



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y

MECANICA

CARRERA DE INGENIERIA MECANICA

TESIS PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO

MECÁNICO

AUTORES: GARCÍA GUAMÁN, DAVID ALEJANDRO

MORALES GRANDA HERNÁN VINICIO

TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA

COMPLEMENTARIO PARA LA PUESTA A PUNTO

DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA DE 20KW

DIRECTOR: ING. ROBERTO GUTIERREZ

CODIRECTOR: ING. ANGELO VILLAVICENCIO

SANGOLQUÍ, 2014

CERTIFICACION DE LA ELABORACION DEL PROYECTO

El proyecto **“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA COMPLEMENTARIO PARA LA PUESTA A PUNTO DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA DE 20KW”** fue realizado en su totalidad por el Sr. DAVID ALEJANDRO GARCÍA GUAMÁN y el Sr. HERNÁN VINICIO MORALES GRANDA como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Roberto Gutiérrez

DIRECTOR

Ing. Ángelo Villavicencio

CODIRECTOR

Sangolquí, 2014

DECLARACION DE RESPONSABILIDAD

Nosotros: DAVID ALEJANDRO GARCÍA GUAMÁN Y HERNÁN VINICIO MORALES GRANDA.

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado titulado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA COMPLEMENTARIO PARA LA PUESTA A PUNTO DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA DE 20KW”**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales a terceros, conforme los autores constan al final de cada párrafo correspondiente.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido científico del proyecto de grado en mención.

David Alejandro García Guamán

CI: 1718867755

Hernán Vinicio Morales Granda

CI: 1721061651

Sangolquí, 2014

AUTORIZACIÓN

Nosotros: David Alejandro García Guamán y Hernán Vinicio Morales Granda.

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA COMPLEMENTARIO PARA LA PUESTA A PUNTO DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA DE 20KW”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

David Alejandro García Guamán

CI: 1718867755

Hernán Vinicio Morales Granda

CI: 1721061651

SANGOLQUÍ, 2014

DEDICATORIA.

Dedico este esfuerzo a mi familia.

Mi padre David y mi madre Lourdes, quienes me dieron el don de la vida, han sabido guiarme con amor y cariño, son mi principal motivación, soy un reflejo de ustedes, has sido parte fundamental de mi formación personal.

A mi hermana María Fernanda, compañera incondicional, aprendo de ti a querer la vida, gracias por alegrarme los días.

A todos los quienes apoyaron de alguna manera a estas experiencias.

David Alejandro García Guamán

DEDICATORIA

A mis padres quienes con tanto esfuerzo y paciencia lograron que esta meta, este sueño de ser independiente y profesional sea realizada, y que pese a los altos y bajos que he sufrido, han solido apoyarme para lograr esta preciada meta.

A mis hermanos, quienes han solido indicarme que con esfuerzo y dedicación se pueden superar las adversidades que se presentan en el día a día.

A mi gran familia que siempre estuvo pendiente de que se cumplan mis objetivos y metas.

Hernán Vinicio Morales Granda

AGRADECIMIENTO

A mi familia por su comprensión y apoyo incondicional, por creer siempre en mis capacidades, sin ustedes nada sería posible.

A mis amigos y familiares que me han acompañado toda la vida, brindándome su apoyo.

Gracias a mis profesores.

Agradezco a mis tutores Ing. Roberto Gutiérrez e Ing. Ángelo Villavicencio que han colaborado con este trabajo brindándome su tiempo y conocimientos.

David Alejandro García Guamán

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre por toda la paciencia y lucha que me supo transmitir, vivo ejemplo de lucha a quien le estoy eternamente agradecido.

A mi padre, por inculcarme desde niño que todo lo que se empieza en la vida se debe terminar, por enseñarme que no existen metas imposibles, que son cosas que aplico en mis días.

A ellos gracias por formarme de la manera que lo hicieron ya que sin su gran ejemplo no sería quien soy.

A mis hermanos; mis compañeros de vida; que siempre han estado brindándome su apoyo en las buenas y en las malas.

A toda mi familia por la fe que han tenido en mí este tiempo, mis abuelos, mis tíos, tías y primos, que complementan y alegran mis días.

A mis amigos de Calderón, del colegio y la universidad, que me conocen tal cual soy, quienes entre risas, abrazos y tragos han solido acompañarme durante mi camino de vida hasta el final, quienes son mi familia de la calle.

