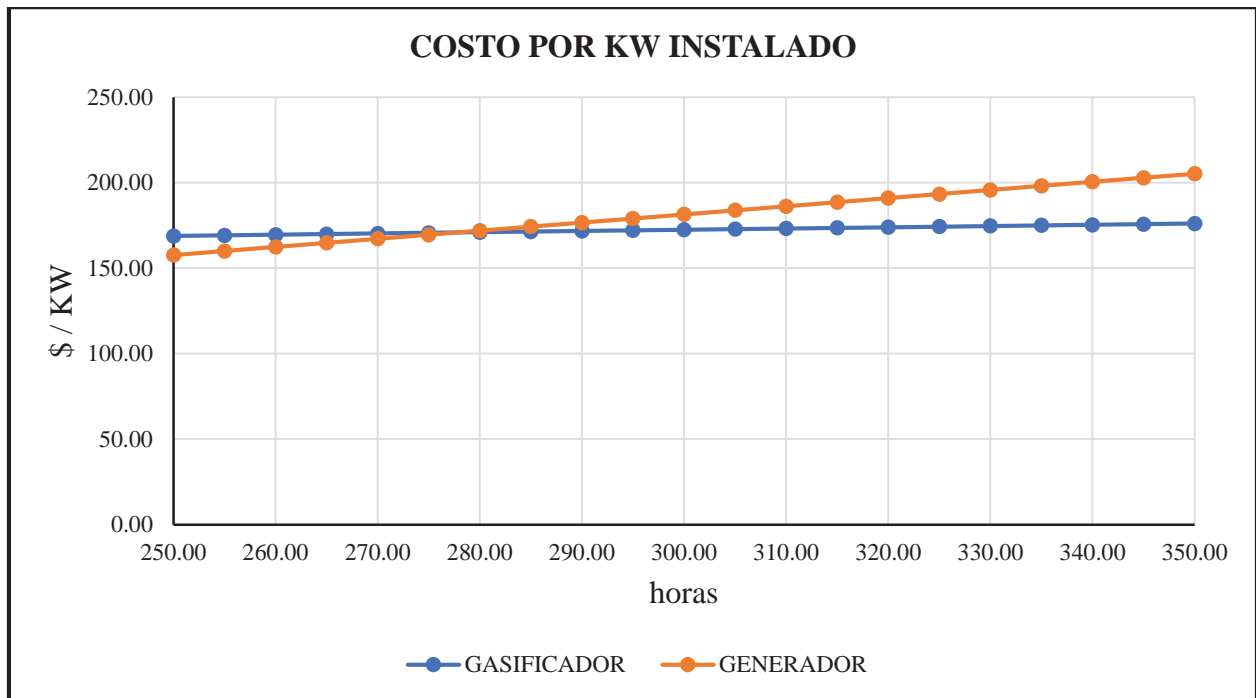


Figura 65. Costo por KW instalado.

Tabla 75

Tabulación de costos de KW instalado

Horas	Gasificador	Generador
100	157.89	86.26
200	165.17	133.84
300	172.46	181.42
400	179.74	228.99
500	187.02	276.57
600	194.31	324.15
700	201.59	371.72
800	208.87	419.30
900	216.16	466.88
1000	223.44	514.45
1100	230.72	562.03
1200	238.01	609.61







---

1300	245.29	657.19
1400	252.57	704.76
1500	259.86	752.34
1600	267.14	799.92
1700	274.42	847.49
1800	281.71	895.07
1900	288.99	942.65
2000	296.27	990.22
2100	303.56	1037.80
2200	310.84	1085.38
2300	318.12	1132.95
2400	325.41	1180.53
2500	332.69	1228.11
2600	339.97	1275.68
2700	347.26	1323.26
2800	354.54	1370.84
2900	361.82	1418.42
3000	369.11	1465.99
3100	376.39	1513.57
3200	383.67	1561.15
3300	390.96	1608.72
3400	398.24	1656.30
3500	405.53	1703.88
3600	412.81	1751.45
3700	420.09	1799.03
3800	427.38	1846.61
3900	434.66	1894.18
4000	441.94	1941.76
4100	449.23	1989.34
4200	456.51	2036.91

---





4300	463.79	2084.49
4400	471.08	2132.07
4500	478.36	2179.65
4600	485.64	2227.22
4700	492.93	2274.80

Fuente: elaboración propia

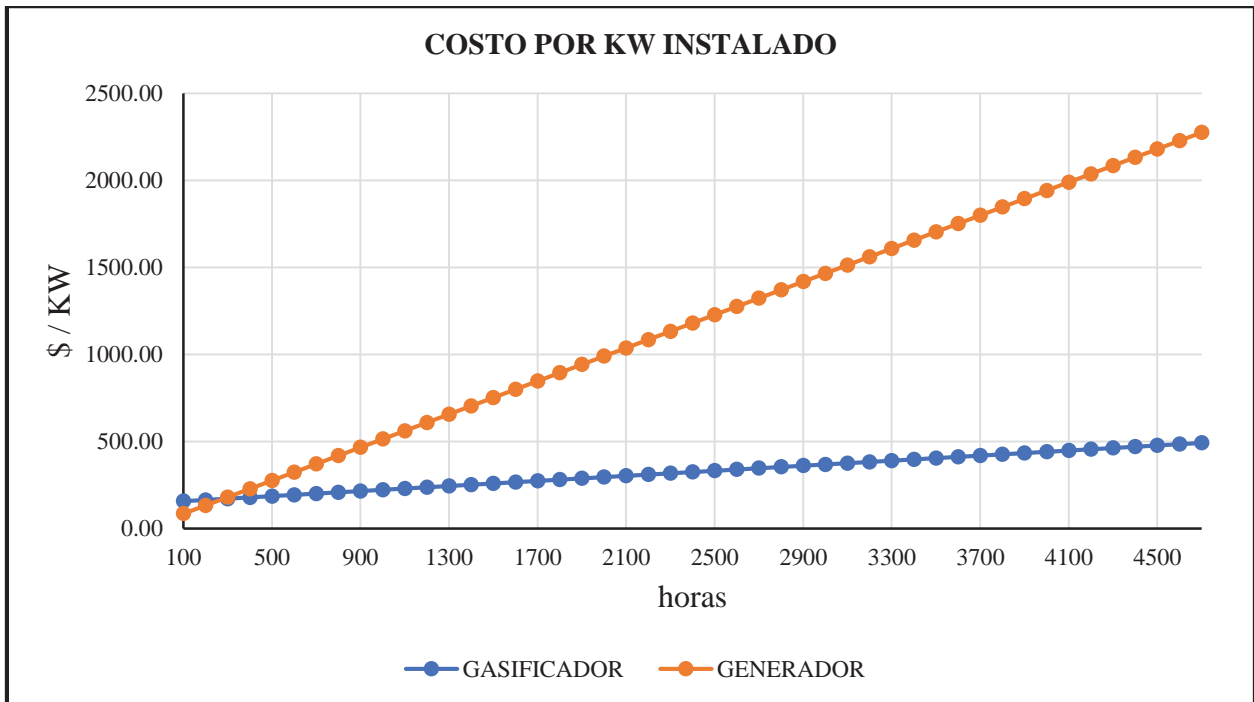


Figura 66. Costo por KW instalado.

De las figuras 74 y 75 podemos evaluar el comportamiento del sistema de gasificación frente a los generadores eléctricos gasolineros, cuyas conclusiones son:

- De la figura 65 el punto de intersección de las dos rectas en 277.8 horas de utilización, indica que es indistinto utilizar una u otra alternativa a partir de este tiempo.
- De la figura 66, para mayor número de horas de utilización después del punto de intersección, el sistema de gasificación es la mejor alternativa, puesto que los costos variables de esta alternativa son menores a las de los generadores eléctricos gasolineros.





- c) En el tiempo a partir de las 277.8 horas, el sistema de gasificación se proyecta como la más adecuada, siempre que la operación del sistema sea permanente.

### 8.2.2.2 Costo de KWH generado.

Si la ecuación del ítem 6.1.1.4 dividimos entre el número de horas de utilización anual, el gasto en (\$/KWH) estará dado por:

$$g = \frac{G}{h * P_{max}} = \frac{i * p}{h} + c$$

Tomando los parámetros calculados en el ítem 6.1.2.1 determinamos los siguientes.

El costo de KWH generado en función a las horas de operación será:

**Tabla 76**

*Tabulación de costos por KWH generado*

Horas	Gasificador	Generador
277.00	0.61653	0.61543
277.20	0.61614	0.61533
277.40	0.61575	0.61523
277.60	0.61536	0.61513
277.80	0.61497	0.61503
278.00	0.61458	0.61493
278.20	0.61419	0.61483
278.40	0.61380	0.61473
278.60	0.61341	0.61463
278.80	0.61302	0.61453
279.00	0.61264	0.61443
279.20	0.61225	0.61433
279.40	0.61186	0.61423
279.60	0.61148	0.61413
279.80	0.61109	0.61403
280.00	0.61071	0.61393





280.20	0.61032	0.61383
280.40	0.60994	0.61373
280.60	0.60956	0.61364
280.80	0.60918	0.61354
281.00	0.60879	0.61344

Fuente: elaboración propia

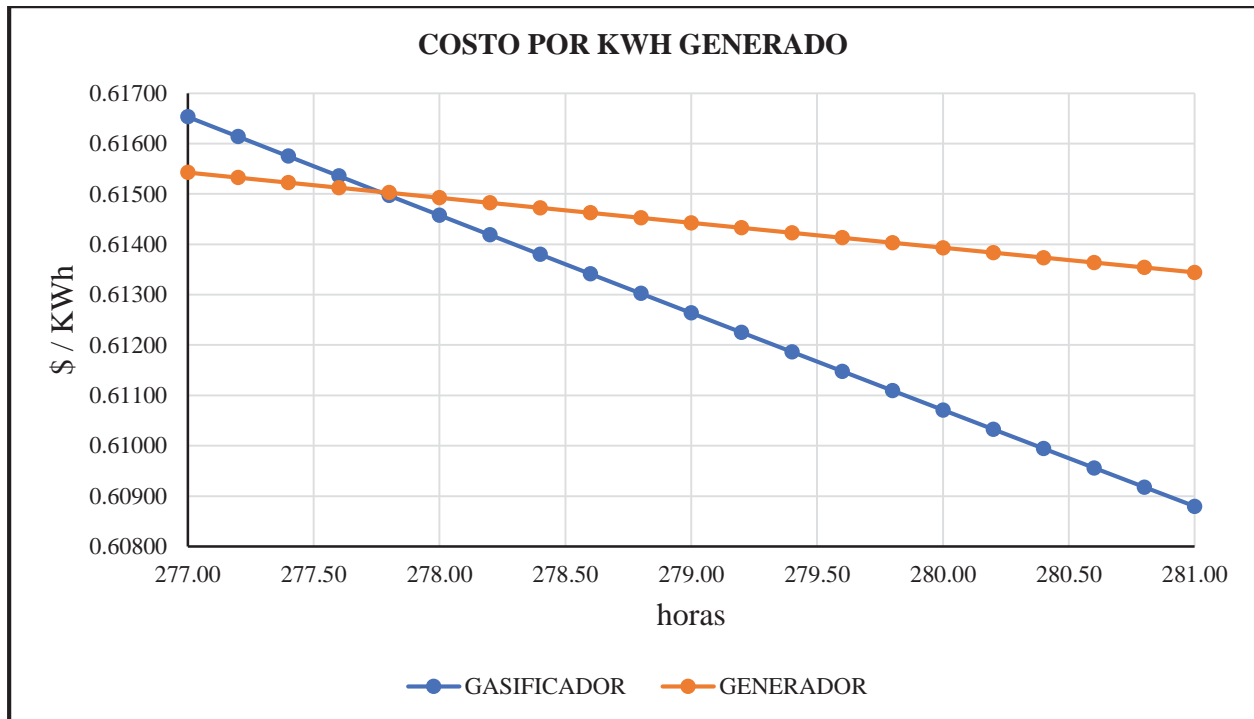


Figura 67. Costo por KWh generado

Tabla 77

Tabulación de costos por KWh generado

Horas	Gasificador	Generador
100	1.58	0.86
200	0.83	0.67
300	0.57	0.60
400	0.45	0.57
500	0.37	0.55





---

600	0.32	0.54
700	0.29	0.53
800	0.26	0.52
900	0.24	0.52
1000	0.22	0.51
1100	0.21	0.51
1200	0.20	0.51
1300	0.19	0.51
1400	0.18	0.50
1500	0.17	0.50
1600	0.17	0.50
1700	0.16	0.50
1800	0.16	0.50
1900	0.15	0.50
2000	0.15	0.50
2100	0.14	0.49
2200	0.14	0.49
2300	0.14	0.49
2400	0.14	0.49
2500	0.13	0.49
2600	0.13	0.49
2700	0.13	0.49
2800	0.13	0.49
2900	0.12	0.49
3000	0.12	0.49
3100	0.12	0.49
3200	0.12	0.49
3300	0.12	0.49
3400	0.12	0.49
3500	0.12	0.49

---





3600	0.11	0.49
3700	0.11	0.49
3800	0.11	0.49
3900	0.11	0.49
4000	0.11	0.49
4100	0.11	0.49
4200	0.11	0.48
4300	0.11	0.48
4400	0.11	0.48
4500	0.11	0.48
4600	0.11	0.48
4700	0.10	0.48

Fuente: elaboración propia

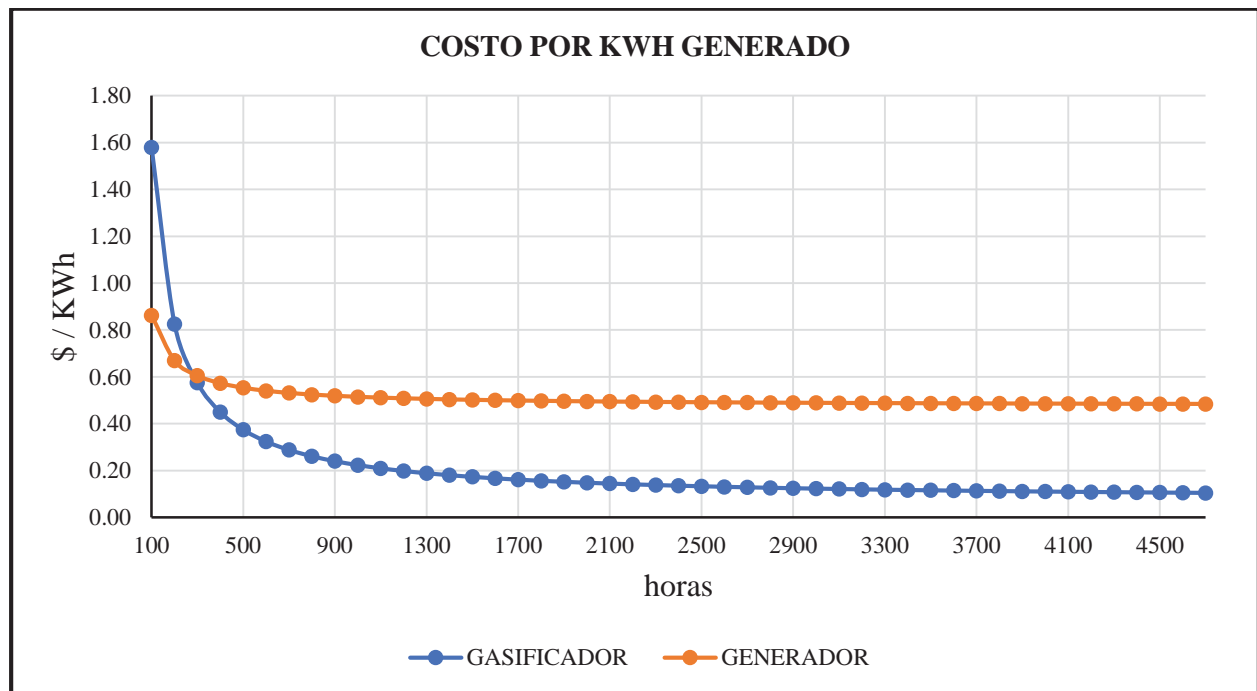


Figura 68. Costo por KWh generado





De las figuras 66 y 67, nos permite observar el comportamiento de las curvas del costo de KWh generado, las tendencias son decrecientes a medida que se incrementa las horas de utilización, se tiene las siguientes conclusiones:

- a) De la figura 67, el sistema de gasificación es competitivo en costo de KWh generado a partir de las 277.8 horas.
- b) A partir de las 277.8 horas de utilización de los sistemas, es más económico el costo de KWh generado del sistema de gasificación respecto al generador eléctrico gasolinero.
- c) A mayor número de utilización del sistema de gasificación, menor es el costo de KWh generado.

### 8.2.3 Horas de Operación del Sistema de gasificación.

En la tabla 22 se indica la potencia de los equipos que consumirán la energía eléctrica generada por el sistema de gasificación, estos equipos son de pequeña productividad.

De la figura 29 se puede ver que la producción del café en la región del cusco predomina durante 6 meses al año, esto implica que nuestro sistema de gasificación tendría que operar a plena carga en estos tiempos (20 horas por día y 26 días por mes), por ser de pequeña de productividad.

Las horas de operación del sistema de gasificación por año será:

$$(6 \text{ meses}) \left( \frac{26 \text{ dias}}{1 \text{ mes}} \right) \left( \frac{20 \text{ horas}}{1 \text{ dia}} \right) = 3120 \text{ horas / año}$$

En este tiempo se dispone de un día por semana para la verificación de los equipos, así como para el mantenimiento necesario.





### 8.2.3.1 Análisis global del Costo de KWh generado.

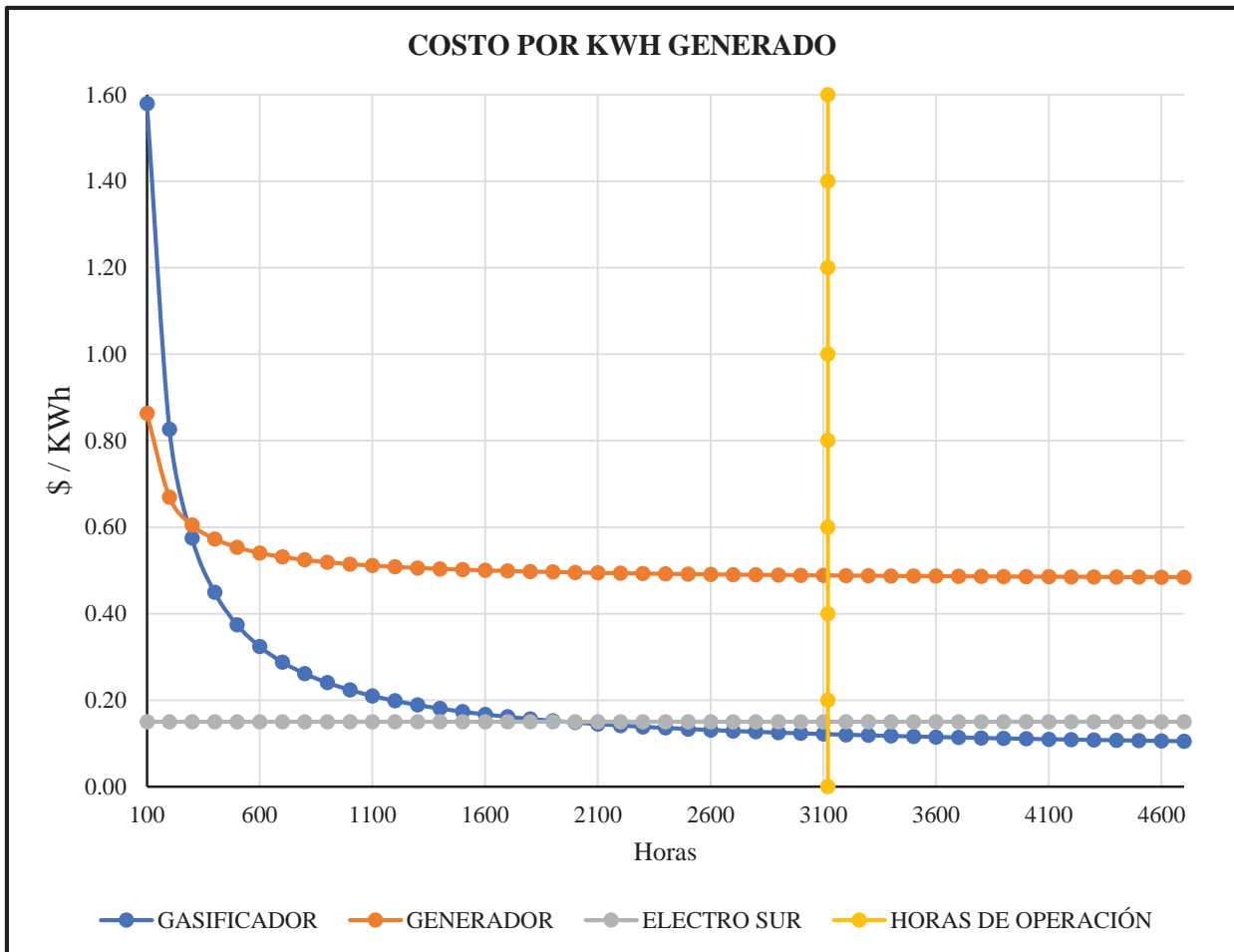


Figura 69. Evaluación de costo por KWh generado global

De la figura 69 concluimos:

- Tomando como referencia el costo de 0.5 \$ / KWh (0.15\$/KWh) ofertado por Electro Sur Este, el sistema de gasificación es competitivo con este costo a partir de las 1900 horas de operación.
- Para una operación de 3120 horas por año, para el sistema de gasificación el costo de generación será de 0.12 \$/KWh.







- c) Para una operación de 3120 horas por año de los sistemas mostrados en la figura 69, el sistema de gasificación es el más viable.
- d) El costo por KWh generado con generadores eléctricos, en el tiempo, es más caro en comparación con el sistema de gasificación, así como con el precio ofertado por Electro Sur Este.
- e) Cuanto mayor son las horas de operación, el costo de generación del sistema de gasificación, es más competitivo con los generadores eléctricos, así como con el precio ofertado por Electro Sur Este.





## CONCLUSIONES

- a) El sistema de generación consta de: un gasificador de pulpa de café de 25 KW de potencia, generador eléctrico de 3.9 KW de potencia eléctrica que opera con gas pobre, un intercambiador de calor que recupera 5.2 KW de energía térmica al enfriar el gas pobre antes de su ingreso al generador eléctrico.
- b) Se ha determinado que el combustible biomásico será la pulpa de café, de composición química: C-51.33%, H-6.79%, O-38.65%, N-3.02%, S-0.21% , densidad real de  $958 \text{ Kg/m}^3$ , densidad aparente  $124.4 \text{ Kg/m}^3$ , poder calorífico superior  $21760.22 \text{ KJ/Kg}$ , poder calorífico inferior  $20718.13 \text{ KJ/Kg}$  y con humedad de 15% antes de su ingreso al gasificador.
- c) Para el gasificador; el diámetro de la garganta es de 60mm (estrechamiento máximo), la configuración cónica por encima de la garganta tiene una inclinación de  $60^\circ$ , con una distancia de 100mm hasta la altura del plano de entrada de aire y con diámetro a esta altura de 176mm, la altura de la zona de reducción por debajo del plano de la garganta es de 220mm y un diámetro de 268mm a esta misma altura, con distancia desde el punto más bajo de la zona de reducción hasta la parrilla de 100mm, por encima del reactor se tiene una envoltura con diámetro interno de 436mm, diámetro externo de 480.4mm y altura interna de 891mm. Para el ciclón; la entrada del gas pobre a velocidad de  $16 \text{ m/s}$  tiene una configuración rectangular interna de  $15.51 \times 38.78 \text{ mm}$ , la salida tiene un diámetro interno de 38.78 mm en dirección normal al ingreso del gas, el cuerpo cilíndrico tiene diámetro interno de 77.55 mm y altura interna de 116.33 mm, el cuerpo cónico tiene un diámetro interno menor de 29.08 mm y una altura de 193.88mm, con





eficiencia de separación de partículas sólidas suspendidas en el gas mayor a 90.9% para partículas mayores desde  $5\mu m$  de diámetro.