Hernán Vinicio Morales Granda

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO

CERTIFICACION DE LA ELABORACION DEL PROYECTO	I
DECLARACION DE RESPONSABILIDAD	II
AUTORIZACIÓN	III
DEDICATORIA.	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
AGRADECIMIENTO	VII
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
INDICE DE FIGURAS	XXI
ECUACIÓN INDICE DE ECUACIONES	XXVI
ÍNDICE DE CUADROS	XXVII
RESUMEN	XXVIII
ABSTRACT	XXX

CAPITULO 1	1
1 GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCION	1
1.2 ANTECEDENTES	4
1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	6
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	7
1.5 OBJETIVOS	8
1.5.1 GENERAL.....	8
1.5.2 ESPECÍFICOS	8
1.6 ALCANCE	8
CAPITULO 2.....	9
2 MARCO TEORICO	9
2.1 BIOMASA.....	9
2.1.1 RESIDUOS DE BOSQUES.....	10
2.1.2 ESPECIES AGRÍCOLAS	10
2.2 GASIFICACIÓN.....	13

2.3	ETAPAS DE GASIFICACIÓN.	13
2.3.1	SECADO	13
2.3.2	PIROLISIS.....	14
2.3.3	COMBUSTIÓN.....	15
2.3.4	REDUCCIÓN O CRAQUEO DE ALQUITRÁN.	15
2.4	REACCIONES DURANTE LA GASIFICACIÓN.	16
2.5	GAS DE SINTESIS	18
2.6	AGENTE GASIFICANTE.....	19
2.6.1	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE AGENTE GASIFICANTE	19
2.7	LOS FACTORES EN LA COMPOSICIÓN DEL GAS.....	21
2.7.2	PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA BIOMASA.....	22
2.7.3	TEMPERATURA.	23
2.7.4	PRESIÓN.....	24
2.7.5	ENTRADA DE AIRE.....	25
2.8	COMPOSICIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS.....	26

2.9	PROPIEDADES DEL GAS DE SINTESIS COMO COMBUSTIBLE PARA MOTORES.....	27
2.10	REQUERIMIENTO UTILIZACIÓN GAS DE SINTESIS EN MOTORES.....	29
2.11	USO DEL GAS DE SINTESIS	29
2.11.1	GENERACIÓN DE CALOR.....	29
2.11.2	GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA O MECÁNICA.	30
2.12	EQUIPOS DE GASIFICACIÓN.....	31
2.12.1	GASIFICADOR CONTRACORRIENTE.	33
2.12.2	GASIFICADOR CO - CORRIENTE.....	34
2.12.3	GASIFICADORES DE FLUJO CRUZADO.....	36
2.12.4	GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO.....	37
2.13	TECNOLOGIAS DE DEPURACIÓN DEL GAS.....	38
2.13.1	CICLONES.....	38
2.13.2	FILTROS DE TELA, CERÁMICOS Y METÁLICOS.....	39
2.13.3	CRAQUEO CATALÍTICO, TÉRMICO.....	41

2.13.4	FILTROS ELECTROSTÁTICOS	42
2.14	RIERGOS AL USAR GAS SINTERIZADO.....	43
2.14.1	RIESGOS TÓXICOS.....	43
2.14.2	RIESGOS DE INCENDIO	43
2.14.3	RIESGO DE EXPLOSIÓN.....	43
2.14.4	RIESGOS AMBIENTALES.....	44
	CAPITULO 3	45
3	DISEÑO SISTEMA DE GASIFICACIÓN.....	45
3.1	PARTES FUNDAMENTALES DEL SISTEMA.....	45
3.1.1	EL REACTOR DE GASIFICACIÓN.....	45
3.1.2	LA ALIMENTACIÓN.....	46
3.1.3	LA LIMPIEZA DEL GAS.....	46
3.1.4	UTILIZACIÓN DEL GAS COMBUSTIBLE.....	47
3.2	COMPARACIÓN ENTRE DISTINTOS TIPOS DE GASIFICADORES.....	48
3.3	ELECCIÓN DEL GASIFICADOR A IMPLEMENTAR.....	49