- d) Para el gasificador; el flujo volumétrico de gas producido es de  $16.88 Nm^3/h$  a temperatura de  $338.758\text{ }^\circ C$  a partir de un flujo másico de  $6.33 Kg/h$  a temperatura ambiente de pulpa de café que ingresa, la temperatura en la superficie externa es de  $27.89\text{ }^\circ C$ . Para el intercambiador de calor; coraza-tubos, con fluido caliente (gas pobre) que fluye por el interior de los tubos, con temperatura de entrada de  $338.758^\circ C$  y temperatura de salida de  $30^\circ C$ , con flujo másico de  $0.00455 Kg/s$  y con el fluido frío (aire) que fluye por la coraza, con una temperatura de entrada de  $25^\circ C$  y temperatura de salida de  $55^\circ C$ , con flujo másico de  $0.173 Kg/s$ .
- e) El costo por KW instalado del sistema de generación de energía térmica y eléctrica es competitivo a partir de las 277.8 horas de operación frente a los generadores eléctricos gasolineros, puesto que los costos variables de este sistema son menores a las de los generadores eléctricos gasolineros.
- f) El costo por KWH generado del sistema de generación de energía térmica y eléctrica es competitivo a partir de las 277.8 horas de operación frente a los generadores eléctricos gasolineros. Tomando como referencia el costo de energía ofertado por Electro Sur Este de  $0.5 S/. / KWh$  generado, el sistema de gasificación es competitivo con este costo a partir de las 1900 horas de operación. Para una operación de 3120 h/año, el costo del sistema de gasificación es la más viable frente al generador eléctrico gasolinero y al costo ofertado por Electro Sur Este.





## RECOMENDACIONES

- a) Existe una pérdida de alrededor de 30% según la FAO cuando un generador eléctrico que opera con gasolina se cambia de combustible por el gas pobre, se recomienda la elaboración del diseño de un carburador que optimice la pérdida de potencia en los generadores eléctricos gasolineros al operar con gas pobre.
- b) Los resultados teóricos obtenidos en la presente tesis, deben ser corroborados y probados, mediante un proceso de pruebas, a partir de la construcción de un módulo para el sistema de gasificación estudiado.
- c) Se recomienda realizar el estudio de diseño mecánico para el intercambiador de calor, bajo los resultados de diseño térmico estudiados en la presente tesis.





## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez Chávez, B. (13 de Octubre de 2014). Caracterización del pericarpio, mesocarpio y endocarpio del fruto del café para la producción de aglomerados energéticos. Xalapa Enriquez, Veracruz, Mexico.
- Arenas Castellanos, D. (Octubre de 2009). Propuesta de diseño de un proceso para la generación de energía eléctrica a partir de los residuos de la producción de café. Bogotá, Colombia.
- Arevalo, W. (2015). La Biomasa: Una Alternativa Energética Proveniente de la Vida Misma. *Las Energías Sustentables y Sostenibles en el Departamento de Nariño*, 80-90.
- Aristizabal Alvarez, M., & Valencia Naranjo, L. (2015). Diseño conceptual de un gasificador para la producción de gas de síntesis a partir de residuos de poda generados en la universidad EAFIT. Medellín, Colombia.
- Augusto Estrada, C., & Zapata Meneses, A. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et Technica*, 155-159.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis*. Burlington: Elsevier.
- Belonio, A. (2005). *Rice husk gas stove handbook*. Philippines.
- Besora Magem, J. (s.f.). *Secador solar de café*.
- Briceño, M. I. (2016). *Dimensionamiento de intercambiadores de calor tubulares*. Obtenido de monografias.com: <https://www.monografias.com/docs/113/dimensionamiento-intercambiadores-calor-tubulares/dimensionamiento-intercambiadores-calor-tubulares.shtml>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mexico: McGraw-Hill.
- Cabanzón Labat, J. (Mayo de 2018). Diseño y cálculo de un intercambiador de calor.
- Castells, E. X. (2012). *Biomasa y Bioenergía*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Castells, X. E. (2012). LA RECUPERACIÓN DE LA ENERGÍA: cogeneración, intercambiadores y regeneradores de calor. En X. E. Castells, *TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS* (págs. 808-1207). Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Castillo Benavides, J. (2014). Determinación de parámetros fisicoquímicos y cinéticos de la degradación térmica de broza y cascarilla de café para ser utilizados en simulaciones computacionales del proceso de gasificación. Costa Rica.
- Castro Martínez, S. (2015). Instalación y Arranque de un Prototipo de Gasificación. Mexico.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa*. Mexico: McGraw-Hill.





- Compañía Peruana de Estudios de Mercados y Opinión Pública S.A.C.-CPI. (Abril de 2018). *Peru: Poblacion 2018*. Obtenido de Compañía Peruana de Estudios de Mercados y Opinión Pública S.A.C.-CPI:  
[http://www.cpi.pe/images/upload/paginaweb/archivo/26/mr\\_poblacional\\_peru\\_201805.pdf](http://www.cpi.pe/images/upload/paginaweb/archivo/26/mr_poblacional_peru_201805.pdf)
- Cooperación alemana al desarrollo-GIZ.  
([https://energypedia.info/images/d/d1/Cat%C3%A1logo\\_Caf%C3%A9.pdf](https://energypedia.info/images/d/d1/Cat%C3%A1logo_Caf%C3%A9.pdf) de Agosto de 2013). *Catálogo de maquinaria para procesamiento de café*. Obtenido de Cooperación alemana al desarrollo-GIZ.
- Departamento de física aplicada III, universidad de sevilla. (04 de Abril de 2013). *Calentamiento de un gas a volumen y a presión constante*. Obtenido de Departamento de física aplicada III, universidad de sevilla:  
[http://laplace.us.es/wiki/index.php/Calentamiento\\_de\\_un\\_gas\\_a\\_volumen\\_y\\_a\\_presi%C3%B3n\\_constante](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Calentamiento_de_un_gas_a_volumen_y_a_presi%C3%B3n_constante)
- Echeverri Londoño, C. (2006). Diseño óptimo de ciclones. *Revista ingenierías universidad de Medellín*, 123-139.
- Elias Castells, X., & Velo, E. (2012). La Gasificación. En X. Elias Castells, *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos* (págs. 414-475). Madrid: Ediciones Diaz de Santos.
- Famacin del Perú E.I.R.L. (s.f.). *Secadora rotativa*. Obtenido de Famacin del Perú E.I.R.L.:  
<http://www.famacin.com.pe/index.php/es/maquinarias-industriales/linea-agroindustrial/secadora-rotativa>
- FAO. (Febrero de 1993). *Capítulo 2: Pequeños gasificadores de madera y carbón vegetal para el funcionamiento de motores de combustión interna*. Obtenido de FAO:  
<http://www.fao.org/docrep/T0512S/t0512s03.htm#TopOfPage>
- Fonseca Gonzales, N. (2003). *Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa (GG) en motores de combustión interna alternativos*. Bogotá.
- Gonzales Marroquin, J. (Diciembre de 1998). Determinación experimental de coeficientes de transferencia de calor para convección libre y forzada. San Nicolás de los Garza, México.
- Huaraz Choi, C. (Abril de 2013). Diseño de un gasificador de 25 KW para aplicaciones domésticas usando como combustible cascarilla de arroz. Lima, Perú.
- Huaripoma Vega, D. (Junio de 2015). Diseño de un gasificador downdraft invertido de 2600 Kcal/h que emplea cascarilla de arroz como combustible. Lima, Perú.
- IMARTEC. (s.f.). *IMARTEC-biomass energy evolution*. Obtenido de <https://www.imartec.es/es-realmente-la-biomasa-neutra-en-emisiones-de-carbono/>
- Incropera, F., & Dewitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Prentice hall.





- Jóvaj, M. (1982). *Motores de automovil*. Moscú: Editorial mir.
- Leon Estrada, J. M. (2001). *Diseño y calculo de recipiente a presión*. Obtenido de Academia: [https://www.academia.edu/7116276/Dise%C3%B1o\\_y\\_C%C3%A1lculo\\_de\\_Recipientes\\_a\\_Presi%C3%B3n](https://www.academia.edu/7116276/Dise%C3%B1o_y_C%C3%A1lculo_de_Recipientes_a_Presi%C3%B3n)
- Lira Cacho, G., & Condori Antezana, J. (2005). Un sistema de alimentacion dual GLP/Gasolina de bajo costo para motores automotrices de pequeña cilindrada. *Tecnia*, 93-102.
- Mairena Calvo, B. (2010). Dimensionamiento de un equipo de gasificación para el aprovechamiento de broza de café. Costa Rica.
- Martín Perez, D. (Octubre de 2014). Diseño de un Gasificador de Pequeña Potencia Eléctrica. Barcelona.
- Martinez Angel, J. D. (11 de Noviembre de 2005). Evaluacion del Rendimiento Operacional de un Gasificador para Cascarilla de Arroz en el Reactor de Lecho Fluidizado a Escala Piloto. Medellin, Colombia.
- Montiel Prieto, T. E. (Enero de 2017). Diseño térmico y mecánico de intercambiadores de calor carcasa-tubo. Sartenejas, Venezuela.
- Nieto, P. (13 de abril de 2015). *Biomasa: ventajas y desventajas*. Obtenido de Pilar Nieto: <http://www.pilarnieto.es/biomasa-ventajas-y-desventajas/>
- Pasan Camacho, A. (22 de Junio de 2013). *Ventajas e Inconvenientes de la Biomasa*. Obtenido de Certificado de Eficiencia Energetica: <https://certificadodeeficienciaenergetica.com/articulo/ventajas-e-inconvenientes-biomasa>
- Peluffo, G. (s.f.). *Descripcion de la yuca*. Obtenido de El Cultivo de la Yuca 11 JM: <http://elcultivodelayuca11jm.blogspot.com/>
- Proenza Perez, N. (2011). Gas Pobre: Factibilidad de su uso en los motores ZIL-130 . *Ingenieria Energetica*, 1-8.
- Promart. (s.f.). *Foco ahorrador eco twister 20W E27 luz blanca*. Obtenido de Promart: <https://www.promart.pe/foco-ahorrador-eco-twister-20w--e27-luz-blanca-90258/p>
- Promusa. (s.f.). *Morfologia de la planta del banano*. Obtenido de Promusa: <http://www.promusa.org/Morfolog%C3%ADa+de+la+planta+del+banano>
- Ramirez Rubio, S., Emiro Sierra, F., & Alberto Guerrero, C. (2011). Gasificacion de materiales organicos residuales. *Ingenieria e investigacion*, 17-25.
- Reed, T., & Das, A. (1988). *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. Colorado.
- Riley, Sturges, & Morris. (2001). *Mecanica de materiales*. Mexico: Editorial Limusa, S.A.





- Rodriguez, L. M. (01 de Marzo de 2014). *SlideShare*. Obtenido de Perdidas menores - mecanica de los fluidos: <https://es.slideshare.net/LuismartinRodriguez1/perdidas-menores-mecanica-de-los-fluidos>
- Sánchez Jaramillo, C. Y., Palacio Gallego, O., & Álvarez Álvarez, M. (2006). Diseño de la red de gas natural. *Diseño de la red de gas natural Politecnico Jaime Isaza Cadavid*, 27-40.
- Sanchez Lario, A., & Adrade Guerra, T. (Junio de 2017). Diseño de una planta de gasificación con cogeneración para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial. Madrid.
- Sebastian Nogues, F. (2010). *Energia de la Biomasa. Vol. I*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Secretaria de Energia. (2008). *Energia Biomasa*. Obtenido de Instituto Nacional de Tecnologia Industrial: [http://www.inti.gob.ar/e-renova/erTO/pdf/libro\\_energia\\_biomasa.pdf](http://www.inti.gob.ar/e-renova/erTO/pdf/libro_energia_biomasa.pdf)
- Segura, J. (1993). *Termodinamica tecnica*. Barcelona: Editorial reverté, S.A.
- Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA). (s.f.). *Anuario Estadístico de Producción Agrícola 2017*. Obtenido de Ministerio de Agricultura y Riego: <http://siea.minag.gob.pe/siea/?q=anuario-estadistico-de-produccion-agricola-2017>
- Villegas Legal, J. A. (2012). Simulación numérica de un gasificador de biomasa de flujo concurrente. Ciudad universitaria, México.







APÉNDICE

APÉNDICE 1: Producción de principales cultivos en el Perú 2017

Tabla 78

*Producción de principales cultivos en el Perú, 2017*

Cultivo	Producción nacional (toneladas)	Cultivo	Producción nacional (toneladas)	Cultivo	Producción nacional (toneladas)
Acelga	6,968	Camote	256,434	Haba grano seco	72,818
Ají	41,658	Cañihua	5,037	Haba verde	69,305
Ajo	94,887	Cebada grano	202,974	Kiwicha	2,692
Albahaca	5,975	Cebolla cabeza	722,436	Lechuga	74,099
Apio	31,551	Cebolla china	18,652	Lenteja	2,539
Arracacha	21,142	Col	33,171	Maca	20,710
Arroz cáscara	3,038,766	Coliflor	17,941	Maíz a. duro	1,249,600
Arveja grano seco	50,223	Culantro	19,246	Maíz amiláceo	273,869
Arveja verde	130,645	Espinaca	24,493	Maíz choclo	388,859
Avena grano	19,860	Fresa	24,745	Maíz morado	23,092
Berenjena	261	Frijol castilla	20,341	Maní	5,771
Betarraga	34,687	Frijol grano seco	75,706	Mashua	33,470
Brócoli	52,296	Frijol verde	11,732	Melón	18,942
Caigua	6,815	Frijol loctao	68	Nabo	8,731
Calabaza	13,640	Garbanzo	970	Oca	97,204

Fuente: resumen del anuario estadístico de producción agrícola 2017 (Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), s.f.).





<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>
Olluco	184,385	Sorgo grano	164	Café pergamino	344,910
Pallar grano seco	10,311	Soya	1,581	Caimito	5,722
Pallar verde	4,303	Tarhui	13,783	Camu camu	13,206
Papa	4,776,294	Tomate	220,618	Capulí	478
Páprika	24,213	Trigo	192,099	Carambola	4,179
Pepinillo	3,663,935	Vainita	20,775	Cerezo	3
Pepino	10,028	Yuca	1,196,449	Chirimoya	25,594
Perejil	5,093	Zanahoria	176,866	Cirolero	879
Pimiento	49,194	Zapallo	183,563	Ciruela	6,534
Piquillo	23,520	Zarandaja	2,844	Coco	32,645
Pituca	12,316	Aceituna	80,349	Cocona	9,773
Poroto	20,812	Achiote	5,143	Copoazú	1,677
Quinoa	78,657	Aguaje	65,559	Damasco	196
Rabanito	19,409	Anona	3,203	Dátil	224
Sandía	96,108	Cacao	121,825	Granada	26,587

Fuente: resumen del anuario estadístico de producción agrícola 2017 (Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), s.f.).





<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>
Guanábana	6,970	Membrillo	7,352	Tangelo	112,581
Guayaba	4,445	Naranja	498,454	Taperibá	4,424
Guinda	1,301	Níspero	1,740	Té	2,177
Higo	2,743	Nuez	300	Toronja	6,807
Huasai	802	Pacae	42,932	Umari	3,531
Lima	12,152	Palma aceitera	852,022	Ungurahui	5,686
Limón dulce	4,788	Palta	466,796	Uva	645,012
Limón sutil	167,734	Pan de árbol	5,469	Zapote	9,190
Lúcuma	14,040	Pecana	2,863	Aguaymanto	1,295
Mamey	1,023	Pera	4,267	Alcachofa	145,068
Mandarina	408,025	Pijuayo	48,759	Algodón rama	23,333
Mango	380,859	Pomarrosa	803	Arándanos	52,301
Manzana	149,787	Sacha inchi	2,255	Caña para alcohol	753,428
Marañón	3,248	Sauco	369	Caña para azúcar	9,399,617
Melocotón	45,688	Tamarindo	1,881	Caña para etanol	974,428

Fuente: resumen del anuario estadístico de producción agrícola 2017 (Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), s.f.).





<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción nacional (toneladas)</b>
Espárrago	383,098	Alfalfa	6,503,830
Frijol de palo	3,133	Avena forrajera	2,013,099
Granadilla	56,692	Braquearia	10,625,739
Maracuyá	56,325	Cebada forrajera	458,246
Marigold	112	Gramma azul	373,943
Orégano	17,445	Gramma chilena	568,109
Papaya	177,171	Gramalote	621,883
Piña	494,642	Maíz chala	1,782,914
Plátano	1,981,047	Pasto elefante	2,755,851
Rocoto	38,917	Rye grass	1,836,111
Tumbo	1,288	Trebol	466,008
Tuna	93,019		

Nota: resumen del anuario estadístico de producción agrícola 2017 (Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), s.f.).





## APÉNDICE 2. Producción de principales cultivos en el cusco, 2017

**Tabla 79**

*Producción de principales cultivos en el cusco, 2017*

<b>Cultivo</b>	<b>Producción (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción (toneladas)</b>
Ajo	40	Haba verde	4,731	Soya	162
Arracacha	460	Kiwicha	513	Tarhui	3,057
Arroz cáscara	1,827	Lechuga	1,456	Tomate	906
Arveja grano seco	3,809	Maíz a. duro	3,346	Trigo	17,262
Arveja verde	2,124	Maíz amiláceo	62,054	Vainita	47
Avena grano	8,511	Maíz choclo	39,302	Yuca	26,272
Camote	305	Maní	84	Zanahoria	8,257
Cañihua	246	Mashua	7,174	Zapallo	3,151
Cebada grano	24,071	Oca	15,601	Achiote	2,050
Cebolla cabeza	7,490	Olluco	37,507	Cacao	8,707
Col	1,966	Papa	388,467	Región Cusco	
Coliflor	1,335	Pepino	151	Café pergamino	26,615
Frijol grano seco	1,990	Quinua	3,675	Capuli	59
Garbanzo	68	Rabanito	0	Chirimoya	678
Haba grano seco	19,345	Sandía	102	Cirolero	35

Fuente: resumen del anuario estadístico de producción agrícola 2017 (Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), s.f.).





<b>Cultivo</b>	<b>Producción (toneladas)</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Producción (toneladas)</b>
Lima	2,105	Papaya	4,389
Limón sutil	1,440	Piña	7,625
Mandarina	1,690	Plátano	27,994
Mango	848	Rocoto	750
Manzana	662	Tuna	22,301
Melocotón	1,769	Alfalfa	136,832
Naranja	18,274	Avena forrajera	148,885
Palta	4,868	Cebada forrajera	20,552
Pera	77	Rye grass	29,214
Té	1,489		
Alcachofa	7,240		
Caña para alcohol	30		
Frijol de palo	1,986		
Granadilla	2,992		

Fuente: resumen del anuario estadístico de producción agrícola 2017 (Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA), s.f.).



### APÉNDICE 3. Características morfológicas de los principales cultivos en el Cusco.

La principal limitante para que los residuos de un cultivo sean empleadas como combustible para la gasificación, es la producción. A mayor producción de un cultivo, mayores son los residuos agrícolas generadas.

En la tabla 6 se muestra una lista de los cultivos de mayor producción en el Cusco. Las características de los residuos generados en los cultivos son diferentes en cada caso, estos son:

#### 3.1 Papa.

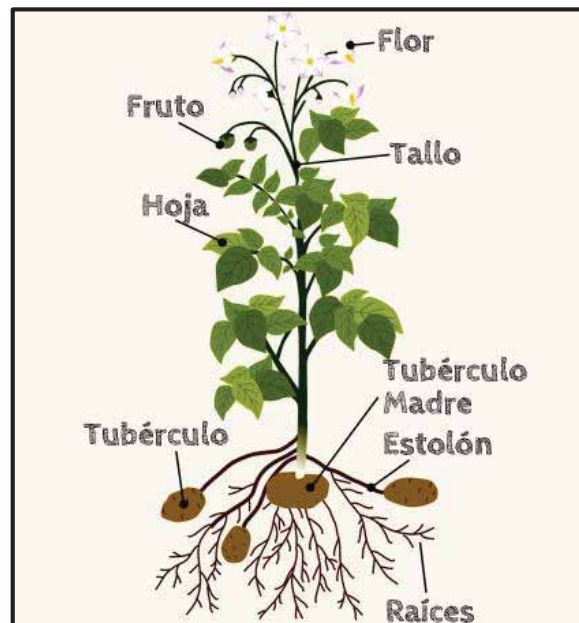


Figura 70. Morfología de la planta de papa. Fuente: [http://www.patatasalacarta.com/im/planta\\_patata.jpg](http://www.patatasalacarta.com/im/planta_patata.jpg).

La parte consumible de la planta de la papa, es solo el tubérculo. El restante de las partes es considerado como residuo, los mismos que muchas veces son abandonados en los campos de cultivo. La flor, el fruto y las hojas generalmente se desprenden mucho antes que el tallo y las raíces, por ello estas partes son difícilmente aprovechables como fuentes de energía. El tallo y la raíz, son materias orgánicas duras cuando pierden humedad, son estas partes las más viables para



poder ser usadas como fuente energética, aunque requieren de un tratamiento especial antes de emplearlas.

### 3.2 Alfalfa.



**Figura 71. Imagen de la alfalfa.** Fuente: <http://unmundodeinfusiones.pharmadus.com/wp-content/uploads/2012/05/alfalfa.jpg>.

La alfalfa es una planta que mayormente se emplea como forraje, para la alimentación de animales. La principal característica de la alfalfa es su capacidad de rebrotar, cualidad por la cual es una planta permanente.

La alfalfa puede ser aprovechada en su totalidad como fuente energética, previo tratamiento de trituración y compactación probablemente. La humedad que posee esta planta se desprende fácilmente cuando es expuesta a la radiación solar.







### 3.3 *Avena forrajera.*



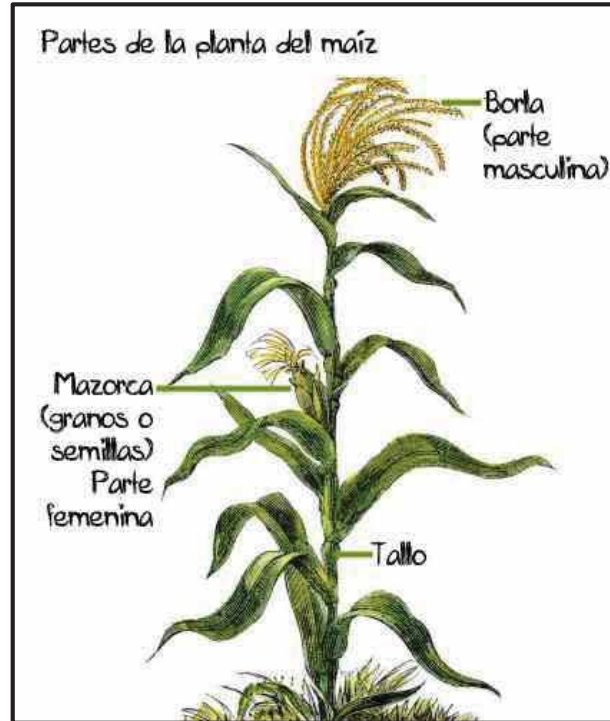
**Figura 72. Imagen de la avena forrajera.** Fuente: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2d/Avena\\_sativa\\_002.JPG/220px-Avena\\_sativa\\_002.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2d/Avena_sativa_002.JPG/220px-Avena_sativa_002.JPG).