3.4	DISPONIBILIDAD DEL MCIA.....	50
3.5	PUESTA A PUNTO DEL MOTOR.....	51
3.5.1	ESTRUCTURA Y SOPORTES.....	51
3.5.2	MANTENIMIENTO MECÁNICO.....	52
3.5.3	MANTENIMIENTO DE SISTEMA ELÉCTRICO.....	53
3.5.4	REFRIGERACIÓN DEL MOTOR.....	54
3.6	ESQUEMA TÍPICO DEL FUNCIONAMIENTO DE UN GASIFICADOR CON UN MCIA.....	55
3.7	ELEMENTOS DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN.....	56
3.7.1	CARGA DE LA BIOMASA.....	56
3.7.2	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE BIOMASA.....	60
3.8	INTERCAMBIADOR DE CALOR (ETAPA DE SECADO).....	63
3.9	INTERCAMBIADOR DE CALOR PIROLISIS.....	65
3.9.1	TAPA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PIROLISIS.....	66
3.9.2	PUERTO DE ILUMINACIÓN.....	66
3.10	REACTOR.....	66

3.10.1	CAMISA DE ACERO INOXIDABLE	69
3.10.2	AISLANTE TÉRMICO	69
3.10.3	CAMPANA	69
3.10.4	INYECTORES DE AIRE.....	70
3.11	ENTRADA DE AIRE	71
3.11.1	MANGUERAS	71
3.12	SOPORTE CAMA DE CARBON (CENICERO).....	72
3.13	PUERTOS DE CENIZA Y AGITADOR.....	73
3.14	CICLÓN	74
3.14.1	RECIPIENTE DE RECOLECCIÓN.....	79
3.15	CONEXIONES DE GAS.....	79
3.16	FILTRO GRANULAR	80
3.17	VENTURI	81
3.18	QUEMADOR.....	82
3.19	DEPURADOR	83
3.20	EMPAQUES Y SELLOS HERMETICOS.....	84

3.21	INSTRUMENTACIÓN	85
3.21.1	ALARMA DE MONÓXIDO DE CARBONO.....	85
3.21.2	MEDIDOR DE HUMEDAD	86
3.21.3	SENSOR DE NIVEL DE COMBUSTIBLE	87
3.21.4	TERMOCUPLAS	88
3.21.5	MANÓMETROS DE AGUA	89
3.21.6	CAUDALÍMETRO PLACA ORIFICIO	90
3.22	SECUENCIA DE FLUJOS EN EL GASIFICADOR	95
3.23	FLUJO DE SÓLIDOS EN EL GASIFICADOR.....	96
3.24	FLUJO DE GASES EN EL GASIFICADOR.	98
3.25	FLUJO DE GASES DE ESCAPE.....	101
CAPITULO 4		104
4	CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACION	104
4.1	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN.....	104
4.1.1	PLANOS DE CONSTRUCCIÓN.....	104
4.1.2	HOJAS DE PROCESOS	104

4.2	CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN.....	104
4.3	MANUAL DE ENCENDIDO Y OPERACIÓN	110
4.4	PROTOCOLO DE PRUEBAS	110
4.5	MANUAL DE MANTENIMIENTO	110
	CAPITULO 5.....	111
5	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	111
5.1	PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO.....	111
5.1.1	VARIABLES DE ENTRADA	111
5.1.2	VARIABLES DE SALIDA.....	113
5.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	119
5.2.1	BALANCE DE MASA	119
5.2.2	BALANCE DE ENERGÍA	120
5.2.3	PODER CALORÍFICO DEL GAS DE SÍNTESIS	122
5.2.4	CANTIDAD DE AIRE PARA LA MEZCLA ESTEQUIOMÉTRICA	124
5.3	REGULACIÓN DEL MOTOR	126

5.3.1	COMPRESIÓN DE CADA PISTÓN.....	126
5.3.2	ANGULO DE ADELANTO AL ENCENDIDO	126
5.3.3	EFICIENCIA Y PÉRDIDA DE ENERGÍA.....	128
5.4	EFICIENCIA DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN	129
5.4.1	EFICIENCIA DEL GASIFICADOR.....	129
5.4.2	EFICIENCIA DEL MOTOR.....	131
5.4.3	EFICIENCIA DEL SISTEMA	133
	CAPITULO 6	135
6	ANALISIS ECONOMICO FINANCIERO	135
6.1	ANALISIS FINANCIERO	135
6.1.1	COSTO DE MATERIALES DIRECTOS	135
6.1.2	COSTO DE MANO DE OBRA DIRECTA.....	139
6.1.3	COSTOS INDIRECTOS	139
6.1.4	COSTO TOTAL DEL PROYECTO	140
6.2	ANALISIS ECONOMICO.....	140
6.2.1	CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN	141

6.2.2	GENERACIÓN DE ENERGÍA CON BIOMASA	142
6.2.3	RELACIÓN A OTROS COMBUSTIBLES.....	142
	CAPITULO 7	145
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	145
7.1	CONCLUSIONES.....	145
7.2	RECOMENDACIONES	146
	BIBLIOGRAFÍA	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Poder Calorífico según agente gasificante.....	19
Tabla 2	Efecto del contenido de humedad en la recuperación del calor y eficiencia de combustión.....	23
Tabla 3	Propiedades térmicas típicas de la biomasa.....	26
Tabla 4	Propiedades típicas de la producción de gas a partir de biomasa.....	27

Tabla 5 Propiedades del gas de síntesis como combustible para motor	28
Tabla 6 Parámetros en diferentes tipos de gasificadores.	48
Tabla 7 Características del MCIA	51
Tabla 8 Materiales utilizados en la construcción del Sistema de gasificación	104
Tabla 9 Propiedades Biomasa en base seca.....	112
Tabla 10 Poder calorífico del gas de Síntesis	123
Tabla 11 Cantidad de aire para la combustión estequiométrica del gas de síntesis.	124
Tabla 12 Poder calorífico de la mezcla	125
Tabla 13 Compresión de cilindros.....	126
Tabla 14 Costo de la materia prima	135
Tabla 15 Materiales consumibles.....	138
Tabla 16 Costo de mano de obra.....	139
Tabla 17 Costo total del proyecto	140
Tabla 18 Potencia producida	141

Tabla 19 Potencia en relación al consumo de biomasa	142
Tabla 20 Relación de Gasolina - Biomasa	143
Tabla 21 Determinación de los indicadores económicos	144

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama energía de biomasa.....	12
Figura 2 Procesos en la gasificación	16
Figura 3 Cambio químico durante la Gasificación de biomasa	22
Figura 4 Pirólisis, Gasificación y Combustión	24
Figura 5 Reacción de temperatura adiabática para la biomasa con composición atómica de $\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.6}$ Reaccionando con oxígeno y aire, graficada contra la fracción de hidrógeno requerida para la combustión.....	25
Figura 6 Desarrollo de Gasificación en motores móviles USA (Chevrolet) y Europa (Volvo).....	31
Figura 7 Gasificador contracorriente	33
Figura 8 Gasificador co- corriente.....	35
Figura 9 Gasificador de Flujo Cruzado.....	36
Figura 10 Gasificador de lecho fluidizado	38
Figura 11 Esquema funcionamiento del Ciclón.....	39
Figura 12 Filtro de tela	40

Figura 13 Filtros cerámicos	41
Figura 14 Filtro electrostático	42
Figura 15 Tipos de gasificadores y potencias optimas de funcionamiento.	45
Figura 16 Resumen de los métodos catalizadores para limpieza de gas de síntesis atendiendo las impurezas y temperaturas de los procesos.	47
Figura 17 Fotografía Estructura y soportes del motor	52
Figura 18 Fotografía de componentes reemplazados.....	53
Figura 19 Fotografía de componentes eléctricos reemplazados.....	54
Figura 20 Esquema gasificador – motor	55
Figura 21 Esquema de la tolva	57
Figura 22 Fotografía de tolva	58
Figura 23 Fotografía tapa de tolva y válvula de alivio.	59
Figura 24 Flujo másico en la tolva	60
Figura 25 Dispositivos de alimentación de biomasa	61
Figura 26 Esquema Intercambiador de calor Etapa de secado	64