La avena forrajera es una planta empleada mayormente como forraje para los animales. El grano de la avena también es utilizado como alimento para los animales y en menor escala se emplea como alimento para consumo humano.

Para emplear la avena como combustible para la quema, necesariamente se debe realizar cultivos energéticos de esta planta, pues estas plantas son generalmente aprovechadas en su totalidad en los fines para los cuales son cultivadas (forraje), no quedando residuos.



### 3.4 Maíz amiláceo.



**Figura 73. Partes de la planta del maíz.** Fuente: <https://www.partesdel.com/wp-content/uploads/partes-del-maiz.jpg>.

En el cultivo del maíz se tiene mayor volumen de residuos que los propios granos del maíz (aprovechable para el consumo). Entre las partes consideradas como residuo tenemos: el tallo, las hojas, la coronta y la panoja.

Para emplear los residuos del maíz como fuente energética para la gasificación, necesariamente se debe realizar el pretratamiento de trituración, por las dimensiones que presenta esta planta. La parte de mayor humedad en la planta es el tallo.

### 3.5 Maíz choclo.

El maíz choclo procede de una planta de maíz, en forma similar al caso anterior. Los residuos generados de esta planta también son empleados como forraje para la alimentación de animales.

Si se desea emplear estos residuos como combustible para la quema, es necesario un periodo de secado, pues presenta bastante humedad en los tallos.

### 3.6 Olluco.



**Figura 74. Imagen de la planta de olluco.** Fuente: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/21/Ullucus\\_tuberosus.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/21/Ullucus_tuberosus.jpg).

Los residuos de la planta de olluco son principalmente las hojas, las flores y el tallo. Estos residuos pueden ser un potencial para el aprovechamiento energético (por medios termoquímicos), sin embargo, no existen muchos estudios al respecto. El tallo de la planta del olluco es duro cuando pierde la humedad, esta parte de la planta sería la más aprovechable en procesos de gasificación.



### 3.7 Rye Grass.



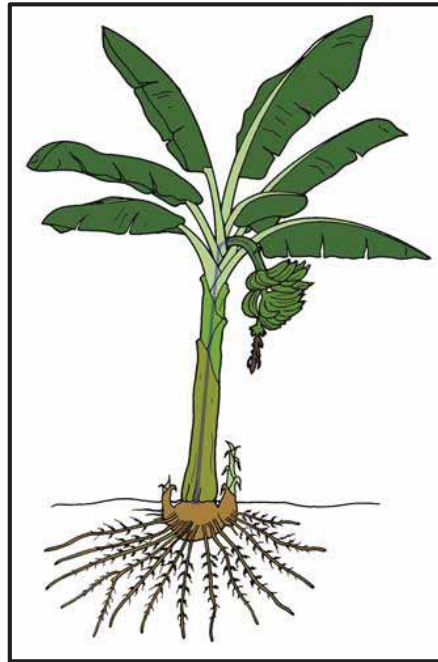
**Figura 75. Imagen de la planta del rye Grass.** Fuente: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3b/Raigras\\_ita.jpg/240px-Raigras\\_ita.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3b/Raigras_ita.jpg/240px-Raigras_ita.jpg).

La planta del rye grass es empleada en su totalidad como forraje, para la alimentación de animales. Si se desea emplear esta planta como combustible para la gasificación, será necesario realizar cultivos energéticos. Por las características que presenta esta planta es probable la necesidad de triturar y compactar, antes de emplearlo en un gasificador.





### 3.8 Plátano.



**Figura 76. Imagen de la planta del plátano.** Fuente: <http://www.promusa.org/display2291>.

La planta de bananos es una hierba perenne de gran tamaño. Se la considera una hierba porque sus partes aéreas mueren y caen al suelo cuando termina la estación de cultivo, y es perenne porque de la base de la planta surge un brote llamado hijo, que reemplaza a la planta madre. (Promusa, s.f.)

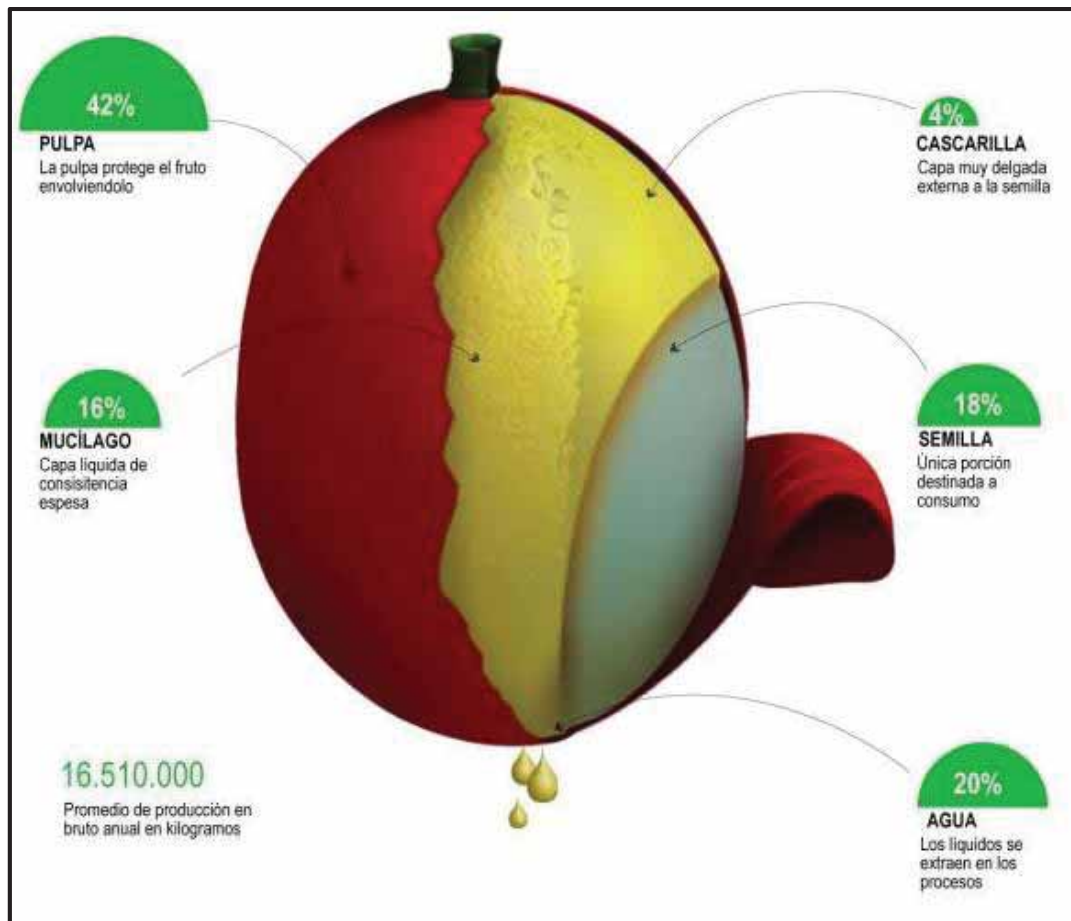
El principal residuo de la planta del plátano es la poda de las hojas, estos requieren necesariamente un pretratamiento de triturado antes de su gasificación, por el tamaño que presentan.

### 3.9 Café pergamino.

Las mayores cantidades de residuos en las plantas de café provienen de los granos, también llamadas cerezas de café. La cereza de café en estado de madurez es un fruto de color rojo o



amarillo. Los residuos de poda de la propia planta se presentan en una escala muy pequeña. A continuación, se presenta la estructura de un grano de café húmedo (después de la cosecha).



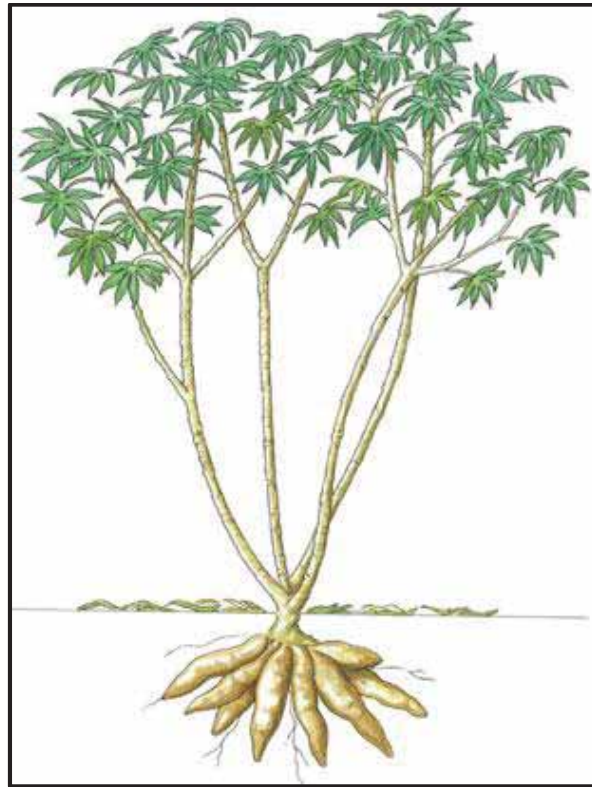
**Figura 77. Composición del grano del café húmedo.** Fuente: <https://docplayer.es/docs-images/71/65065235/images/13-0.jpg>.

De la figura 77 se puede apreciar que la mayor cantidad de residuo generado de los frutos del café corresponden a la pulpa, también denominada como broza de café. De la cereza húmeda del café solo es aprovechable la semilla (18%), el restante corresponde a residuos no aprovechables para fines de comercialización.



Por un proceso denominado despulpado se extrae la pulpa del café. La pulpa de café presenta una granulometría casi homogénea y de tamaño reducido, por lo cual no es necesario ningún tipo de pretratamiento de triturado.

### 3.10 Yuca.



**Figura 78. Imagen de la planta de la yuca.** Fuente: <http://www.fao.org/ag/save-and-grow/cassava/images/cassava.jpg>.

Los residuos de la planta de la yuca son principalmente los tallos, flores y las hojas. El diámetro del tallo oscila entre 2 y 6 cm y la altura de la planta entre 1 y 3 metros (Peluffo, s.f.). La yuca es una planta perenne leñosa, el principal residuo corresponde al tallo, el cual es duro y largo, por lo que es necesario un pretratamiento de triturado posiblemente.





## APÉNDICE 4. Composición aproximada de los gases a la salida del gasificador

### Estimación de la cantidad de aire requerido para la gasificación

Durante el proceso de gasificación se produce principalmente monóxido de carbono ( $CO$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), hidrógeno ( $H_2$ ) y metano ( $CH_4$ ). Existen dos métodos para estimar la cantidad de aire necesario para el proceso de gasificación. El primero consiste en calcular la cantidad de aire requerido para una combustión completa y luego usar de un 25% a 30% de dicha cantidad. Para el segundo método, se requiere conocer la composición típica de gases de salida de un gasificador de características semejantes al que se pretende diseñar, y la composición química del material biomásico que entra al equipo, teniendo estos datos de entrada, es posible estimar la cantidad de aire necesario (Mairena Calvo, 2010).

Para nuestro trabajo de tesis emplearemos el segundo método, a través del cual estimaremos la cantidad de aire que se requiere para la gasificación, así como la composición del gas producido.

A continuación, definiremos los diferentes términos que intervienen en los distintos cálculos.

$Y_{CO}$ : fracción de C que se transforma en  $CO$  del total de carbono presente en la biomasa.

$Y_{CO_2}$ : fracción de C que se transforma en  $CO_2$  del total de carbono presente en la biomasa.

$1 - Y_{CO} - Y_{CO_2}$ : fracción de C que se transforma en  $CH_4$  del total de carbono presente en la biomasa.

$$m_{O_2/CO} \dot{m}_{pc}$$

$\dot{m}_{O_2/CO_2}$ : flujo másico de oxígeno consumida para la obtención del  $CO_2$ .

$\dot{m}_{O_2/CO}$ : flujo másico de oxígeno consumida para la obtención del  $CO$ .

$\dot{m}_{O_2/gasi}$ : flujo másico de oxígeno requerido para la gasificación.

$\dot{m}_{pcs}$ : flujo másico de pulpa de café seca.

$\dot{m}_{aire}$ : flujo másico de aire requerido para la gasificación.







$f_C$ : fracción de carbono presente en la composición elemental de la broza.

$f_O$ : fracción de oxígeno presente en la composición elemental de la broza.

$M_{aire}$ : peso molecular del aire.

$M_{O_2}$ : peso molecular del oxígeno.

$M_C$ : peso molecular del carbono

A continuación, se muestra las reacciones a considerar para la estimación de la cantidad de oxígeno requerido y la composición de los gases producidos.

1.  $C + O_2 \longrightarrow CO_2$
2.  $C + 1/2O_2 \longrightarrow CO$
3.  $H_2 + 1/2O_2 \longrightarrow H_2O$
4.  $C + 4H \longrightarrow CH_4$

El flujo másico de oxígeno consumido para la obtención del  $CO_2$  se determina mediante la siguiente ecuación (Mairena Calvo, 2010):

$$\dot{m}_{O_2/CO_2} = \frac{\dot{m}_{pcs} * f_C * Y_{CO_2} * M_{O_2}}{M_C}$$

El flujo másico de oxígeno consumido para la obtención del  $CO$  se determina mediante la siguiente ecuación (Mairena Calvo, 2010):

$$\dot{m}_{O_2/CO} = \frac{\dot{m}_{pcs} * f_C * Y_{CO} * M_{O_2}}{2M_C}$$

En la ecuación anterior el 2 en el denominador se debe a que se pueden producir 2 moléculas de monóxido de carbono por cada molécula de oxígeno (Mairena Calvo, 2010).

El flujo másico de oxígeno consumido en la gasificación será:

$$\dot{m}_{O_2/gasi} = \dot{m}_{O_2/CO_2} + \dot{m}_{O_2/CO} = \frac{\dot{m}_{pcs} * f_C * M_{O_2}}{M_C} \left( \frac{Y_{CO}}{2} + Y_{CO_2} \right)$$





Sin embargo, de acuerdo a la composición química del material biomásico, ya hay oxígeno presente en la biomasa (Mairena Calvo, 2010). Por lo tanto, el flujo másico de oxígeno requerido para el proceso de gasificación será menor y estará dado por (Mairena Calvo, 2010):

$$\dot{m}_{O_2/gasi} = \frac{\dot{m}_{pcs} * f_C * M_{O_2}}{M_C} \left( \frac{Y_{CO}}{2} + Y_{CO_2} \right) - \dot{m}_{pcs} * f_O$$

Por otro lado, otra forma de llegar al resultado anterior, consiste en estimar la cantidad de oxígeno requerido para el 25% de una combustión completa (Mairena Calvo, 2010).

Es importante definir aquí el término relación de equivalencia (ER), que es un parámetro importante en el diseño del gasificador. La relación de equivalencia es la relación entre la relación aire/combustible real y la relación aire/combustible estequiométrico. Este término generalmente se usa para situaciones de deficiencia de aire (Basu, 2010).

$$ER(< 1.0)_{gasificacion} = \frac{\text{relacion aire/combustible real } (r_{a/c_{real}})}{\text{relacion aire/combustible estequimetrico } (r_{a/c_{estequimetrico}})}$$

Para gasificadores downdraft el mejor rendimiento se da para una ER de 0.25 Reed and Das, 1988 como se citó en (Basu, 2010).

Si bien es cierto ya tenemos la cantidad de flujo másico de oxígeno requerido, pero es necesario expresar esto en términos de flujo másico de aire, pues al equipo no se le suministra oxígeno puro, para ello se supondrá que el aire es en porcentaje molar 21% oxígeno y 79% nitrógeno (Mairena Calvo, 2010). Por lo tanto, se tiene que:

$$\frac{\dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_{aire}} = 0.21 * \frac{M_{O_2}}{M_{aire}}$$

Realizamos el cálculo numérico, teniendo las siguientes consideraciones:

Se considera que  $Y_{CO} = 0.6$  y  $Y_{CO_2} = 0.36$ , que son valores típicos en un proceso de gasificación (Mairena Calvo, 2010).





**Tabla 80**

*Datos para cálculo de flujo másico de aire en función de la pulpa seca de café*

Datos	Valor
$f_c$	0.5133
$f_o$	0.3865
$M_{aire}$	28.84 Kg/Kmol
$M_{O_2}$	32 Kg/Kmol
$M_C$	12 Kg/Kmol

Fuente: elaboración propia

$$\dot{m}_{O_2/gasi} = \frac{\dot{m}_{pcs} * 0.5133 * 32}{12} \left( \frac{0.6}{2} + 0.36 \right) - \dot{m}_{pcs} * 0.3865 = 0.5169\dot{m}_{pcs}$$

Entonces la cantidad de aire para la gasificación será:

$$\frac{\dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_{aire}} = 0.21 * \frac{M_{O_2}}{M_{aire}}$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{\dot{m}_{O_2} * M_{aire}}{0.21 * M_{O_2}}$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{0.5169\dot{m}_{pcs} * 28.84}{0.21 * 32} = 2.218\dot{m}_{pcs}$$

En la ecuación anterior el flujo másico de aire se mide en Kg/h, así como el flujo másico de la pulpa de café seca.

### **Estimación de la composición de los gases de salida del gasificador**

Para mayor comprensión, se definen los diferentes términos complementarios que intervienen en los distintos cálculos.

$f_H$ : fracción de hidrogeno presente en la composición elemental de la broza.

$M_{CO}$ : peso molecular del monóxido de carbono.

$M_{CO_2}$ : peso molecular del dióxido de carbono.





$M_{CH_4}$ : peso molecular del metano.

$M_{H_2}$ : peso molecular del hidrógeno.

$M_{N_2}$ : peso molecular del nitrógeno.

$\dot{m}_{CO}$ : flujo másico del monóxido de carbono.

$\dot{m}_{CO_2}$ : flujo másico del dióxido de carbono.

$\dot{m}_{CH_4}$ : flujo másico del metano.

$\dot{m}_{H_2}$ : flujo másico del hidrógeno.

$\dot{m}_{N_2}$ : flujo másico del nitrógeno.

El flujo másico del monóxido de carbono en función del flujo másico de la pulpa de café seca es (Mairena Calvo, 2010):

$$\dot{m}_{CO} = \frac{\dot{m}_{pcs} * f_C * Y_{CO} * M_{CO}}{M_C}$$

El flujo másico del dióxido de carbono en función del flujo másico de la pulpa de café seca es (Mairena Calvo, 2010):

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{pcs} * f_C * Y_{CO_2} * M_{CO_2}}{M_C}$$

La fracción restante de carbono que no forma monóxido de carbono ni dióxido de carbono forma metano, por lo cual (Mairena Calvo, 2010):

$$\dot{m}_{CH_4} = \frac{\dot{m}_{pcs} * f_C * (1 - Y_{CO} - Y_{CO_2}) * M_{CH_4}}{M_C}$$

Para estimar flujo másico del hidrógeno en los gases de salida, se hará la suposición de que todo el hidrógeno presente en los residuos biomásicos reaccionará, pero parte de él se consumirá para la producción de metano, como lo muestra la fórmula anterior por lo tanto se tendrá que:





$$\dot{m}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{pcs} * f_H * M_{H_2}}{2 * M_H} - 2 * \frac{\dot{m}_{pcs} * f_C * (1 - Y_{CO} - Y_{CO_2}) * M_{H_2}}{M_C}$$

En la fórmula anterior el 2 en el denominador se debe a que se tienen 2 moles de  $H$  por cada mol de  $H_2$ , mientras que el factor 2 del segundo término de la derecha se debe a que se necesitan 2 moles de  $H_2$  para la formación de una molécula de metano ( $CH_4$ ) (Mairena Calvo, 2010).

Para determinar el flujo másico del nitrógeno en los gases de salida, se hará la suposición de que el nitrógeno presente en los residuos biomásicos es despreciable en comparación con la cantidad de nitrógeno presente en el aire usado durante el proceso, y que además forma parte de los desechos que salen como cenizas, de igual manera se supone que el azufre forma parte de las cenizas, por lo tanto todo el nitrógeno ( $N_2$ ) presente en los gases de salida se debe al nitrógeno presente en el aire que entra al equipo y este representa el 79% en volumen del mismo (Mairena Calvo, 2010). Por lo tanto, considerando que por cada 100 moles de aire hay 79 moles de nitrógeno, se puede determinar la cantidad de nitrógeno ( $N_2$ ) en los gases de salida, mediante la siguiente ecuación (Mairena Calvo, 2010):

$$\frac{\dot{m}_{N_2}}{\dot{m}_{aire}} = 0.79 * \frac{M_{N_2}}{M_{aire}}$$

Una vez que se tiene los flujos másicos y el peso molecular de cada componente en función del flujo másico de la pulpa de café seca, se puede obtener la cantidad total de moles de gas ( $n$ ) en unidades de (Kmol/h) y la composición en volumen de los gases de salida, de la siguiente manera (Mairena Calvo, 2010):

$$n = \frac{\dot{m}_{CO}}{M_{CO}} + \frac{\dot{m}_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}} + \frac{\dot{m}_{H_2}}{M_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{N_2}}{M_{N_2}}$$





Para la composición del gas se tiene que para cada componente x, la composición estará dada por:

$$\%n_x = 100 \frac{m_x/M_x}{n} \quad (3.15)$$

**Tabla 81**

*Datos para cálculo de la composición del gas pobre a la salida del gasificador*

Datos	valor
$f_H$	0.0679
$M_{CO}$	28 Kg/Kmol
$M_{CO_2}$	44 Kg/Kmol
$M_{CH_4}$	16 Kg/Kmol
$M_{H_2}$	2 Kg/Kmol
$M_{N_2}$	28 Kg/Kmol
$M_H$	1 Kg/Kmol

Fuente: elaboración propia.

$$\dot{m}_{CO} = \frac{\dot{m}_{pcs} * 0.5133 * 0.6 * 28}{12} = 0.7186\dot{m}_{pcs}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{pcs} * 0.5133 * 0.36 * 44}{12} = 0.6776\dot{m}_{pcs}$$

$$\dot{m}_{CH_4} = \frac{\dot{m}_{pcs} * 0.5133 * (1 - 0.6 - 0.36) * 16}{12} = 0.0274\dot{m}_{pcs}$$

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{pcs} * 0.0679 * 2}{2 * 1} - 2 * \frac{\dot{m}_{pcs} * 0.5133 * (1 - 0.6 - 0.36) * 2}{12} = 0.0611\dot{m}_{pcs}$$

$$\dot{m}_{N_2} = 0.79 * \frac{\dot{m}_{aire} * 28}{28.84} = \frac{79}{103} * 2.218\dot{m}_{pcs} = 1.7015\dot{m}_{pcs}$$

$$n = \frac{0.7186\dot{m}_{pcs}}{28} + \frac{0.6776\dot{m}_{pcs}}{44} + \frac{0.0274\dot{m}_{pcs}}{16} + \frac{0.0611\dot{m}_{pcs}}{2} + \frac{1.7012\dot{m}_{pcs}}{28} = 0.1341\dot{m}_{pcs}$$





**Tabla 82**

*Composición porcentual del gas pobre obtenido de la pulpa de café a la salida del gasificador*

Componente	$\%n_x$	Porcentaje
$CO$	$100 * \frac{0.7186\dot{m}_{pcs}/28}{0.1341\dot{m}_{pcs}}$	19.14
$CO_2$	$100 * \frac{0.6776\dot{m}_{pcs}/44}{0.1341\dot{m}_{pcs}}$	11.49
$CH_4$	$100 * \frac{0.0274\dot{m}_{pcs}/16}{0.1341\dot{m}_{pcs}}$	1.28
$H_2$	$100 * \frac{0.0611\dot{m}_{pcs}/2}{0.1341\dot{m}_{pcs}}$	22.77
$N_2$	$100 * \frac{1.7012\dot{m}_{pcs}/28}{0.1341\dot{m}_{pcs}}$	45.33

Fuente: elaboración propia.





## APÉNDICE 5. Energía eléctrica consumida

**Tabla 83**

*Energía eléctrica consumida*

Hora (h)	Maq. despulpadora (w)	Maq. lavadora (w)	Maq. secadora (w)	Ventiladores (w)	Ilum. planta (w)	Usos de casa (w)	Consumo total (W)
1	745.7	1118.55	745.7	850	200	100	3759.95
2	745.7	1118.55	745.7	850	200	100	3759.95
3	745.7	1118.55	745.7	850	200	100	3759.95
4	745.7	1118.55	745.7	850	200	100	3759.95
5	745.7	1118.55	745.7	850	200	100	3759.95
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	745.7	1118.55	745.7	850	0	300	3759.95
9	745.7	1118.55	745.7	850	0	300	3759.95
10	745.7	1118.55	745.7	850	0	500	3959.95
11	745.7	1118.55	745.7	850	0	500	3959.95
12	745.7	1118.55	745.7	850	0	500	3959.95
13	745.7	1118.55	745.7	850	0	300	3759.95
14	745.7	1118.55	745.7	850	0	300	3759.95
15	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0
17	745.7	1118.55	745.7	850	200	500	4159.95
18	745.7	1118.55	745.7	850	200	500	4159.95
19	745.7	1118.55	745.7	850	200	500	4159.95
20	745.7	1118.55	745.7	850	200	500	4159.95
21	745.7	1118.55	745.7	850	200	500	4159.95
22	745.7	1118.55	745.7	850	200	500	4159.95
23	745.7	1118.55	745.7	850	200	100	3759.95
24	745.7	1118.55	745.7	850	200	100	3759.95

Fuente: elaboración propia







## APÉNDICE 6. Planos

**Tabla 84**

*Listado de planos*

Ítem	Código	Descripción
01	PDG-001	plano de disposición general
02	PDG-002	plano de disposición general gasificador
03	PFG-001	Plano de fabricación gasificador tolva externa
04	PFG-002	Plano de fabricación gasificador cuerpo cilíndrico
05	PFG-003	Plano de fabricación gasificador compuerta de limpieza
06	PFG-004	Plano de fabricación gasificador tubería para salida de gas y aislante
07	PFG-005	Plano de fabricación gasificador acceso para encendido
08	PFG-006	Plano de fabricación gasificador tubería entrada de aire
09	PFG-007	Plano de fabricación gasificador parrilla
10	PFG-008	Plano de fabricación gasificador reactor
11	PFG-009	Plano de fabricación gasificador tolva interna
12	PDGF-001	plano de disposición general y fabricación ciclón
13	PDG-003	plano de disposición general intercambiador
14	PDGF-002	Plano de disposición general y fabricación conexión gasificador ciclón
15	PDGF-003	Plano de disposición general y fabricación conexión ciclón intercambiador
16	PDGF-004	Plano de disposición general y fabricación conexión intercambiador generador eléctrico
17	PDGF-005	Plano de disposición general y fabricación conexión ingreso de aire
18	PDGF-006	Plano de disposición general y fabricación conexión salida de aire
19	PDGF-007	Plano de disposición general y fabricación bastidor

Fuente: elaboración propia



## ANEXOS

### ANEXO 1. Ficha técnica de equipos consumidores de energía eléctrica.

#### Ficha técnica de la despulpadora

I. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	
Máquina que despulpa y selecciona los granos de café. No lesiona granos (regular adecuadamente), no pierde granos en las cáscaras, despulpadora de tambor con regulador de acuerdo al tamaño del grano y poco consumo de agua.	

II. DATOS TÉCNICOS	
<b>Marca</b>	INDYA INDUSTRIAS YAPANGO
<b>Modelo</b>	2 Canales    4 Canales
<b>Potencia (Hp)</b>	1                    2
<b>Productividad (kg/h)</b>	800                1,600
<b>Productividad qq(46kg)/h</b>	17                    34
<b>Voltaje (voltios)</b>	220
<b>Suministro(1Ø o 3Ø)</b>	Monofásico
<b>Vida útil (años)</b>	10
<b>Peso (Kg)</b>	80                    120
<b>Para su instalación requiere</b>	Interruptor Termo magnético de 30 amperios

III. COSTOS DE FUNCIONAMIENTO	
<b>Costo de electricidad S/./hora</b>	S/. 1.00/Hr aproximadamente con tarifa BT5B (S/.0.40/kwh)
<b>Repuestos que utiliza la máquina</b>	Correas, cojinetes, etc.
<b>Insumos para la máquina</b>	90 litros por Hora de agua para el despulpado,
<b>Mano de obra necesaria</b>	2 personas; 1 para carga y 1 para recepción

IV. RECOMENDACIONES	
Solicitar siempre un manual o catálogo de funcionamiento de la máquina. Solicitar una capacitación previa del uso de la máquina. Solicitar tiempo de garantía.	

V. DONDE SE PUEDE COMPRAR	
<b>Empresa que comercializa</b>	INDYA – INDUSTRIAS YAPANGO
<b>Costo aproximado 2 canales</b>	S/.1,200 .00
<b>4 canales</b>	S/.1,500 .00
<b>Garantía</b>	2 años
<b>Dirección tienda</b>	Av. Pakamuros Km 20 Sector Linderos,( Salida San Ignacio); Jaén Cajamarca
<b>Teléfonos</b>	076- 434402; 976174985; 976174984; RPM *720134 - * 720129
<b>Dirección electrónica</b>	Ventas_indya@hotmail.com Elijos25@hotmail.com Elí José Yapango Livia María Yapango Livia



Figura 79. Ficha técnica de la despulpadora. Fuente: (Cooperación alemana al desarrollo-GIZ, 2013).

Ficha técnica de la lavadora

I. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO			
Máquina que limpia el grano de toda impureza luego del despulpado. Se recupera el 2% de Peso, ahorro en consumo de agua.			
II. DATOS TÉCNICOS			
Marca	IMSA		
Modelo	1-D	2-D	3-D
Potencia (Hp)	1.5	2.0	2.0
Productividad (kg/h)	900	1,700	2,500
Productividad qq(46kg)/h	19	37	54
Voltaje (voltios)	220 ó 380		
Suministro(1Ø o 3Ø)	Trifásico		
Vida útil (años)	10		
Peso (Kg)	38	48	58
Para su instalación requiere	Interruptor Termo magnético de 30 amperios		
III. COSTOS DE FUNCIONAMIENTO			
Costo de electricidad S/./hora			
1D	S/.1.50/h		
2D	S/. 2.00/h		
3D	S/. 2.00/h		
	aproximadamente con tarifa BT5B (S/.0.40/kwh)		
Repuestos que utiliza la máquina	Correas, cojinetes, etc.		
Insumos para la máquina	203 litros por Hora de agua para el despulpado, 1/4 litros de grasa para la maquina.		
Mano de obra necesaria	1 persona; 1 para control		
IV. RECOMENDACIONES			
Solicitar siempre un manual o catálogo de funcionamiento de la máquina.			
Solicitar una capacitación previa del uso de la máquina.			
Solicitar tiempo de garantía.			
V. DONDE SE PUEDE COMPRAR			
Empresa que comercializa	Tecnatrop SRL		
Costo aproximado			
1-D	S/. 4,850.00		
2-D	S/. 6,450.00		
3-D	S/. 8,270.00		
Garantía	2 años		
Dirección tienda	Jr. Vargas Machuca 418 - Urb. Los Ficus Santa Anita - Lima 43		
Teléfonos	(51-1) 478-0186 / 9817-7975 / 9817-7971 - NEXTEL 817*7975 / 817*7971		
Dirección electrónica	tecnatrop@tecnatrop.com / tecnatrop@hotmail.com		



Figura 80. Ficha técnica de la maquina lavadora. Fuente: (Cooperación alemana al desarrollo-GIZ, 2013).

Ficha técnica de la máquina secadora.



**SECADORA ROTATIVA**

Máquina ideal para el deshidratado de granos enteros como café, maíz, cereales, legumbres y otros, gracias a la acción de circulación de aire caliente de lecho fluidizado, generado por quemadores a gas y a la circulación por ventiladores accionados por motores eléctricos.

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:**

MODELOS	SRF 50 AM	SRF 100 AM	SRF 200 AM
FUERZA MOTRIZ EN SISTEMA DE VENTILACIÓN	1 Hp	1.5 Hp	2 Hp
FUERZA MOTRIZ EN SISTEMA DE TRACCIÓN	Monf/Trif	Monf/Trif	Monf/Trif
N° DE BANDEJAS	10 Unidades	16 Unidades	20 Unidades
CAP./Prod. X Horas	50 Kg / Bach	100 Kg/ Bach	200 Kg/ Bach
TIEMPO SECADO	3 Horas	4 Horas	5 Horas
TIPO	Acero Mixto	Acero Mixto	Acero Mixto
PESO BRUTO	200 Kg	300 Kg	400 Kg
ALTURA MÁXIMA	150 Cm	210 Cm	280 Cm

¡Haz tu pedido hoy!

Figura 81. Ficha técnica de la máquina secadora. Fuente: (Famacin del Perú E.I.R.L., s.f.).



Ficha técnica de foco ahorrador.



### Foco Ahorrador Eco Twister 20W E27 Luz Blanca

PHILIPS | SKU: 90258

Producto vendido y despachado por: **PROMART** HOME CENTER

S/ 12.90 - 1 + **AGREGAR**

**DESCRIPCIÓN**

Ilumina tu hogar de forma segura con este foco ahorrador modelo Eco Twister que ofrece la marca Philips. Elaborado con una potencia de 20W, tipo de luz clara y fría, vida útil de 6000 horas y adaptado para un socket de tipo E27.

Marca	Philips
Modelo	Eco Twister
Color	Blanco
Tipo de rosca	E27
Forma del foco	Espiral
Frecuencia	60 Hz
¿Dónde usarlo?	Sala, comedor, dormitorio, etc
Garantía	1 Año

Tipo	Foco Ahorrador
Material	Vidrio/Polycarbonato
Características	80% de ahorro de energía con respecto a los incandescentes.
Color de luz	Fría
Lúmenes	1180
Voltaje	220 V
Recomendaciones de uso	Tiempo mínimo de encendido 2 horas. No apta para dimer.

Figura 82. Ficha técnica de foco ahorrador. Fuente: (Promart, s.f.).





Ficha técnica del generador eléctrico

**GENERADOR PANTHER SERIE PK 7000W MONOFASICO GASOLINERO A/T**  
**KOHLER COMMAND PRO CH440-3056**

**BGE1020305**

**Edipesa**

**Panther KOHLER engines**

**Especificaciones Técnicas**

POTENCIA MAXIMA	7000W
POTENCIA NOMINAL	6500W
VOLTAJE AC MAX.	220V / 31,8A
VOLTAJE DC	12V / 8,3A
FRECUENCIA	60HZ
FASE	MONOFASICO
CAP. DE COMBUSTIBLE	25 LITROS APROX.
CAP. DE ACEITE	1,3 LITROS
NIVEL DE RUIDO	74DBA
DIMENSIONES	69 X 52 X 67 CM
PESO	91KG

**SOPORTE TÉCNICO**

Figura 83. Ficha técnica del generador eléctrico. Fuente: Edipesa





## ANEXO 2. Ficha técnica del acero inoxidable C-304L

### ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO C-304L

**Descripción**

El acero grado 304L presentan buena resistencia a la acción corrosiva, en especial en agua doméstica, ácidos y soluciones alcalinas. Resistencia a la corrosión intercrystalina hasta 350°C. Tiene propiedades mecánicas ligeramente más bajas que el grado 304.

Debido a un carbono controlado, contenido máximo de 0.03%, puede asegurar un buen proceso de soldadura.

**Equivalencias:** WN: 1.4306, JIS: SUS304L.

**Aplicaciones**

Industria alimenticia, construcción y decoración, industria química, criogénica y calderas.

**Composición química**

% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% S	% P
≤ 0.030	≤ 1.00	≤ 2.00	18.0 - 20.0	8.0-12.0	≤ 0.030	≤ 0.045

**Propiedades mecánicas**

Rango de dimensiones	Resistencia a la tracción mín. (MPa)	Límite elástico mín. (MPa)	Elongación mín. %	Reducción área mín. %	Dureza de Suministro
Laminado en caliente	485	170	40	50	200 HB máx.
Laminado en frío hasta 1/2" (12.7mm)	620	310	30	40	
Laminado en frío mayor a 1/2" (12.7mm)	485	170	40	40	

Figura 84. Composición química y propiedades mecánicas del acero inoxidable C-304L. Fuente: Polimetales S.A.C.





**Acabados:**

	EN	ASTM	Tipo de ruta de proceso	Acabado de superficie	Aplicaciones	Comentarios
Laminado en caliente	1D	1/N1	Laminado en caliente, tratado térmicamente, decapado por ácido.	Basto y mate	Tanque de almacenamiento. Construcción Calderas Usado donde el motivo decorativo no es relevante. Aplicaciones estructurales.	Estándar para la mayoría de los tipos de acero para garantizar una buena resistencia a la corrosión. Acabado propio de las planchas más gruesas.
Laminado en frío	2B	2B	Laminado en frío, tratado térmicamente, decapado por ácido, laminación de endurecimiento.	Más liso.	Sirve de base para la mayoría de acabados brillantes y pulidos. Usado en equipos farmacéuticos, equipos para fábrica de papel, Lavandería y tintorería.	Mejores propiedades que el laminado en caliente. Acabado de superficie más común. Buena resistencia a la corrosión, suavidad y planeidad.
	2R	BA	Laminado en frío, recocido brillante.	Muy liso, brillante y reflectante.	Para uso decorativo. Electrodomésticos, utensilios de cocina, instrumental quirúrgico. Equipos de acabado textil.	Menos susceptible alojar contaminantes del aire y fácil de limpiar. Imagen de alta claridad.
Acabado especial	2K	4/ N4	Pulido fino, mecánico, satinado.	Textura en una dirección.	Uso decorativo, sanitario. Equipos lácteos, puerta e interiores de ascensores, escaleras mecánicas, equipo de restaurante, fregaderos.	Rugosidad, Ra transversal <0,5 μm con acabado de superficie de corte limpio. Se recomienda limpiar siempre en dirección a las líneas de pulido, es más fácil de mantener.

Figura 85. Acabados del acero inoxidable C-304L. Fuente: Polimetales S.A.C.







### ANEXO 3. Ficha técnica del acero inoxidable C-310S

#### ACERO INOXIDABLE GRADO C-310S

**Descripción**

El acero inoxidable de excelente resistencia a la temperatura hasta 1150°C en servicio continuo.

Uso limitado en presencia de gases sulfúricos y durante uso prolongado en la escala de temperatura 600°-850°C.

Acero austenítico refractario fabricado bajo la Norma ASTM A240.

**Equivalencias:** WN: 1.4845, JIS: SUH 310.

**Aplicaciones**

Hornos, partes de hornos con cintas transportadoras, gancho para hornos, rodillos, piezas de quemadores, intercambiadores de calor, ventiladores, etc.

**Composición química**

% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% S	% P
≤ 0.08	≤ 1.5	≤ 2.00	24 - 26	19.0-22.0	≤ 0.030	≤ 0.045

**Propiedades mecánicas**

Rango de dimensiones	Resistencia a la tracción mín. (MPa)	Límite elástico mín. (MPa)	Elongación mín. %	Dureza de suministro
Todos	515	205	40	217 HB máx.

Figura 86. Ficha técnica del acero inoxidable C-310S. Fuente: Polimetales S.A.C.





## ANEXO 4. Informe técnico de datos, ventilador V1



### CMA-324-2T 60HZ



Ventiladores centrífugos de media presión y simple aspiración con envolvente y turbina en fundición de aluminio

Ventilador:

- Envolvente en fundición de aluminio
- Turbina en fundición de aluminio
- Modelos 324, 325 y 426 turbina en poliamida, modelo 531-2T-3 turbina en chapa de acero

Motor:

- Motores de eficiencia IE3 para potencias iguales o superiores a 0,75kW, excepto monofásicos, 2 velocidades y 8 polos.
- Motores clase F, con rodamientos a bolas, protección IP55, excepto modelos monofásicos protección IP54
- Motor Multitensión, diseño especial válido para: 220/380V 60Hz, 234/440V 60Hz, 263/400V 60Hz, 277/480V 60Hz
- Temperatura máxima del aire a transportar: -20°C. +120°C, máximo +70°C los modelos con turbina de poliamida

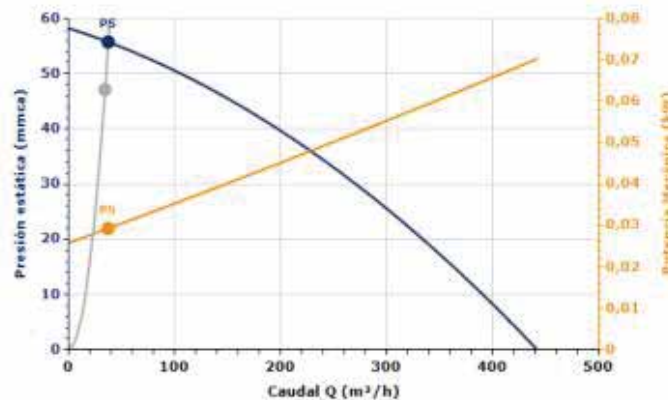
Acabado:

- Anticorrosivo en resina de poliéster polimerizada a 150 °C, previo desengrase con tratamiento nanotecnológico libre de fosfatos.

Bajo demanda:

- Bobinados especiales para diferentes tensiones
- Turbinas en fundición de aluminio para los modelos 324, 325 y 426
- Ventilador preparado para transportar aire hasta 250°C
- Certificación ATEX Categoría 2 (ver serie CMA/ATEX)

#### CURVA CARACTERÍSTICA PARA 0,47KG/M<sup>3</sup>



#### Punto Diseño

Q (m <sup>3</sup> /h)	34,04
Pe (mmca)	47,11

#### Punto Servicio (PS)

Q (m <sup>3</sup> /h)	37,69
Pe (mmca)	55,77
Pd (mmca)	0,2919
Pt (mmca)	50,07
Velocidad (rpm)	3420
Máx. Temp. (°C)	250
Velocidad salida aire (m/s)	3,4859
SFP (kW/m <sup>3</sup> /s)	4,31
Potencia Mecánica (kW)	0,03

#### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	441,90
Velocidad (rpm)	3420
Peso aprox. (kg)	9

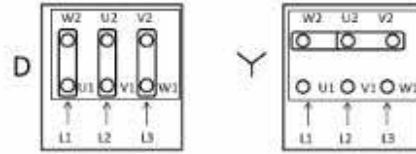




INFORME TÉCNICO DE DATOS

DATOS DEL MOTOR

Potencia Mecánica Nominal (kW)	0,18
Hz/fases	60/3
Motor (rpm)	3300
Polos	2P
Corriente máx. (A) 380-480 V Y	0,70
Corriente máx. (A) 220-277 V D	1,21
Protección del motor	IP55
Tamaño del bastidor del motor	50



Los datos pueden cambiar, por favor consulte la placa del motor

ACCESORIOS DISPONIBLES



Se debe comprobar que el accesorio es adecuado para el modelo de ventilador

DIMENSIONES

A	A1	B	C	C1	C2	øD	ød	ød1	ød2	E	H	H1	øf
311	302	350	268	230	38	80	130	112	M5	145	205	145	108

øK	øk	øO	øO1	V	v	X	x1	Y
62	90	7	9	173	125	90	60	20

Las dimensiones sin unidades definidas explícitamente se muestran en milímetros (mm). Dimensiones dependientes del motor son aproximadas

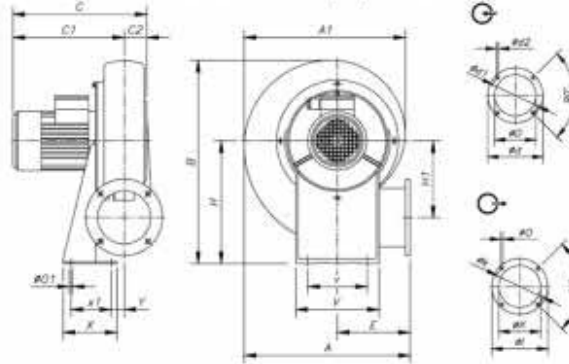


Figura 87. Informe técnico de datos, ventilador 1





## ANEXO 5. Informe técnico de datos, ventilador V2



### CMA-218-2T 60HZ



**Ventiladores centrífugos de media presión y simple aspiración con envolvente y turbina en fundición de aluminio**

**Ventilador:**

- Envolvente en fundición de aluminio
- Turbina en fundición de aluminio
- Modelos 324, 325 y 426 turbina en poliamida, modelo 531-2T-3 turbina en chapa de acero

**Motor:**

- Motores de eficiencia IE3 para potencias iguales o superiores a 0,75kW, excepto monofásicos, 2 velocidades y 8 polos.
- Motores clase F, con rodamientos a bolas, protección IP55, excepto modelos monofásicos protección IP54
- Motor Multitensión, diseño especial válido para: 220/380V 60Hz, 234/440V 60Hz, 205/400V 60Hz, 277/480V 60Hz
- Temperatura máxima del aire a transportar: -20°C. +120°C, máximo +70°C los modelos con turbina de poliamida

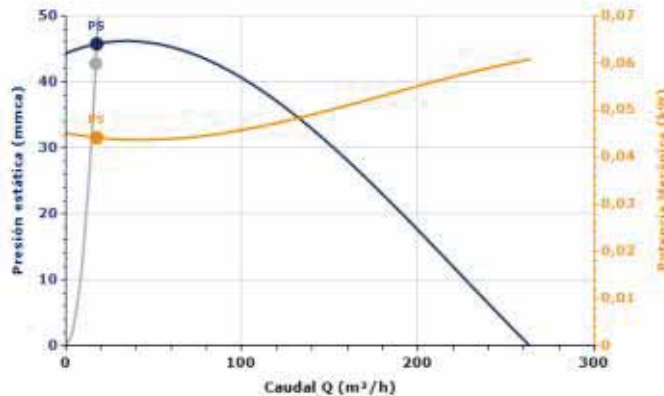
**Acabado:**

- Anticorrosivo en resina de poliéster polimerizada a 190 °C, previo desengrase con tratamiento nanotecnológico libre de fosfatos.