Figura 27 Esquema Intercambiador de calor de Pirólisis	65
Figura 28 Inyectores y dimensiones de la campana del gasificador downdraft	67
Figura 29 Inyector de aire tipo J con pre calentamiento del aire	70
Figura 30 Fotografía de mangueras.....	72
Figura 31 Agitador	73
Figura 32 Puerto de cenizas	74
Figura 33 Dimensiones del ciclón	75
Figura 34 Densidad y viscosidad del gas en función de la temperatura	77
Figura 35 Fotografía de Material granular.....	81
Figura 36 Efecto Venturi	82
Figura 37 Esquema del Venturi adaptado al quemador.....	83
Figura 38 Fotografía del depurador adaptado válvulas de admisión de aire	84
Figura 39 Foto alarma CO	85
Figura 40 Foto medidor de humedad.....	86

Figura 41 Foto sensor de nivel.....	87
Figura 42 Foto termocuplas	88
Figura 43 Foto manómetros de agua.....	89
Figura 44 Esquema del funcionamiento de la placa orificio	90
Figura 45 Foto Placa orificio	92
Figura 46 Diagrama perdida de presión en función de la relación β	94
Figura 47 Diagrama de flujo de sólidos.....	98
Figura 48 Diagrama de flujo de gases	101
Figura 49 Diagrama de flujo de gases de escape.....	102
Figura 50 Diagrama de las relaciones de química ideales en los procesos de acuerdo con la secuencia de flujos.....	103
Figura 51 Fotografía de medición del porcentaje de humedad de los 3 tipos de biomasa.....	112
Figura 52 Medición de cantidad de ceniza.....	113
Figura 53 Fotografía de restos de ceniza y condensado	114
Figura 54 Fotografía recolección de alquitrán.....	115

Figura 55 Fotografías de toma de muestras INER.....	117
Figura 56 Tipos de contenedores para muestreo de gas.....	117
Figura 57 Fotografía contenedores de muestreo Tipo C.....	118
Figura 58 Velocidad de llama.....	127
Figura 59 Angulo de adelanto al encendido.....	128
Figura 60 Potencia al freno en función de la velocidad del motor.....	129
Figura 61 Diagrama de flujo de la transformación del gas de síntesis.....	134

ECUACIÓN INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Densidad	57
Ecuación 2 Requerimiento del gas	76
Ecuación 3 Energía Producida.....	76
Ecuación 4 Caudal función de temperaturas	76
Ecuación 5 Velocidad del flujo de gas	77
Ecuación 6 Tamaño de partícula capturado.....	78
Ecuación 7 Ecuación de Bernoulli para flujos incompresibles.	93
Ecuación 8 Diferencia de presión en función de áreas y caudal.....	93
Ecuación 9 Caudal volumétrico.....	93
Ecuación 10 Caudal corregido con el coeficiente de descarga.....	94
Ecuación 11 Conservación de la masa.....	119
Ecuación 12 Factor de aire	119
Ecuación 13 Balance de energía	121
Ecuación 14 Poder calorífico de la mezcla de gases.....	122
Ecuación 15 Poder calorífico de la mezcla	125

Ecuación 16 Eficiencia energética	129
Ecuación 17 Energía física del gas	129
Ecuación 18 calor específico.....	130
Ecuación 19 Eficiencia del sistema.....	134
Ecuación 20 Tasa mínima aceptable de riesgo	140
Ecuación 21 Potencia con gas.....	143

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Ventajas y desventajas de la gasificación con diferentes agentes de gasificación	20
--	----

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A	HOJA DE DATOS CO
ANEXO B	PLACA ORIFICIO
ANEXO C	PLANOS
ANEXO D	HOJAS DE PROCESO
ANEXO E	MANUAL DE ENCENDIDO Y APAGADO
ANEXO F	PROTOCOLO DE PRUEBAS
ANEXO G	MANUAL DE MANTENIMIENTO

RESUMEN

Los sistemas de gasificación se utilizan desde la segunda guerra mundial con el fin de proveer de combustibles a partir de residuos orgánicos provenientes de la agroindustria, siendo una alternativa energética, con emisiones de CO₂ neutras, para comunidades aisladas no interconectadas a la red pública eléctrica, y puede implementarse en caso de crisis energética. Se construyó e implementó un sistema de gasificación de biomasa tipo downdraft adaptado a un motor de combustión interna, en este trabajo se realizan los análisis de conservación de masa, energía, y el cálculo de la eficiencia del sistema de gasificación, con tres diferentes tipos de biomasa, a partir de las pruebas experimentales y las aplicaciones de las ecuaciones de la conservación de masa y energía respectivamente. La posterior utilización del combustible gaseoso en un motor de combustión interna alternativo adaptado para funcionar con la mezcla estequiométrica del gas de síntesis y aire. El sistema es capaz de proveer de energía mecánica a través del motor y recupera calor de los gases de escape mediante un intercambiador de calor ayudando a la etapa de pirólisis. A demás se aprovecha la generación de calor mediante la combustión directa del gas de síntesis.