**Bajo demanda:**

- Bobinados especiales para diferentes tensiones
- Turbinas en fundición de aluminio para los modelos 324, 325 y 426
- Ventilador preparado para transportar aire hasta 250°C
- Certificación ATEX Categoría 2 (ver serie CMA/ATEX)

#### CURVA CARACTERÍSTICA PARA 0,93KG/M<sup>3</sup>



#### Punto Diseño

Q (m³/h)	17,16
Pe (mmca)	42,80

#### Punto Servicio (PS)

Q (m³/h)	17,74
Pe (mmca)	43,76
Pd (mmca)	0,2879
Pt (mmca)	40,04
Velocidad (rpm)	3504
Máx. Temp. (°C)	250
Velocidad salida aire (m/s)	2,4642
SFP (kW/m³/s)	13,73
Potencia Mecánica (kW)	0,04

#### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

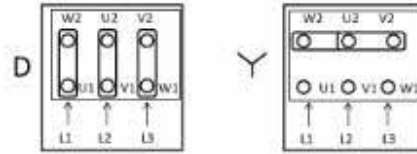
Caudal máximo (m³/h)	263,31
Velocidad (rpm)	3504
Peso aprox. (kg)	0





DATOS DEL MOTOR

Potencia Mecánica Nominal (kW)	0,09
Hz/fases	60/3
Motor (rpm)	3204
Polos	2P
Corriente máx. (A) 380-480 V Y	0,37
Corriente máx. (A) 220-277 V D	0,64
Protección del motor	IP55
Tamaño del bastidor del motor	50



Los datos pueden cambiar, por favor consulte la placa del motor

ACCESORIOS DISPONIBLES



Se debe comprobar que el accesorio es adecuado para el modelo de ventilador

DIMENSIONES

A	A1	B	C	C1	C2	øD	ød	ød1	ød2	E	H	H1	øI
241	230	288	239	207	32	80	113	95	M3	110	170	114,5	90

øK	øk	øO	øO1	V	v	X	x1	Y
54	76	5,5	7	140	100	80	50	20

Las dimensiones sin unidades definidas explícitamente se muestran en milímetros (mm). Dimensiones dependientes del motor son aproximadas

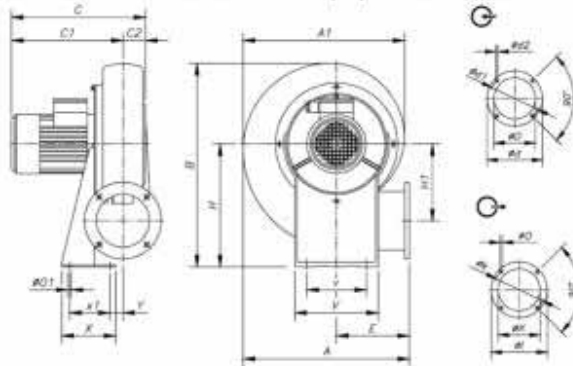


Figura 88. Informe técnico de datos, ventilador 2



## ANEXO 6. Informe técnico de datos, ventilador V3



### CMP-922-4T 60HZ



60Hz



Ventiladores centrífugos de media presión y simple aspiración con envolvente y turbina en chapa de acero

Ventilador:

- Envolvente en chapa de acero
- Turbina con álabes hacia delante, en chapa de acero galvanizado
- Modelo CMP 38-2M envolvente en fundición de aluminio
- Temperatura máxima del aire a transportar: -20°C. + 120°C, máximo +100°C modelo CMP-38

Motor:

- Motores de eficiencia IE3 para potencias iguales o superiores a 0,75kW, excepto monofásicos, 2 velocidades y 8 polos.
- Motores clase F, con rodamientos a bolas, protección IP55, excepto modelos monofásicos protección IP54.
- Modelo CMP-38 protección IP21
- Motor Multitensión, diseño especial válido para: 220/380V 60Hz, 234/440V 60Hz, 265/460V 60Hz, 277/480V 60Hz

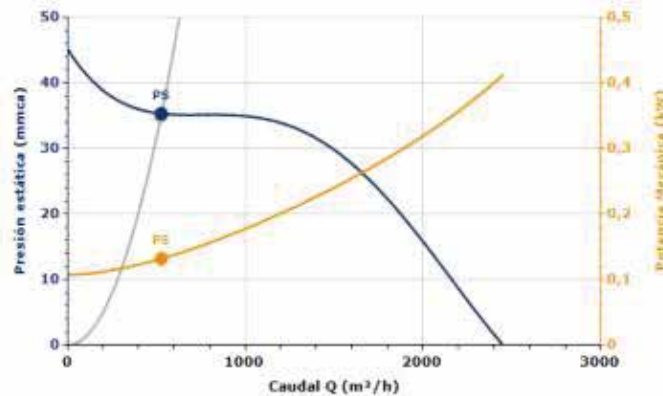
Acabado:

- Anticorrosivo en resina de poliéster polimerizada a 190 °C, previo desengrase con tratamiento nanotecnológico libre de fosfatos.

Bajo demanda:

- Bobinados especiales para diferentes tensiones
- Ventilador preparado para transportar aire hasta 250°C
- Ventilador en acero inoxidable
- Certificación ATEX Categoría 2 (ver serie CMP/ATEX)

#### CURVA CARACTERÍSTICA PARA 1,18KG/M<sup>3</sup>



#### Punto Diseño

Q (m³/h)	526,21
Pe (mmca)	34,88

#### Punto Servicio (PS)

Q (m³/h)	529,49
Pe (mmca)	33,32
Pd (mmca)	1,4461
Pt (mmca)	36,76
Velocidad (rpm)	1674
Máx. Temp. (°C)	250
Velocidad salida aire (m/s)	4,9027
SFP (kW/m³/s)	1,30
Potencia Mecánica (kW)	0,13

#### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

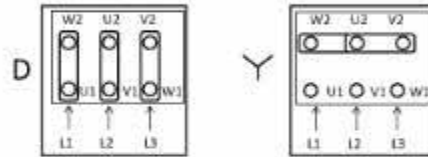
Caudal máximo (m³/h)	2452,11
Velocidad (rpm)	1674
Peso aprox. (kg)	19



INFORME TÉCNICO DE DATOS

DATOS DEL MOTOR

Potencia Mecánica Nominal (kW)	0,55
Hz/fases	60/3
Motor (rpm)	1050
Polos	4P
Corriente máx. (A) 380-480 V Y	1,09
Corriente máx. (A) 220-277 V D	2,92
Protección del motor	IP55
Tamaño del bastidor del motor	80



Los datos pueden cambiar, por favor consulte la placa del motor

ACCESORIOS DISPONIBLES



Se debe comprobar que el accesorio es adecuado para el modelo de ventilador





INFORME TÉCNICO DE DATOS

DIMENSIONES

A	B	C	C1	C2	øD1* [1]	ød	ød1	ød2	E	H	H1	I	J
388,5	455	382,5	309	73,5	224	278	250	M8	180	280	134	204	282,5

J1	K	k2	L	øO	øO1	V	v	X	X1	Y
128	140	180	215	9,5	10,5	290	220	114	50	105

[1] Diámetro nominal tubería recomendada

Las dimensiones sin unidades definidas explícitamente se muestran en milímetros (mm). Dimensiones dependientes del motor son aproximadas

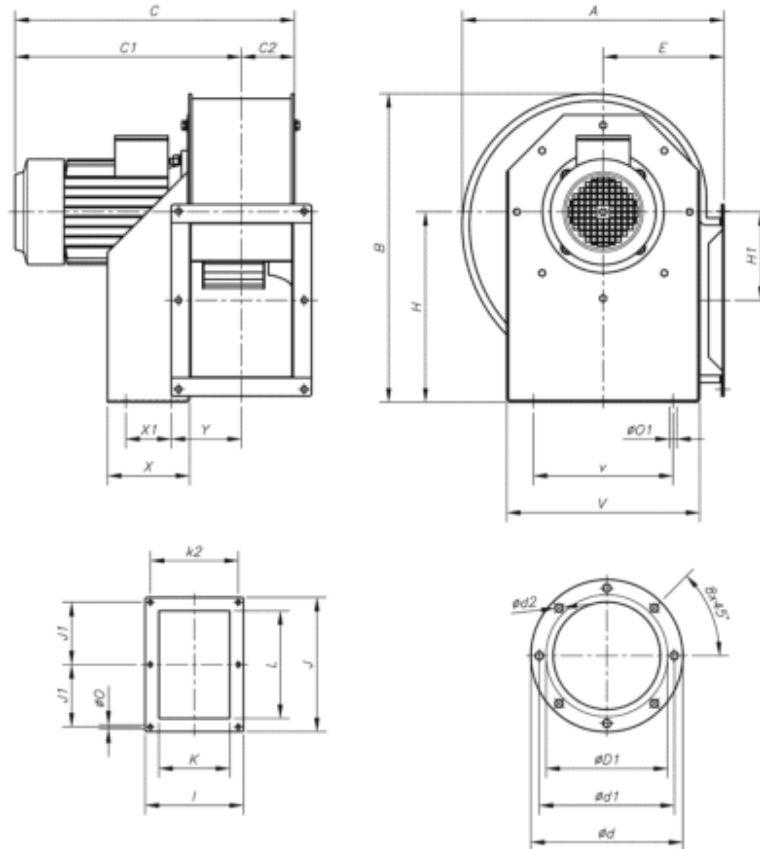


Figura 89. Informe técnico de datos, ventilador 3







**ANEXO 7. Eficiencia de soldaduras**








 INGLESIA	EFICIENCIA DE SOLDADURAS VALORES DE "E"	NORMAS		
		FIGURA No. 1		
TIPOS DE UNIONES NORMA UW-12		EFICIENCIA DE LA UNION CUANDO LA JUNTA ESTA RADIOGRAFIADA		
		AL 100 %	POR PUNTOS	SIN
	SOLDADURA A TOPE UNIDA CON SOLDADURA POR AMBOS LADOS, O BIEN POR OTRO METODO CON LO CUAL SE OBTENGA LA MISMA CALIDAD DEL METAL DE APORTE EN AMBOS LADOS DE LA SUPERFICIE SOLDADA. SI SE USA LA SOLERA DE RESPALDO, DEBERA QUITARSE DESPUES DE APLICAR LA SOLDADURA Y ANTES DE RADIOGRAFIAR.	1.00	0.85	0.70
	SOLDADURA SIMPLE A TOPE CON SOLERA DE RESPALDO LA CUAL PERMANECERA EN EL INTERIOR DEL RECIPIENTE.	0.90	0.80	0.65
	UNION SIMPLE POR UN SOLO LADO SIN SOLERA DE RESPALDO	---	---	0.60
	UNION TRASLAPADA CON DOBLE FILETE	---	---	0.55
	UNION TRASLAPADA CON FILETE SENCILLO Y TAPON DE SOLDADURA	---	---	0.50
	UNION TRASLAPADA CON FILETE SENCILLO SIN TAPON DE SOLDADURA	---	---	0.45

Figura 90. Eficiencia de soldaduras. Fuente: (Leon Estrada, 2001)





## ANEXO 8. Tasa de interés anual para el crédito del sistema

26/10/2019

Caja Cusco



**Simulador de Créditos**

**PASO 1: SIMULA TU CRÉDITO**

Personería:

Tipo:

Zona:

Moneda:  Monto:  Frecuencia:  Plazo:

Calendario:  Desemb.:  F. 1ª Cuota:

\* Cada 30 días

**Calendario Preliminar de Amortizaciones:**

T.E.A.:	14.71 %	Interés Moratorio Anual:	96.00 %
T.C.E.A.:	15.94 %		
Desgravamen:	0.0009		
T.E.A. (Tasa Efectiva Anual) Fija		T.C.E.A. (Tasa de Costo Efectivo Anual)	ITF 0.005 %

Nro.	Fecha	Interés	Interés Diferido	Capital	Saldo	*Seguro Desgravamen	ITF	Cuota Total
					8,800.00			
1	27/11/2019	101.20	0.00	320.48	8,479.52	7.92	0.00	429.60
2	27/12/2019	97.51	0.00	324.17	8,155.35	7.63	0.00	429.31
3	26/01/2020	93.79	0.00	327.90	7,827.45	7.34	0.00	429.02
4	25/02/2020	90.02	0.00	331.67	7,495.79	7.04	0.00	428.73
5	26/03/2020	86.20	0.00	335.48	7,160.31	6.75	0.00	428.43
6	25/04/2020	82.34	0.00	339.34	6,820.97	6.44	0.00	428.13
7	25/05/2020	78.44	0.00	343.24	6,477.73	6.14	0.00	427.82
8	24/06/2020	74.49	0.00	347.19	6,130.54	5.83	0.00	427.51
9	24/07/2020	70.50	0.00	351.18	5,779.36	5.52	0.00	427.20
10	23/08/2020	66.46	0.00	355.22	5,424.14	5.20	0.00	426.88
11	22/09/2020	62.38	0.00	359.30	5,064.83	4.88	0.00	426.56
12	22/10/2020	58.25	0.00	363.44	4,701.39	4.56	0.00	426.24
13	21/11/2020	54.07	0.00	367.62	4,333.78	4.23	0.00	425.91
14	21/12/2020	49.84	0.00	371.84	3,961.93	3.90	0.00	425.58
15	20/01/2021	45.56	0.00	376.12	3,585.81	3.57	0.00	425.25
16	19/02/2021	41.24	0.00	380.45	3,205.37	3.23	0.00	424.91
17	21/03/2021	36.86	0.00	384.82	2,820.55	2.88	0.00	424.57
18	20/04/2021	32.44	0.00	389.25	2,431.30	2.54	0.00	424.22
19	20/05/2021	27.96	0.00	393.72	2,037.58	2.19	0.00	423.87
20	19/06/2021	23.43	0.00	398.25	1,639.33	1.83	0.00	423.52
21	19/07/2021	18.85	0.00	402.83	1,236.50	1.46	0.00	423.16
22	18/08/2021	14.22	0.00	407.46	829.04	1.11	0.00	422.80
23	17/09/2021	9.53	0.00	412.15	416.89	0.75	0.00	422.43
24	17/10/2021	4.79	0.00	416.89	0.00	0.38	0.00	422.06
<b>TOTAL</b>	S/	1,320.38	0.00	8,800.00		103.33	0.00	10,223.71

Nota: El cronograma de cuotas del Crédito Simulado es referencial.  
 \* El costo de la prima de seguro puede ser contratado en la Caja Cusco o puede ser contratado directamente por el cliente y endosado a favor de la Caja Cusco hasta por el monto del saldo adeudado.


<https://zonasegura.cmac-cusco.com.pe/simuladorweb/fmSimuladorCredito.aspx>

1/1





**ANEXO 9. Cotización del intercambiador de calor**



**ASESORES, CONSULTORES Y CONSTRUCTORES  
INGENIEROS E.I.R.L.**  
ASESORÍA INTEGRAL EN PROYECTOS DE ESTACIÓN DE SERVICIO, GRIFOS, CONSUMIDORES DIRECTOS, TRABAJOS EN METAL MECÁNICA E INSTALACIONES DE HIDROCARBUROS

Cusco 15 de octubre del 2019

Sr: Benjamín Barazorda Ramos

**Cotización N° 650**

Por medio del presente le hacemos la cotización de acuerdo a su requerimiento.

01 INTERCAMBIADOR DE CALOR con materiales: acero estructural A-36 y acero inoxidable C-304L. El equipo operará bajo las condiciones de diseño térmico solicitados por el cliente, siendo los siguiente:

PARÁMETROS DE OPERACIÓN				
Ítem	Parámetro	Unidad	Lado	Descripción
1	Temperatura entrada gas pobre	°C	Tubos	338,758
2	Temperatura salida gas pobre	°C	Tubos	30
3	Flujo másico gas pobre	Kg/s	Tubos	0.00455
4	Temperatura entrada aire	°C	Coraza	25
5	Temperatura salida aire	°C	Coraza	55
6	Flujo másico aire	Kg/s	Coraza	0.173


El equipo se diseñará y se fabricará en concordancia a las normas ASME y TEMA, se cotiza en:

Descripción	Costo
Diseño e ingeniería	S/. 1 122.37
Materiales	S/. 6 235.37
Habilitado, fabricación y montaje	S/. 1 247.07
Utilidad	S/. 1 032.58
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>S/. 9 637.38</b>

- Forma de pago 50% adelantado.
- El saldo en la entrega.

El intercambiador de calor será entregado en las instalaciones de nuestro taller.

Atentamente,



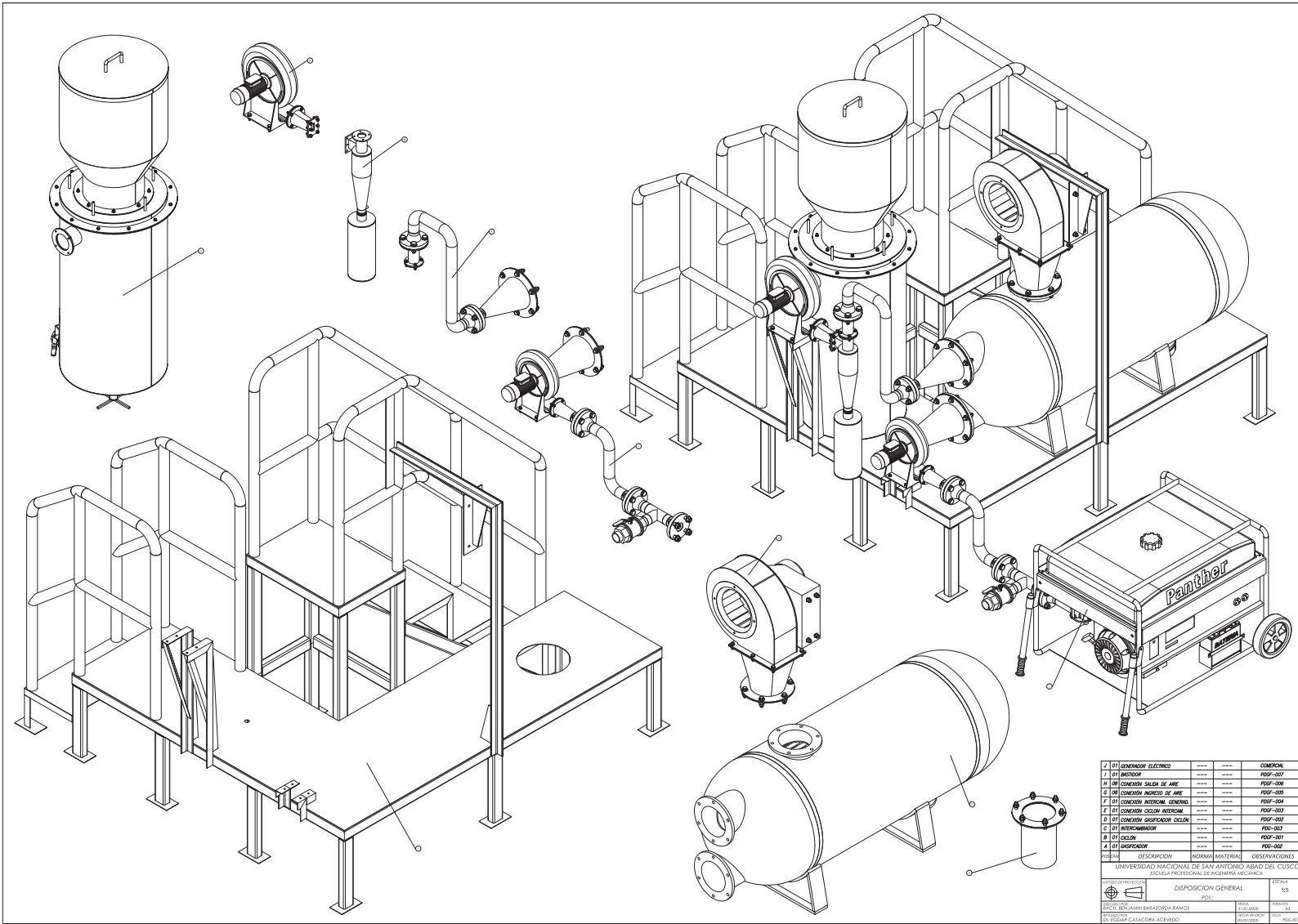
ASESORES J&M INGENIEROS E.I.R.L.  
Javier Surco Cruz  
DISEÑADOR MECÁNICO  
G.E.M.T.E. Q.00000000

URB. TTIO LA FLORIDA H1  
WANCHAO - CUSCO

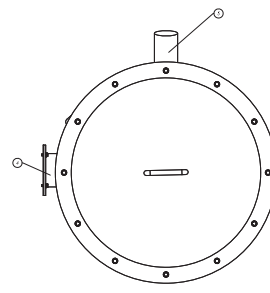
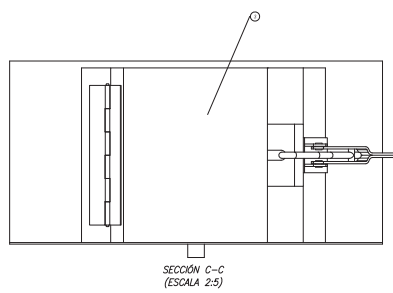
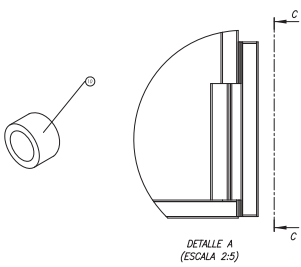
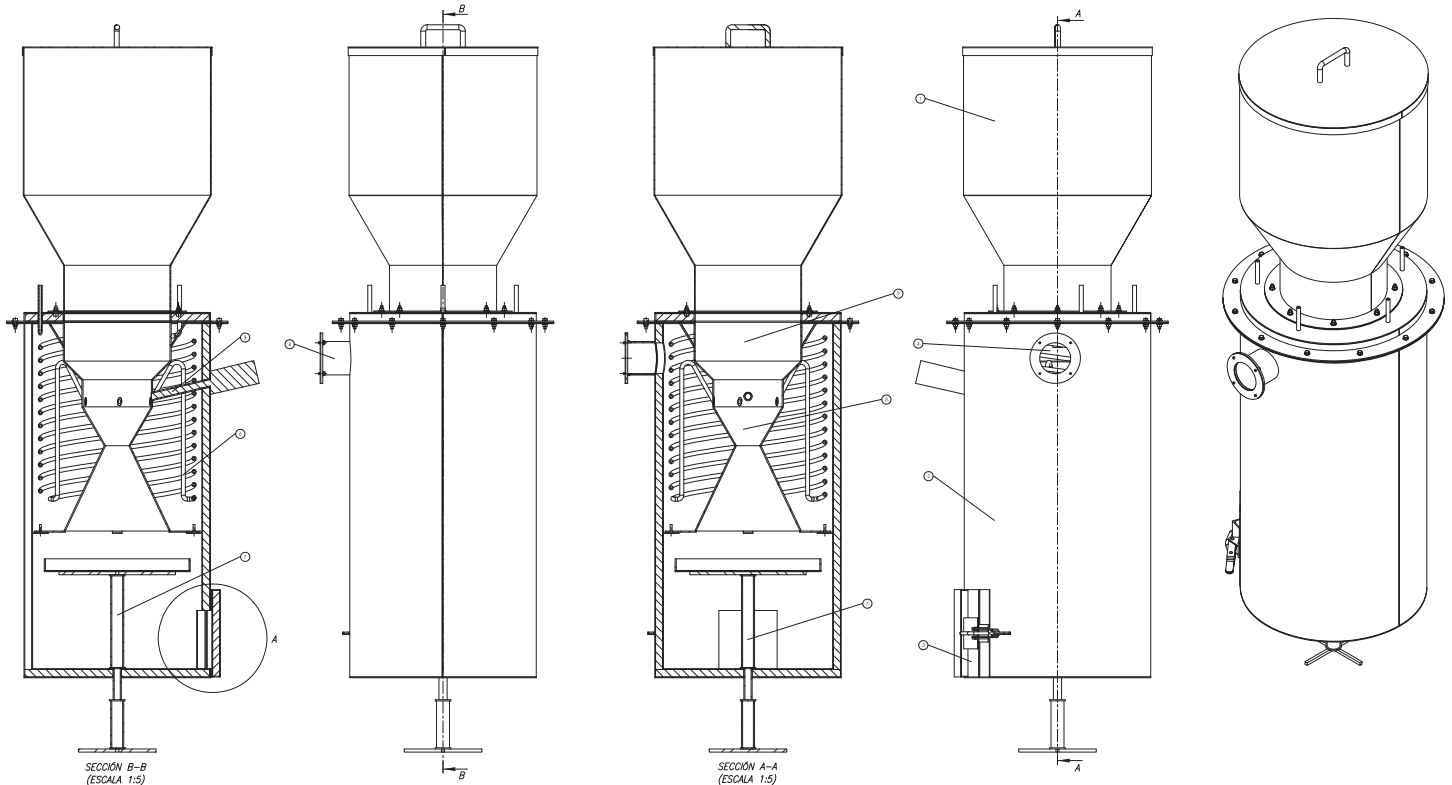
TELF. 403009  
CEL RPC 994884738 RPM 969985225  
javiersurco@hotmail.com

**Figura 91. Cotización del intercambiador de calor**



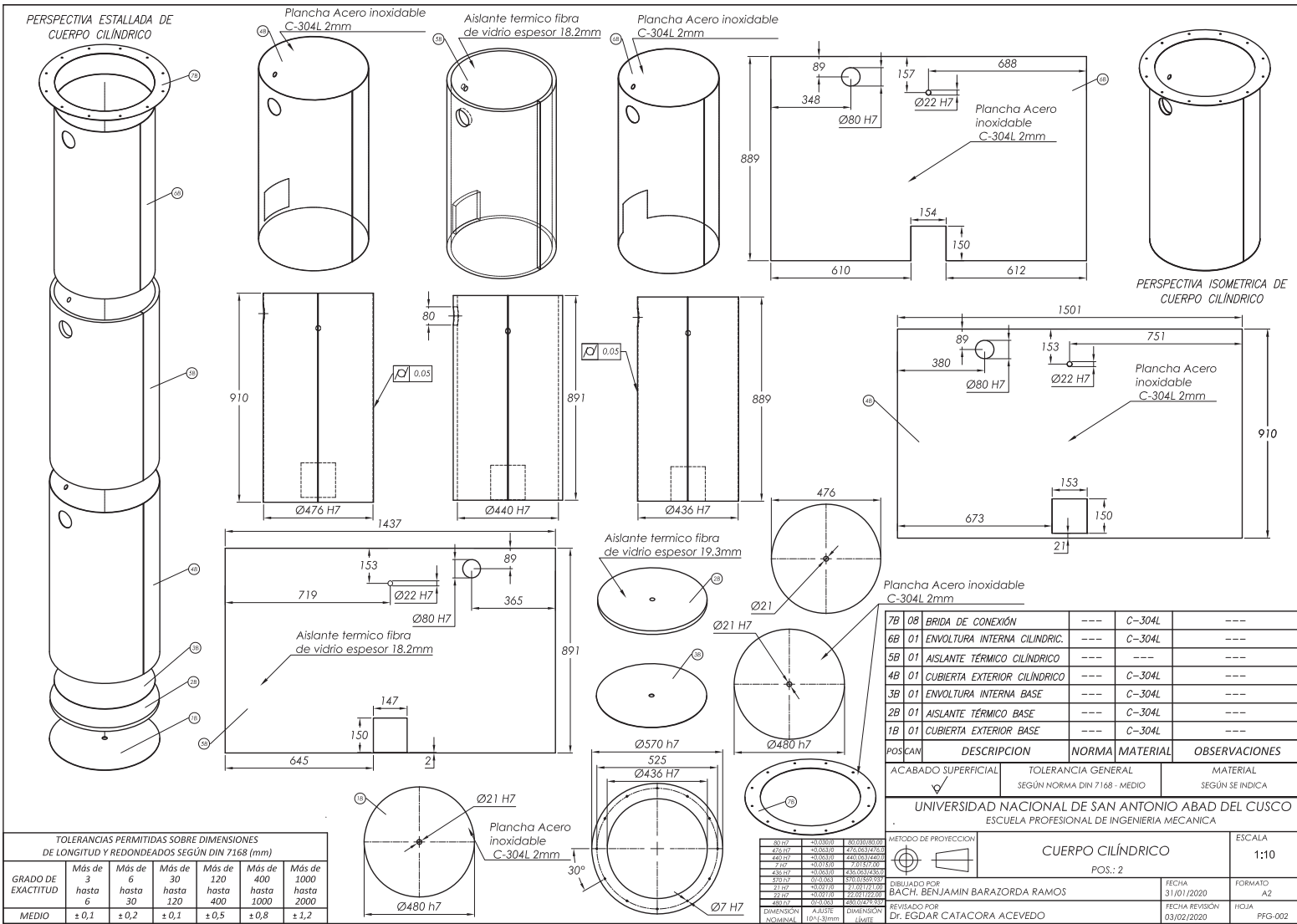


1	OT GENERADOR ELECTRICO	-----	-----	CONEXION
2	OT BASTIDOR	-----	-----	PROF-007
3	OT CONEXION SALIDA DE AIRE	-----	-----	PROF-008
4	OT CONEXION INGRESO DE AIRE	-----	-----	PROF-009
5	OT CONEXION INTERIOR GENERAL	-----	-----	PROF-004
6	OT CONEXION CICLON INTERIOR	-----	-----	PROF-003
7	OT CONEXION SUSPENSION CICLON	-----	-----	PROF-002
8	OT INTERCAMBIADOR	-----	-----	PRO-011
9	OT CICLON	-----	-----	PROF-001
10	OT BASTIDOR	-----	-----	PROF-002
11	DISPOSICION	DISPARA MANTENIMIENTO	DISPOSICIONES	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CIECOTO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA				
DISPOSICION GENERAL				SECCION
PROF.				103
DISEÑADO POR: MARCO ANTONIO RAMOS				REVISADO
FECHA: 01/08/2018				NO.
PROFESOR: CARLOS ACENEDO				FECHA: 01/08/2018
				NO. 103/2017

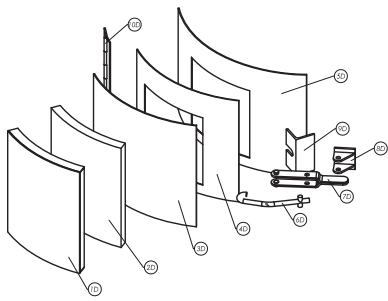


10	01	ASILLANTE TÉRMICO DE TUBERÍA	----	----	PFG-010
9	01	TOLVA INTERNA	----	----	PFG-009
8	08	REACTOR	----	----	PFG-008
7	08	PARRILLA	----	----	PFG-007
6	01	TUBERÍA ENTRADA DE AIRE	----	----	PFG-006
5	01	ACCESO PARA ENCENDIDO	----	----	PFG-005
4	01	TUBERÍA PARA SALIDA DE GAS	----	----	PFG-004
3	01	COMPUERTA DE LIMPIEZA	----	----	PFG-003
2	01	CUERPO CILÍNDRICO	----	----	PFG-002
1	01	TOLVA EXTERNA	----	----	PFG-001
POSICIÓN	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA					
MÉTODO DE PROYECCIÓN		DISPOSICIÓN GENERAL GASIFICADOR			ESCALA
		POSICIÓN A			1:5
DIBUJADO POR BACH. BENJAMÍN BARAZORDA RAMOS		FECHA 31/01/2020	FORMADO		A1
REVISADO POR DR. ESDGAR CATAFORA ACEVEDO		FECHA REVISIÓN 03/02/2020	HOJA		PFG-002

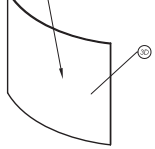




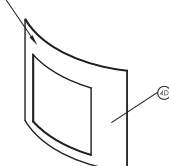
PERSPECTIVA ESTALLADA DE COMPUERTA DE LIMPIEZA



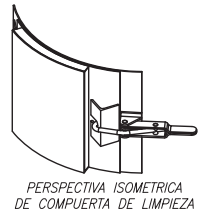
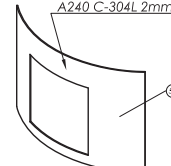
Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L 2mm



Empaquetadura garlock style 9800 espesor 1/16 in

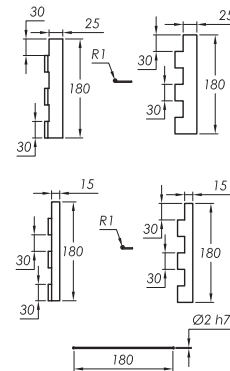


Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L 2mm

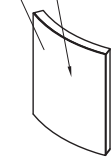


PERSPECTIVA ISOMETRICA DE COMPUERTA DE LIMPIEZA

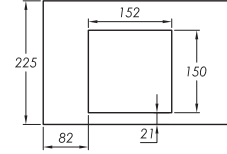
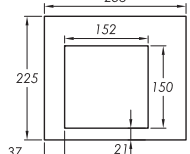
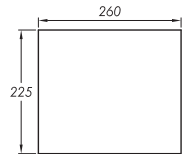
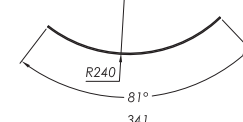
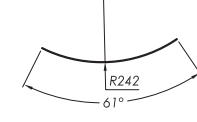
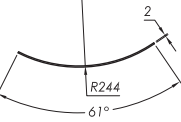
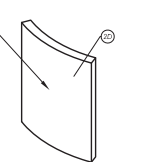
Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L 2mm



Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L 2mm



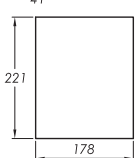
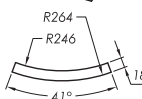
Aislante termico fibra de vidrio espesor 18.25mm



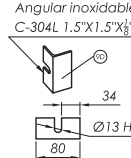
DESPLIEGUE ELEMENTO MÓVIL

DESPLIEGUE EMPAQUE ELEMENTO MÓVIL

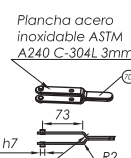
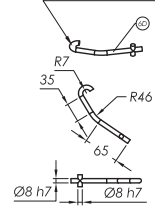
DESPLIEGUE ELEMENTO FIJO



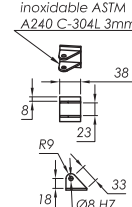
DESPLIEGUE AISLANTE ELEMENTO MÓVIL



Barra lisa inoxidable C-304L



Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L 3mm

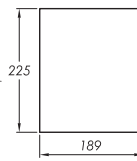


Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L 3mm

TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168 (mm)

GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,2	±0,1	±0,5

DESPLIEGUE COBERTURA ELEMENTO MÓVIL



100	01	BISAGRA	---	C-304L	---
90	01	ELEMENTO DE SUJECIÓN	---	C-304L	---
80	08	SOPORTE DE MANILLA	---	C-304L	---
70	08	MANILLA	---	C-304L	---
60	01	GANCHO	---	C-304L	---
50	01	ELEMENTO FIJO	---	C-304L	---
40	01	EMPAQUE ELEMENTO MÓVIL	---	GARLOCK	---
30	01	ELEMENTO MÓVIL	---	C-304L	---
20	01	AISLANTE ELEMENTO MÓVIL	---	---	---
10	01	COBERTURA ELEMENTO MÓVIL	---	C-304L	---
POSICAN	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES	
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL		
✓	SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO		SEGÚN SE INDICA		
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA					
MÉTODO DE PROYECCION			COMPUERTA DE LIMPIEZA		ESCALA
			POS.: 3		1:5
DIBUJADO POR		FECHA		FORMATO	
BACH. BENJAMIN BARAZORDA RAMOS		31/01/2020		A2	
REVISADO POR		FECHA REVISIÓN		HOJA	
DR. EGDAR CATAORA ACEVEDO		03/02/2020		PFG-03	

DIN	ISO	ISO
13/15	0,0075/0,010	0,001/0,005
8/12	0,012/0,015	0,015/0,020
5/7	0,020/0,025	0,020/0,025



TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168 (mm)				
GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,5

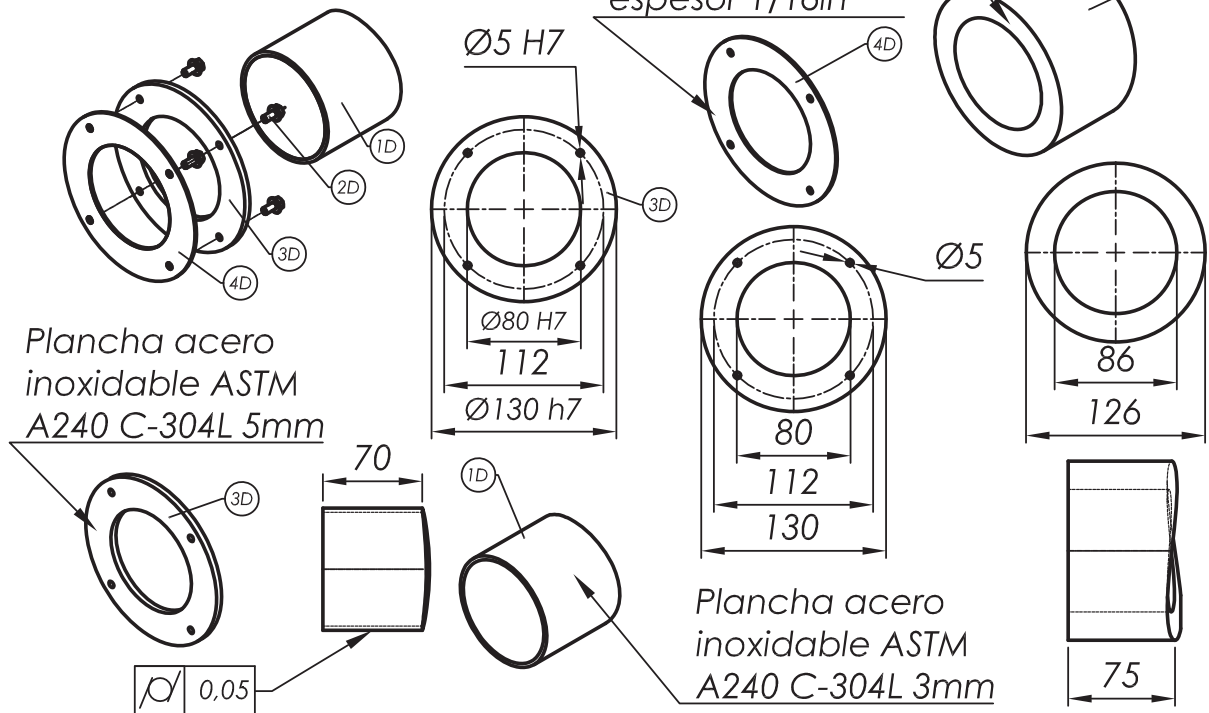
PERSPECTIVA ISOMETRICA



PERSPECTIVA ESTALLADA DE TUBERÍA PARA SALIDADE GAS

Empaquetadura garlock style 9800 espesor 1/16in

Aislante termico fibra de vidrio



Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L 5mm

Plancha acero inoxidable ASTM A240 C-304L 3mm

5D	01	FIBRA DE VIDRIO	---	---	---
4D	01	EMPAQUETADURA	---	GARLOCK	---
3D	01	BRIDA	---	C-304L	---
2D	04	PERNO	DIN 6921	ASTM A325	M5X10
1D	01	TUBERIA SALIDA DE GAS	---	C-304L	---

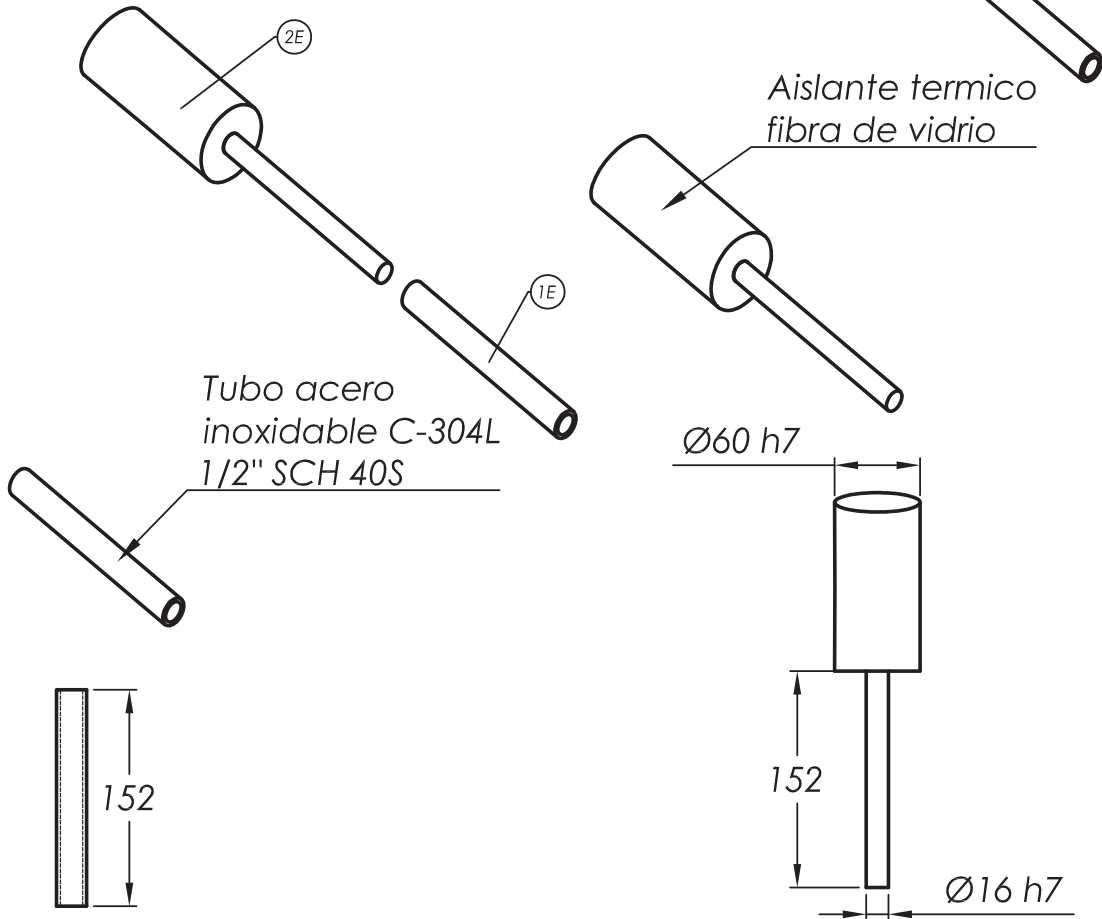
POS	CAN	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
ACABADO SUPERFICIAL		TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL	
✓		SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO		SEGÚN SE INDICA	

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

METODO DE PROYECCION	TUBERÍA PARA SALIDA DE GAS Y AISLANTE POS.: 4 Y 10	ESCALA 1:5
DIBUJADO POR BACH. BENJAMIN BARAZORDA RAMOS	FECHA 31/01/2020	FORMATO A4
REVISADO POR Dr. EGDAR CATAFORA ACEVEDO	FECHA REVISIÓN 03/02/2020	HOJA PFG-004

TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168 (mm)

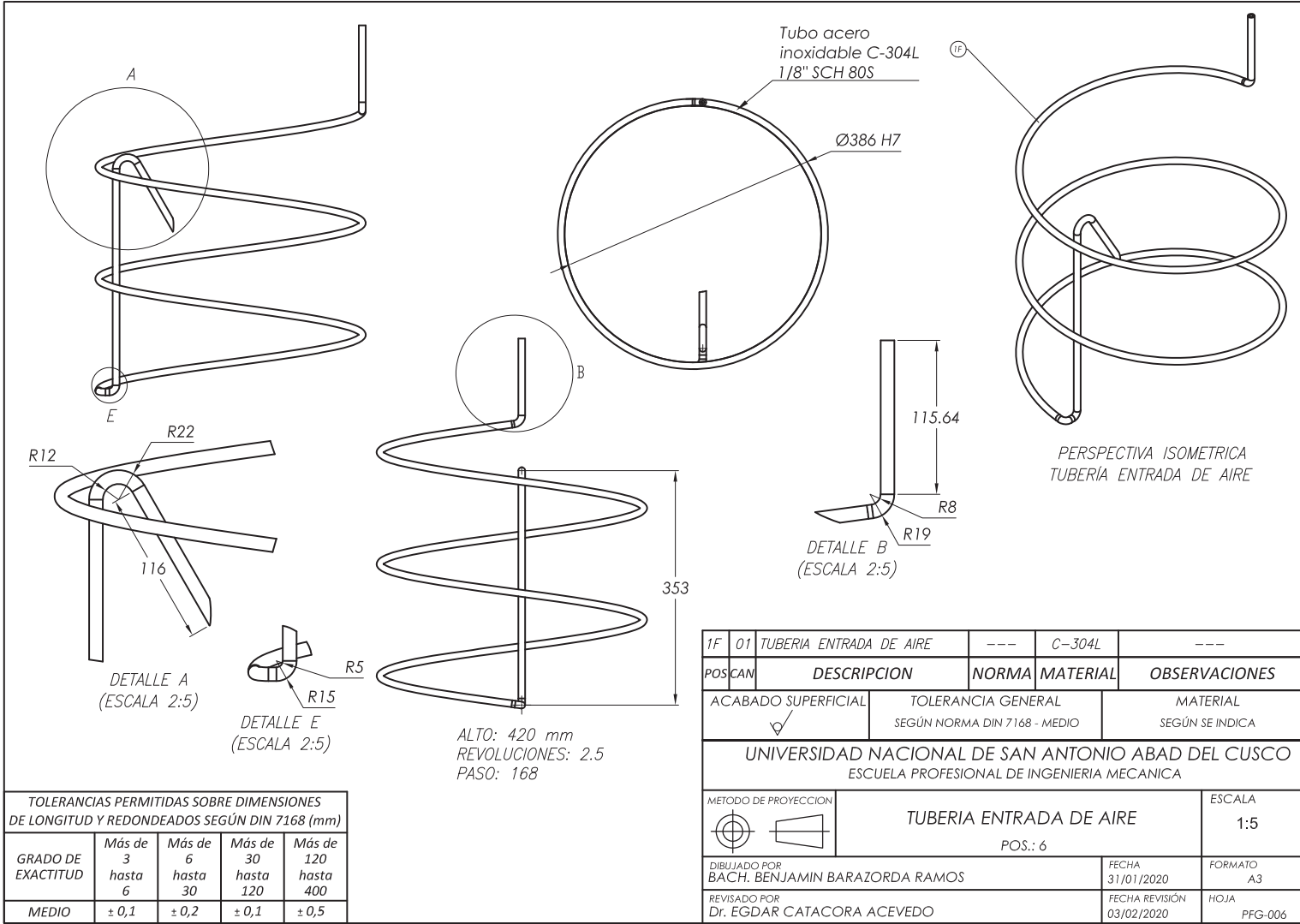
GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,5



2E	01	TAPON DE FIBRA DE VIDRIO	---	---	---
1E	01	TUBERIA PARA ACCESO DE ENCENDIDO	---	C-304L	---
POSCAN		DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
ACABADO SUPERFICIAL		TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL	
✓		SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO		SEGÚN SE INDICA	