PALABRAS CLAVES: Alquitrán, Biomasa, Ceniza, Combustión, Gasificación, Pirólisis, Poder calorífico, Reducción.

ABSTRACT

The gasification systems are used since World War II to provide fuels made off organic waste from farms. Becoming an alternative energy without CO₂ emissions for isolated communities without public power grid, and it could be implemented on energy crisis times. It was built and implemented a biomass gasification system, downdraft class, adapted to an internal combustion engine. In this work are made the mass and energy conservation analysis, and the calculation of gasification system efficiency, with 3 different kind of biomass, starting from experimental tests and solving the mass and energy conservation equations. The future use of the gaseous fuel in an alternative internal combustion engine, adapted to run with stoichiometric mixture from the synthesis gas and air. The system is able to provide mechanical power through the engine and recovers heat from the exhaust gases with a heat exchanger assisting the pyrolysis stage. A heat generation other is used by direct combustion of synthesis gas.

KEY WORDS: Tar, Biomass, Ash, Combustion, Gasification, Pyrolysis, Calorific Power, Reduction

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCION

Con el desarrollo de la sociedad y consecuentemente con el crecimiento poblacional, cada vez existe más demanda energética para satisfacer todas las necesidades de la población y mejorar el modus vivendi.

La demanda energética en el Ecuador en su gran mayoría es retribuida por la energía térmica proveniente de combustibles fósiles, la cual aporta con un 52% de total de la matriz energética, cuya combustión directa o indirecta genera los llamados gases de efecto invernadero como son CO₂, vapor de agua, CO y los NO_x, SO_x que son los responsables de la contaminación atmosférica, especialmente del calentamiento global y la polución en las ciudades extremadamente pobladas e industrializadas. (CONELEC, 2010)

El desarrollo de las energías renovables en el Ecuador está enfocado principalmente en la energía solar e hidráulica; existiendo muchas investigaciones e innovaciones tecnológicas no solo en las universidades sino también a nivel industrial y doméstico, no así para los otros tipos de energía como la geotérmica, eólica, mareomotriz y de biomasa.

Entre estas; la biomasa es un tipo de energía utilizada ancestralmente, ya que por cultura, en las zonas rurales de Ecuador se utiliza la combustión de la leña para producir energía calórica. Este tipo de combustión es muy deficiente, debido a que existe excesiva pérdida de calor por convección y radiación, al realizarse en un sistema abierto; además de que se obtiene una combustión incompleta que genera gases de combustión y energía química desperdiciada. En este proceso; como el flujo de aire no es controlado, no se puede obtener una llama constante.

El Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), en su boletín de estadística asegura que, la biomasa solo aporta con el 1,16% del total de la matriz energética, lo que significa para un país agrícola, ganadero y maderero que; desaprovecha la explotación de este recurso (CONELEC, 2010)

Con el fin de proveer de una energía no contaminante, este proyecto va encaminado a la producción de gas a partir de la transformación de biomasa, ya que; en el país no se aprovechan los residuos orgánicos provenientes de la agroindustria y además, son mínimas las empresas que utilizan la biomasa como fuente primaria de energía útil.

La biomasa de desechos agroindustriales es de 1,565 millones de TEPs según FAO; por lo tanto el potencial bioenergético debe ser

aprovechado con métodos de conversión de biomasa eficientes como es la gasificación; que es la transformación de la energía química contenida en un sólido a energía química contenida en un gas a través de procesos termoquímicos. (Barriga, Balseca)

El gas obtenido en este proceso se podría utilizar en remplazo de la gasolina o gas natural, motores de combustión interna, turbinas, calderas, etc. debidamente acondicionados. Las cenizas se pueden utilizar bien como fertilizante o desechos no tóxicos, con lo cual se evita la creación de rellenos sanitarios.

De esta manera; la gasificación reduce el volumen de residuos sólidos y es una eficiente técnica de producción energética, convirtiéndose en una fuente sustentable.