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

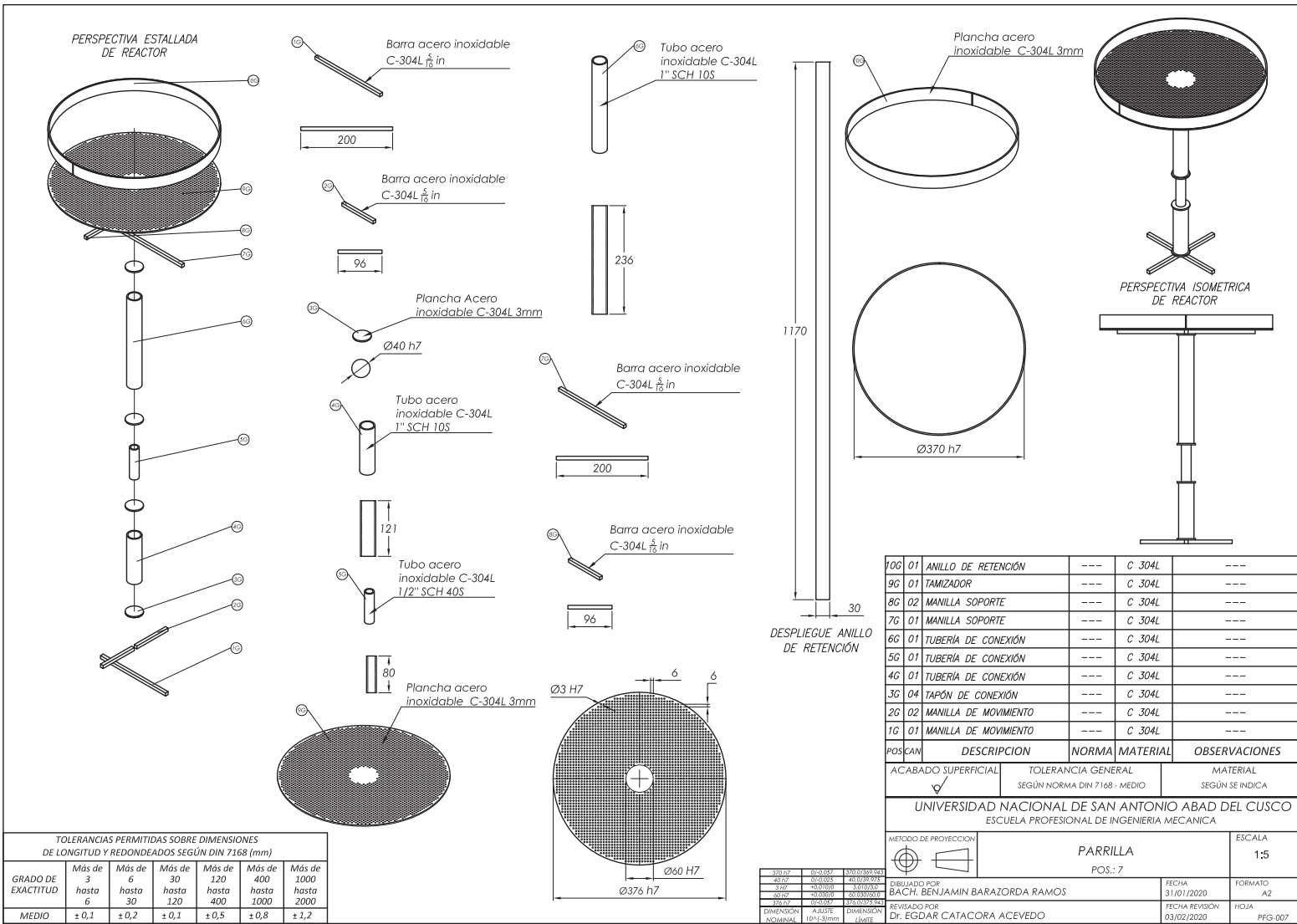
METODO DE PROYECCION	ACCESO PARA ENCENDIDO	ESCALA
	POS.: 5	1:5
DIBUJADO POR BACH. BENJAMIN BARAZORDA RAMOS	FECHA 31/01/2020	FORMATO A4
REVISADO POR Dr. EGDAR CATAFORA ACEVEDO	FECHA REVISIÓN 03/02/2020	HOJA PFG-005



TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168 (mm)

GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,5

1F	01	TUBERIA ENTRADA DE AIRE	---	C-304L	---
POS	CAN	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
✓		ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO		MATERIAL SEGÚN SE INDICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA					
METODO DE PROYECCION		TUBERIA ENTRADA DE AIRE			ESCALA
		POS.: 6			1:5
DIBUJADO POR BACH. BENJAMIN BARAZORDA RAMOS				FECHA 31/01/2020	FORMATO A3
REVISADO POR Dr. EGDAR CATAFORA ACEVEDO				FECHA REVISIÓN 03/02/2020	HOJA PFG-006



POSICIÓN	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
10G 01	ANILLO DE RETENCIÓN	---	C 304L	---
9G 01	TAMIZADOR	---	C 304L	---
8G 02	MANILLA SOPORTE	---	C 304L	---
7G 01	MANILLA SOPORTE	---	C 304L	---
6G 01	TUBERÍA DE CONEXIÓN	---	C 304L	---
5G 01	TUBERÍA DE CONEXIÓN	---	C 304L	---
4G 01	TUBERÍA DE CONEXIÓN	---	C 304L	---
3G 04	TAPÓN DE CONEXIÓN	---	C 304L	---
2G 02	MANILLA DE MOVIMIENTO	---	C 304L	---
1G 01	MANILLA DE MOVIMIENTO	---	C 304L	---

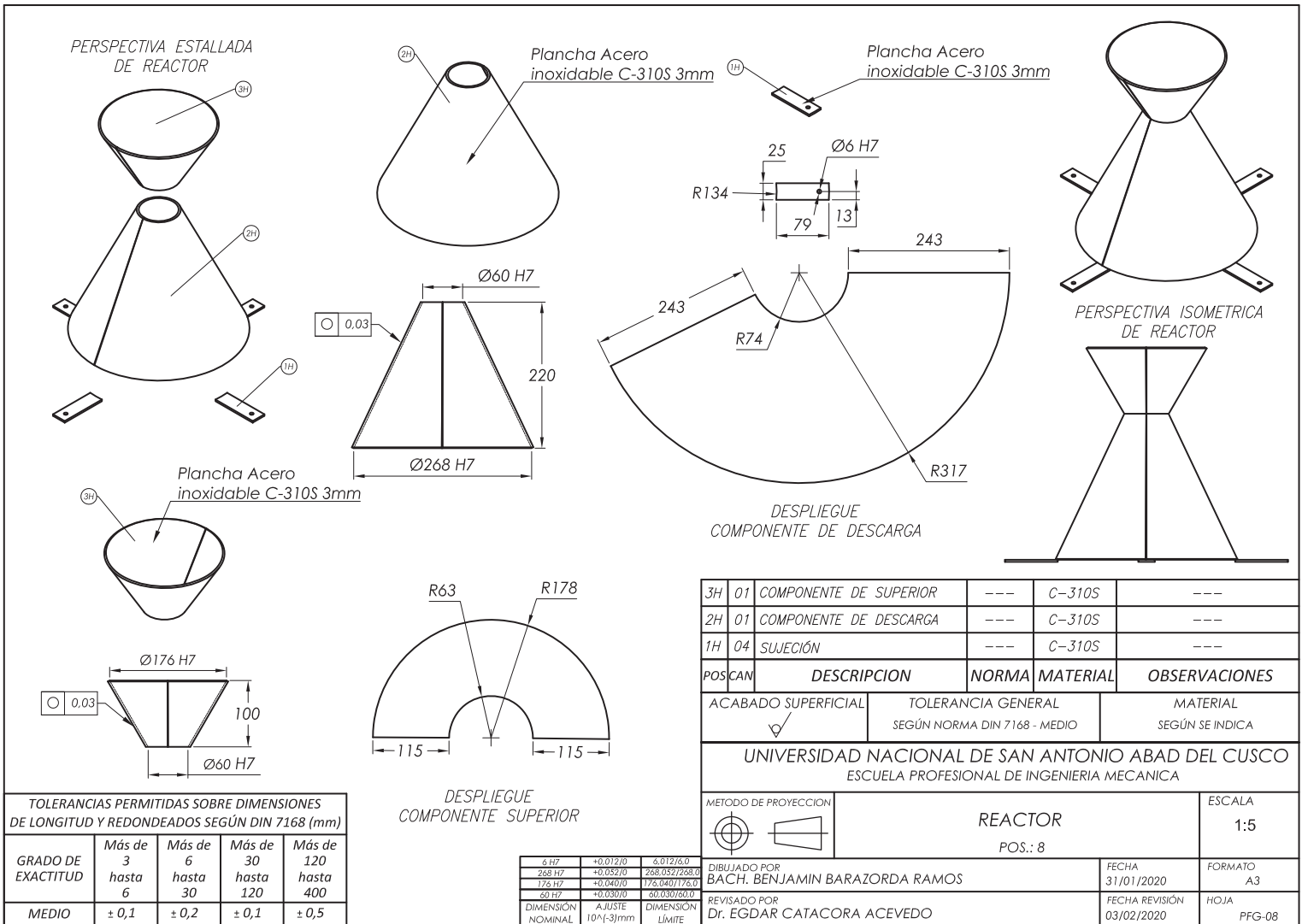
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
✓	SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO	SEGÚN SE INDICA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

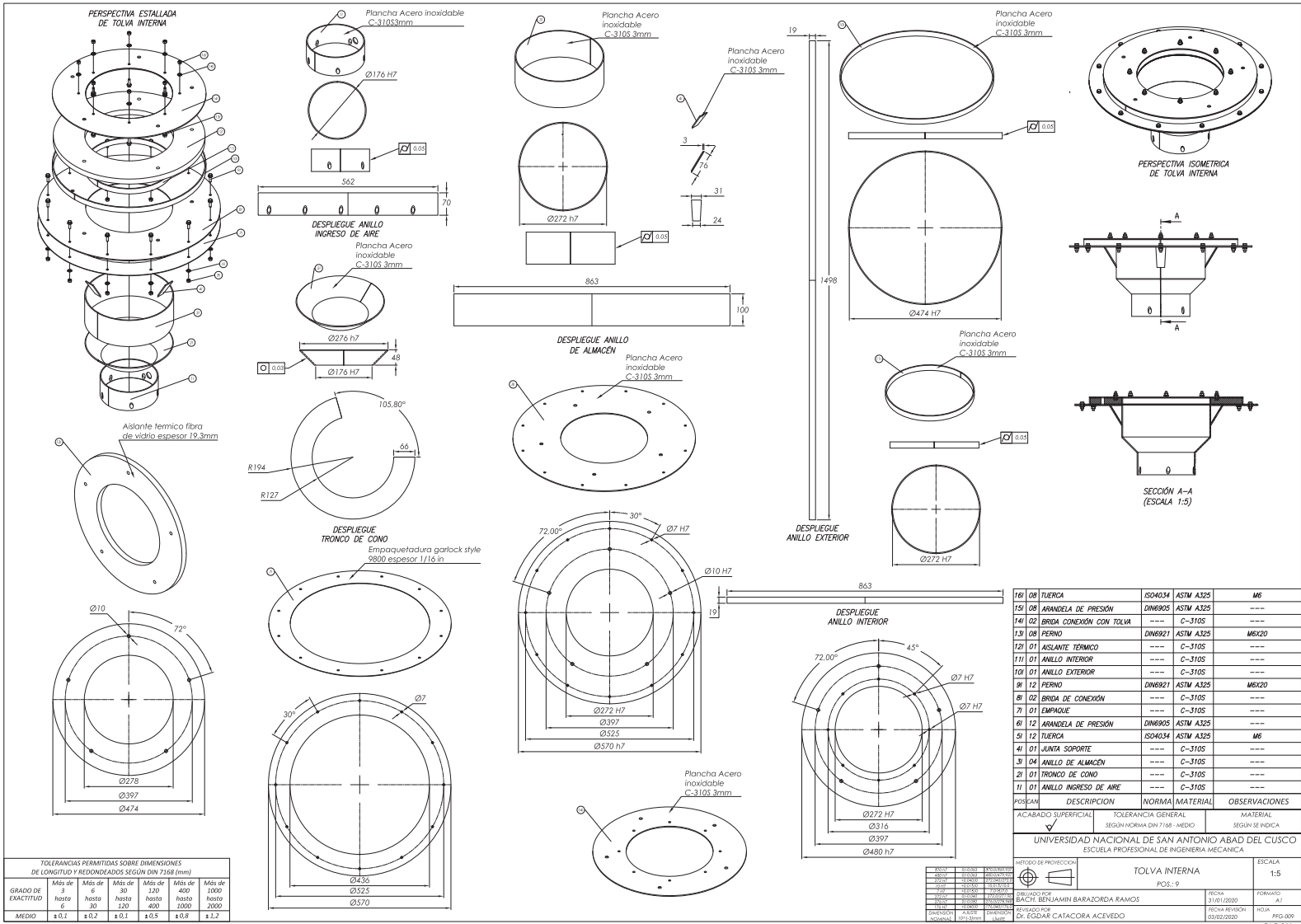
METODO DE PROYECCION	PARRILLA	ESCALA
	POS.: 7	1:5

DIBUJADO POR	FECHA	FORMATO
BACH. BENJAMIN BARAZORDA RAMOS	31/01/2020	A2
REVISADO POR	FECHA REVISIÓN	HOJA
Dr. EGDAR CATAORA ACEVEDO	03/02/2020	PGF-007

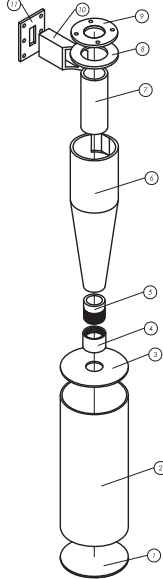
TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168 (mm)						
GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
MEDIO	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,5	± 0,8	± 1,2



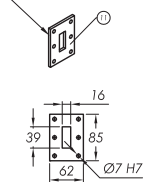
POS	CAN	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
3H	01	COMPONENTE DE SUPERIOR	---	C-310S	---
2H	01	COMPONENTE DE DESCARGA	---	C-310S	---
1H	04	SUJECIÓN	---	C-310S	---
ACABADO SUPERFICIAL		TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL	
✓		SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO		SEGÚN SE INDICA	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA					
METODO DE PROYECCION		REACTOR			ESCALA
		POS.: 8			1:5
DIBUJADO POR BACH. BENJAMIN BARAZORDA RAMOS				FECHA	FORMATO
REVISADO POR Dr. EGDAR CATAORA ACEVEDO				31/01/2020	A3
				FECHA REVISIÓN	HOJA
				03/02/2020	PFG-08



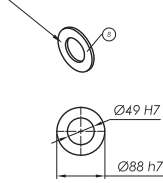
PERSPECTIVA ESTALLADA DEL CICLÓN



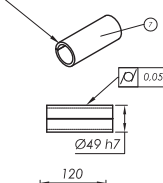
Plancha Acero inoxidable C-304L 5mm



Plancha Acero inoxidable C-304L 5mm



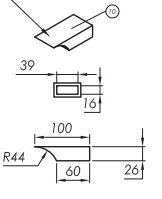
Plancha Acero inoxidable C-304L 5mm



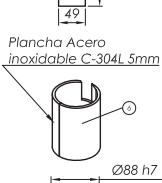
DESPLIEGUE TUBERÍA SALIDA DE GAS



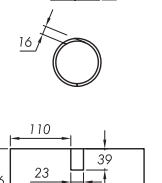
Plancha Acero inoxidable C-304L 5mm



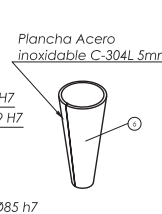
Plancha Acero inoxidable C-304L 5mm



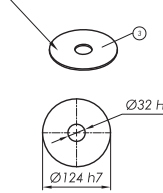
Plancha Acero inoxidable C-304L 5mm



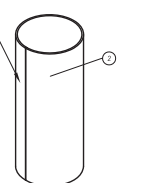
DESPLIEGUE CUERPO CILINDRICO DE CICLÓN



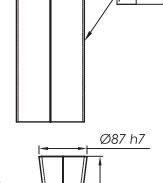
Plancha Acero inoxidable C-304L 3mm



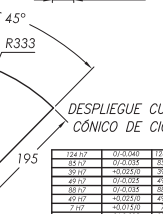
Plancha Acero inoxidable C-304L 3mm



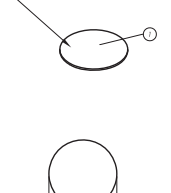
Plancha Acero inoxidable C-304L 3mm



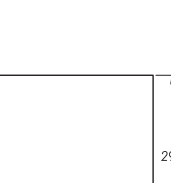
DESPLIEGUE CUERPO CÓNICO DE CICLÓN



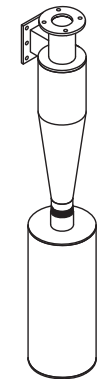
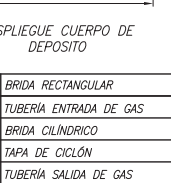
Plancha Acero inoxidable C-304L 3mm



Plancha Acero inoxidable C-304L 3mm



DESPLIEGUE CUERPO DE DEPOSITO



PERSPECTIVA ISOMETRICA DEL CICLÓN

Acero inoxidable C-304L 5mm

ROSCA NPT, ASME B1.20.1  
Rosca Cónica Exterior: 1:16  
Ángulo de flanco: 60°  
Número de hilos por pulg: 11.5  
Diámetro NPT: 1 1/2 (aprox.)

Acero inoxidable C-304L 5mm

DESPLIEGUE TUBERÍA SALIDA DE GAS

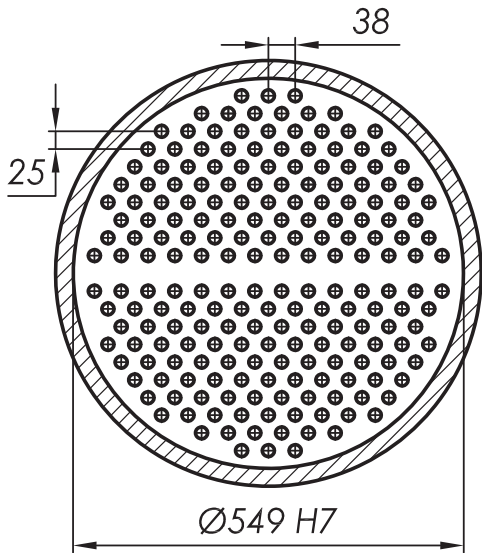
TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168				
GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 60	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,5

11	01	BRIDA RECTANGULAR	---	C-304L	---
10	01	TUBERÍA ENTRADA DE GAS	---	C-304L	---
9	01	BRIDA CILINDRICO	---	C-304L	---
8	01	TAPA DE CICLÓN	---	C-304L	---
7	01	TUBERÍA SALIDA DE GAS	---	C-304L	---
6	01	CUERPO DE CICLÓN	---	C-304L	---
5	01	ROSCA MACHO	NPT	C-304L	---
4	01	ROSCA HEMBRA	NPT	C-304L	---
3	01	TAPA DE DEPOSITO	---	C-304L	---
2	01	CUERPO DE DEPOSITO	---	C-304L	---
1	01	BASE DE DEPOSITO	---	C-304L	---

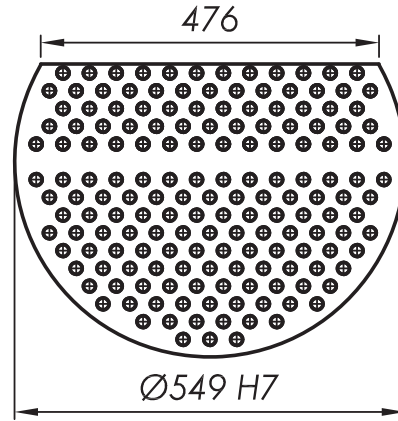
POS/CAN	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL	
✓	SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO		SEGÚN SE INDICA	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA				
MATERIAL			ESCALA	
CICLON			1:5	
POS.: B				
MÉTODO DE PROYECCION		DIBUJADO POR		FECHA
		DACH, BENJAMIN BARAZORDA RAMOS		31/01/2020
FORMA		REVISADO POR		FECHA REVISIÓN
CICLON		DR. EGDAR CATAFORA ACEVEDO		03/02/2020
FORMA		HOJA		PDGF-001

TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168

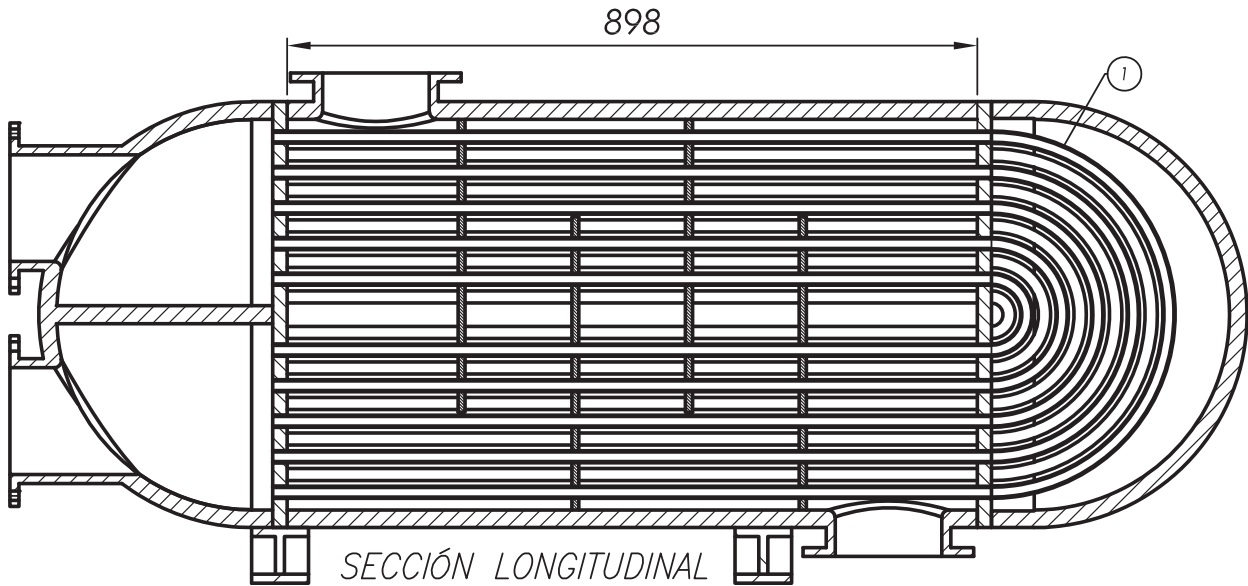
GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 60	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,5



SECCIÓN TRANSVERSAL Y DISTRIBUCIÓN DE TUBERÍAS INTERNAS



DEFLECTOR  
CANTIDAD: 4

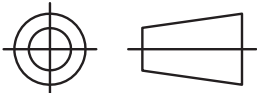


SECCIÓN LONGITUDINAL

POS	CAN	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
1	01	TUBERÍA INTERNA	---	C-304L	NPS1/8" SCH 80S

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

METODO DE PROYECCION



INTERCAMBIADOR

POS.: E

ESCALA

1:10

DIBUJADO POR  
BACH. BENJAMIN BARAZORDA RAMOS

FECHA  
31/01/2020

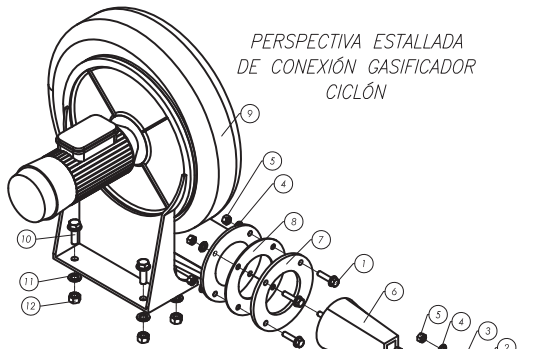
FORMATO  
A4

REVISADO POR  
Dr. EGDAR CATAFORA ACEVEDO

FECHA REVISIÓN  
03/02/2020

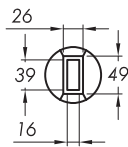
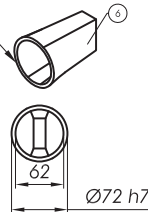
HOJA  
PDG-003



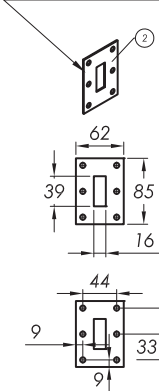


PERSPECTIVA ESTALLADA DE CONEXIÓN GASIFICADOR CICLÓN

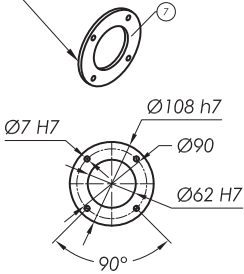
Plancha Acero inoxidable C-304L 5mm



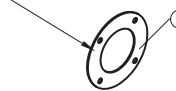
Empaquetadura garlock style 9800 espesor 1/16 in



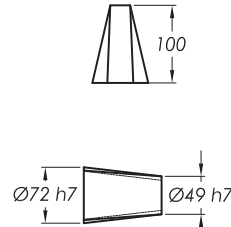
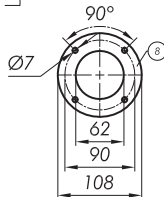
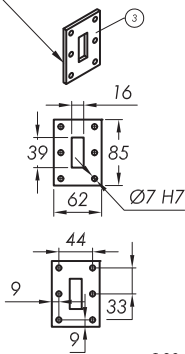
Plancha Acero inoxidable C-304L A36 5mm



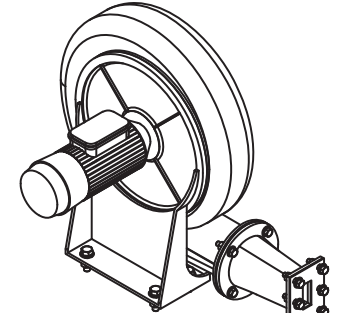
Empaquetadura garlock style 9800 espesor 1/16 in



Plancha Acero inoxidable C-304L 5mm



NOTA: Todos los tramos de tubería, así como los acoples serán cubiertos con aislante térmico (fibra de vidrio) en un espesor de 20mm como mínimo.



PERSPECTIVA ISOMETRICA DE CONEXIÓN GASIFICADOR CICLÓN

POS	CAN	DESCRIPCION	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
12	01	TUERCA	ISO4038	ASTM A325	M8
11	01	ARANDELA DE PRESIÓN	DIN6905	ASTM A325	---
10	01	PERNO	DIN 6921	ASTM A325	M8X25
9	01	VENTILADOR	---	---	COMERCIAL
8	01	EMPAQUE CIRCULAR	---	C-304L	---
7	01	BRIDA CIRCULAR	---	C-304L	---
6	01	CONEXIÓN DE ADAPTACIÓN	---	C-304L	---
5	10	TUERCA	ISO 4034	ASTM A325	M6
4	10	ARANDELA DE PRESIÓN	DIN6905	ASTM A325	---
3	01	BRIDA RECTANGULAR	---	C-304L	---
2	01	EMPAQUE RECTANGULAR	---	C-304L	---
1	10	PERNO	DIN 6921	ASTM A325	M6X25

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
✓	SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO	SEGÚN SE INDICA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

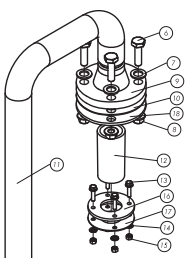
METODO DE PROYECCION	CONEXION GASIFICADOR CICLON POS.: D	ESCALA
		1:5

DIBUJADO POR BACH. BENJAMIN BARAZORDA RAMOS	FECHA 31/01/2020	FORMATO A3
REVISADO POR Dr. EGDAR CATAORA ACEVEDO	FECHA REVISIÓN 03/02/2020	HOJA PDGF-002

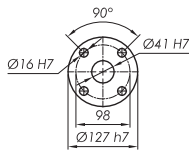
49 h7	0/-0.035	49.00/48.965
72 h7	0/-0.030	72.00/71.970
108 h7	0/-0.035	108.00/107.965
62 H7	+0.030/0	62.030/62.000
7 H7	+0.015/0	7.015/7.000
DIMENSION NOMINAL	AJUSTE	DIMENSION LIMITE
	10^-3mm	

TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168				
GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 60	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,5

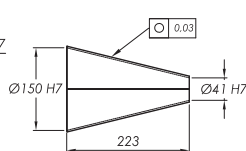
PERSPECTIVA ESTALLADA DE CONEXIÓN CICLÓN INTERCAMBIADOR



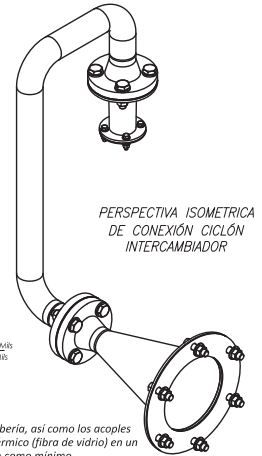
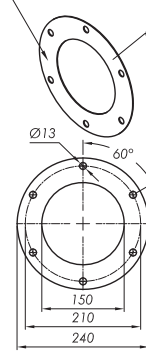
Plancha acero ASTM A36 5mm



Plancha acero ASTM A36 3mm



Empaquetadura garlock style 9800 espesor 1/16 in

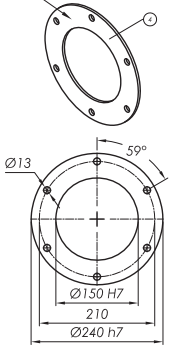


PERSPECTIVA ISOMETRICA DE CONEXIÓN CICLÓN INTERCAMBIADOR

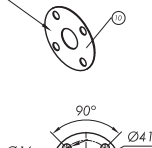
Pinura Jethrane 500-3Mw  
Pinura JET 622P MIO-3Mw  
Anillado SSPC-SP 5

NOTA: Todos los tramos de tubería, así como los acoples serán cubiertos con aislante térmico (fibra de vidrio) en un espesor de 20mm como mínimo.

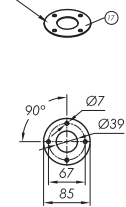
Plancha acero ASTM A36 5mm



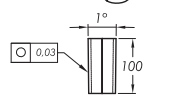
Empaquetadura garlock style 9800 espesor 1/16 in



Empaquetadura garlock style 9800 espesor 1/16 in



Plancha acero ASTM A36 5mm



TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168 (mm)

GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000
MEDIO	±0,1	±0,2	±0,1	±0,5	±0,8

17	01	BRIDA INTERMEDIA	---	ASTM A36	---
17	01	EMPAQUE SALIDA CICLÓN	---	---	---
16	01	BRIDA SALIDA DE CICLÓN	---	ASTM A36	---
15	04	TUERCA	ISO4034	ASTM A325	M6
14	04	ARANDELA DE PRESIÓN	DIN6905	ASTM A325	---
13	04	PERNO	DIN 6921	ASTM A325	M6X25
12	01	ACOPLE CÓNICO MENOR	---	ASTM A36	---
11	01	SISTEMA DE TUBERÍA	---	ASTM A36	NPS 1 1/4 SCH 40S
10	02	EMPAQUES INTERMEDIAS	---	---	---
9	03	BRIDA	---	ASTM A36	NPS 1.5in CLASS 150
8	08	TUERCA	DIN6923	ASTM A325	M12
7	08	ARANDELA	DIN 433	ASTM A325	---
6	08	PERNO	DIN 6914	ASTM A325	M12X55
5	01	ACOPLE CÓNICO MAYOR	---	ASTM A36	---
4	01	BRIDA ENTRADA A INTERCAM.	---	ASTM A36	---
3	01	EMPAQUE ENTRADA A INTERCA.	---	---	---
2	06	PERNO	DIN6923	ASTM A325	M12
1	06	TUERCA	DIN 6921	ASTM A325	M12X40

POSICIÓN	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
----------	-------------	-------	----------	---------------

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
✓	SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO	SEGÚN SE INDICA

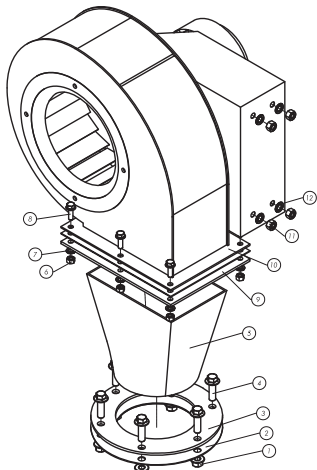
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

METODO DE PROYECCION	CONEXION CICLÓN INTERCAMBIADOR	ESCALA
1	POS.: E	1:5

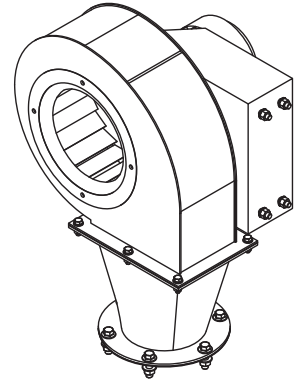
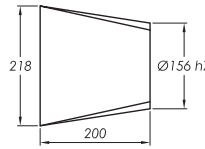
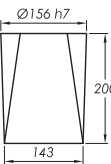
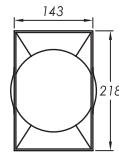
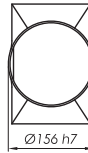
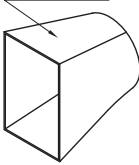
12/21	01/04/20	12/20/21/20	DIBUJADO POR	FECHA	FORMATO
12/21	01/04/20	12/20/21/20	DAICH BENJAMIN BARAZORDA RAMOS	31/01/2020	A2
12/21	01/04/20	12/20/21/20	REVISADO POR	FECHA REVISIÓN	HOJA
12/21	01/04/20	12/20/21/20	Dr. EGDAR CATAORA ACEVEDO	03/02/2020	PDGF-003



PERSPECTIVA ESTALLADA DE CONEXIÓN INGRESO DE AIRE



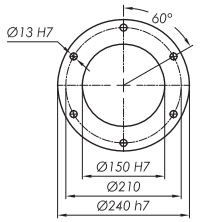
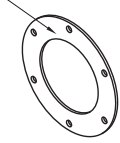
Plancha acero ASTM A36 3mm



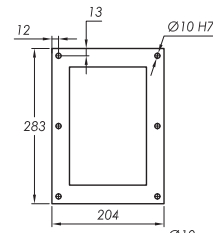
PERSPECTIVA ISOMETRICA DE CONEXIÓN INGRESO DE AIRE

Platina Jetphone 500-3M6  
Platina JET 622-400-3M6  
Avenido SPC-0P-6

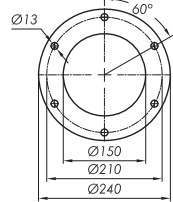
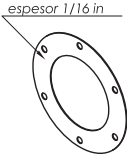
Plancha acero ASTM A36 5mm



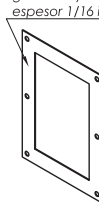
Plancha acero ASTM A36 5mm



Empaquetadura garlock style 9800 espesor 1/16 in



Empaquetadura garlock style 9800 espesor 1/16 in



TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168

GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 60	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,2	±0,1	±0,5

13	01	PERNO	---	---	---
12	04	ARANDELA	ISO 4034	ASTM A325	M10
11	04	TUERCA	DIN6905	ASTM A325	---
10	04	PERNO	DIN 6921	ASTM A325	M10x25
9	01	ACOPLE CÓNICO MENOR	---	ASTM A36	---
8	06	PERNO	---	ASTM A36	MBX25
7	06	ARANDELA	---	ASTM A36	---
6	06	TUERCA	---	ASTM A36	M8
5	01	ACOPLE CIRCULAR-RECTANGU.	---	ASTM A36	NPS 1.5in CLASS 150
4	06	PERNO	---	---	---
3	01	BRIDA CIRCULAR	DIN 6914	ASTM A325	M12x55
2	01	EMPAQUE CIRCULAR	DIN 433	ASTM A325	---
1	06	TUERCA	DIN6923	ASTM A325	M12

POSICIÓN	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL	
✓	SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO		SEGÚN SE INDICA	

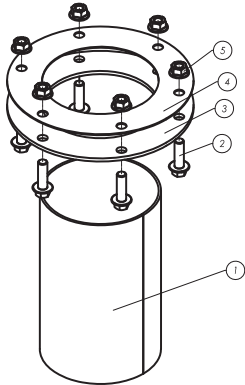
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA

METODO DE PROYECCION	CONEXION INGRESO DE AIRE	ESCALA
	POS.: F	1:5

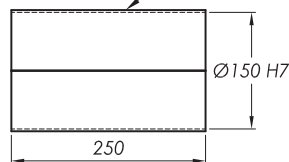
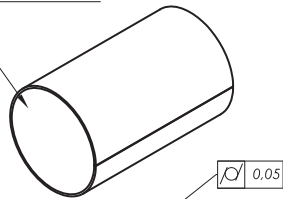
156 h7	0/-0,040	150,000/155,000
13 h7	0/0,010	13,000/13,000
10 h7	0/0,010	10,000/10,000
240 h7	0/-0,026	240,000/239,974
150 h7	0/0,010	150,000/150,000
DIMENSION NOMINAL	AJUSTE	DIMENSION LIBRE
	10/1-3mm	LIBRE

DIBUJADO POR DACH BENJAMIN BARAZORDA RAMOS	FECHA 31/01/2020	FORMATO A2
REVISADO POR Dr. EGDAR CATAORA ACEVEDO	FECHA REVISIÓN 03/02/2020	HOJA PDGF-005

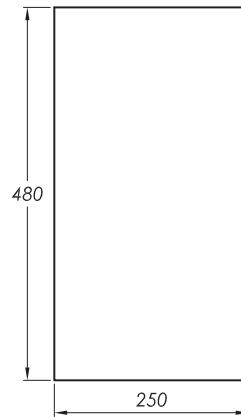
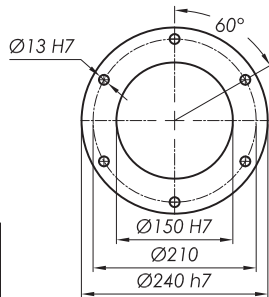
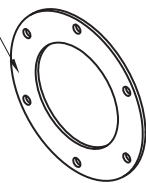
PERSPECTIVA ESTALLADA DE CONEXIÓN SALIDA DE AIRE



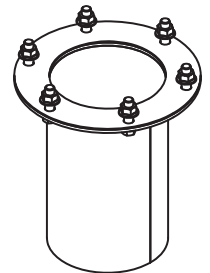
Plancha acero ASTM A36 3mm



Plancha acero ASTM A36 3mm



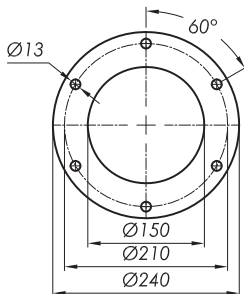
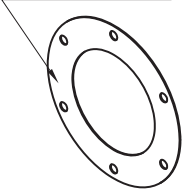
DESPLIEGUE TUBERÍA CILINDRICA



PERSPECTIVA ISOMETRICA DE CONEXIÓN SALIDA DE AIRE

Pintura Jethane 500-3Mils  
Pintura JET 622P-MIO-3Mils  
Arenado SSPC-SF 5

Empaquetadura garlock style 9800 espesor 1/16 in



TOLERANCIAS PERMITIDAS SOBRE DIMENSIONES DE LONGITUD Y REDONDEADOS SEGÚN DIN 7168 (mm)					
GRADO DE EXACTITUD	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000
MEDIO	± 0,1	± 0,2	± 0,1	± 0,5	± 0,8

13 H7	+0.018/0	13.018/0.00
240 h7	0/-0.046	240.00/239.954
150 H7	+0.040/0	150.040/0.00
DIMENSIÓN NOMINAL	AJUSTE	DIMENSIÓN LÍMITE
	10 <sup>-6</sup> (-3)mm	

5	06	TUERCA	DIN6923	ASTM A325	M12
4	01	EMPAQUE	---	---	---
3	01	BRIDA	---	ASTM A36	---
2	06	PERNO	DIN 6921	ASTM A325	M12X40
1	01	TUBERÍA CILINDRICA	---	ASTM A36	---
POSICAN	DESCRIPCION		NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
ACABADO SUPERFICIAL		TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL	
✓		SEGÚN NORMA DIN 7168 - MEDIO		SEGÚN SE INDICA	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA					
METODO DE PROYECCION		CONEXION SALIDA DE AIRE			ESCALA
		POS.: H			1:5
DIBUJADO POR BACH. BENJAMIN BARAZORDA RAMOS				FECHA	FORMATO
REVISADO POR Dr. EGDAR CATAORA ACEVEDO				31/01/2020	A3
				FECHA REVISIÓN	HOJA
				03/02/2020	PDGF-006

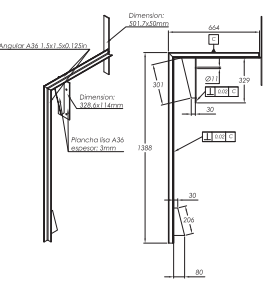
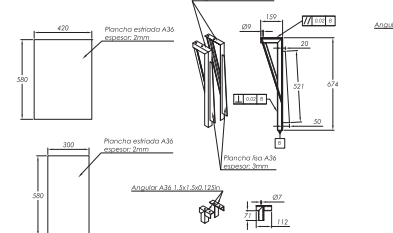
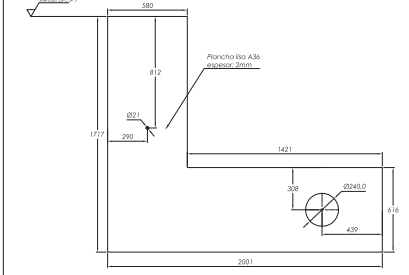
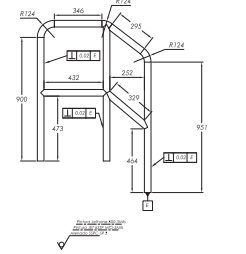
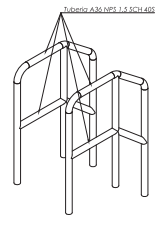
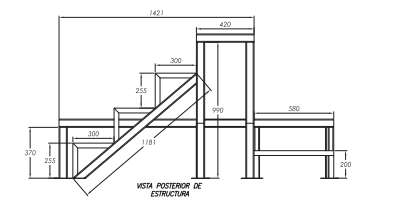
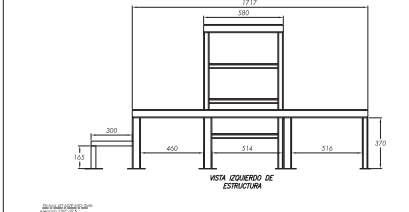
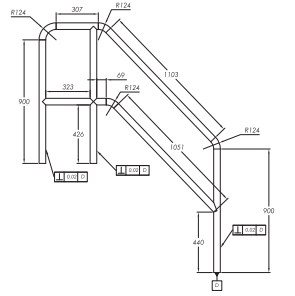
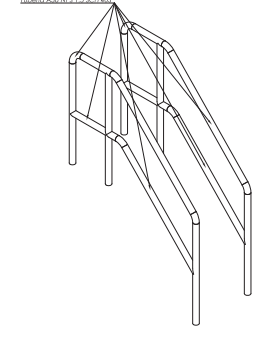
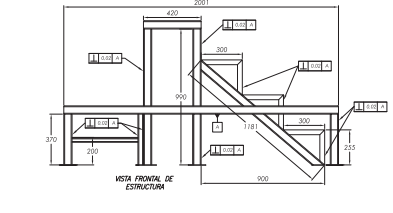
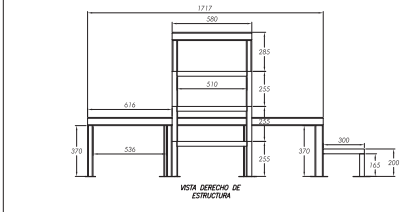
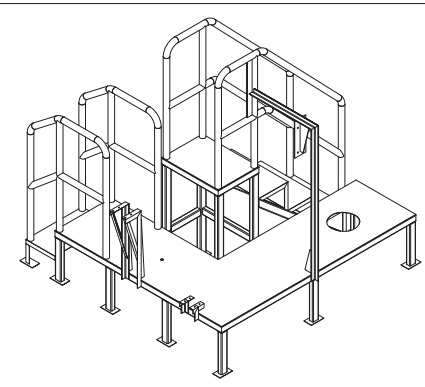
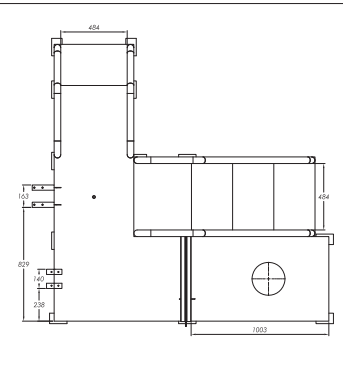
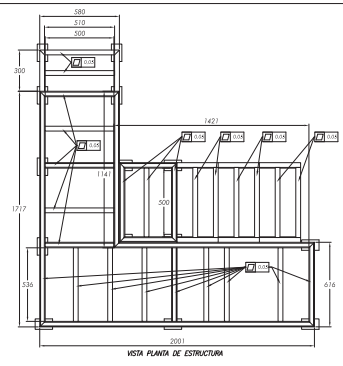
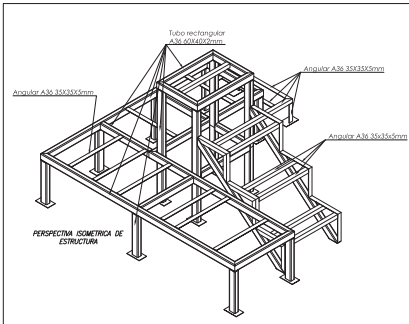


TABLA DE RECOMENDACIONES SOBRE DIMENSIONES DE CONCRETO Y ACEROS PARA SECCIONES DE 7.62 CM (3 IN)					
GRADO DE DUCTILIDAD	100 MPa (4500 PSI)	150 MPa (6750 PSI)	200 MPa (9000 PSI)	250 MPa (11250 PSI)	300 MPa (13500 PSI)
ACERO	4.11	4.11	4.11	4.11	4.11

ALCALDIA MUNICIPAL	INSPECCION GENERAL	MATERIAL
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO	ESCUOLA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA	ESPECIFICACIONES
CONEXION SALIDA DE AIRE		ESCALA
1:10		
PROFESOR	ESTUDIANTE	FECHA
DR. EDGAR CATALAN ACENEDO	ANDREA	2023