Es una tecnología bien probada aproximadamente un millón de gasificadores tipo downdraft fueron utilizados para hacer funcionar automóviles, camiones, barcos, trenes y generadores eléctricos; durante la segunda guerra mundial se utilizaban gasificadores para la automoción pero fue abandonada con la disponibilidad de gasolina barata, con lo cual el desarrollo de tecnología de gasificación se vio interrumpida, dejando fracciones de conocimiento y un campo basto de investigación en fuentes limpias de generación.

Países Europeos como España, Suecia, Dinamarca, Finlandia, Francia, Noruega, Países bajos, y Estados Unidos han realizado

intensas investigaciones sobre gasificación de biomasa, han desarrollado esta tecnología integrada a motores de combustión interna alcanzando vasta experiencia, y con la posibilidad de dotar de energía eléctrica a zonas rurales no interconectadas a través del funcionamiento de gasificadores con su respectivo generador eléctrico. (Solar Technical Information Program, 1988)

1.2 ANTECEDENTES

La gasificación de biomasa es una tecnología del siglo pasado que tuvo un desarrollo considerable antes y durante la II Guerra Mundial. Perdió importancia después de la guerra, ocasionada por las ventajas y disponibilidad de los combustibles líquidos, derivados del petróleo. Es una tecnología que ha sufrido muchos altibajos a lo largo de su historia propiciados por su necesidad. En la actualidad, retoma de nuevo su importancia por los elevados precios del petróleo, la contaminación medioambiental y los problemas que ocasionan la dependencia energética exterior.

Lineamientos del plan nacional del buen vivir 11.1; Reestructurar la matriz energética bajo criterios de transformación de la matriz productiva, inclusión, calidad, soberanía energética y sustentabilidad, con incremento de la participación de energía renovable

11.1.a. Aprovechar el potencial energético basado en fuentes renovables, principalmente de la hidroenergía, en el marco del derecho constitucional al acceso al agua y de la conservación del caudal ecológico.

11.1. b. Aprovechar el potencial de desarrollo de la bioenergía, sin detrimento de la soberanía alimentaria y respetando los derechos de la naturaleza.

11.1. d. Incentivar el uso eficiente y el ahorro de energía, sin afectar la cobertura y calidad de sus productos y servicios.

11.1. j. Generar alternativas, fortalecer la planificación e implementar regulación al uso energético en el transporte, los hogares y las industrias, para modificar los patrones de consumo energético, con criterios de eficiencia y sustentabilidad.

11.1. t. Fortalecer la investigación científica en los ámbitos energéticos, de industrias básicas y de generación y uso sustentable de energía renovable, para la industria, los hogares, el transporte y la producción.

(Senplades, 2013)

Actualmente en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, el Laboratorio de Conversión de Energía; con el fin de estudiar nuevas formas de producción energética; se ha encaminado en el estudio del fenómeno de

gasificación de; por medio de pirólisis; para lograr aprovechar todos los residuos orgánicos provenientes de la agroindustria.

Además, según el CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad); en su boletín de estadística asegura que la biomasa solo aporta con el 1,16% del total de la matriz energética; lo cual motiva a la ESPE; a incurrir en investigaciones en tecnologías limpias de producción energética.

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE no cuenta con un sistema de gasificación termoquímica, como ninguna institución universitaria en Ecuador; por lo cual; no se puede realizar investigación en este tipo de tecnologías.

Al ser la biomasa un recursos bastante importante su aprovechamiento se vuelve una prioridad y las universidades son llamadas a realizar investigaciones sobre su utilización, de ahí que la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE no puede verse relegada de esta responsabilidad social ya que no cuenta con un sistema de como el antes citado y más bien se han desarrollado biodigestores y hasta bioreactores.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La tecnología de gasificación en el país todavía se encuentra en muy bajo nivel a tal punto que organizaciones como la OLADE (Organización Latinoamericana de Energías) están empezando a realizar investigaciones en el campo de la gasificación de biomasa.

El proyecto encaminado con las políticas y lineamientos del plan nacional del buen vivir que en su objetivo 11 asegurar la soberanía y eficiencia de los sectores estratégicos para la transformación de la industria y tecnología.

Es así que el presente proyecto podría facultar un nexo; no solo con esta organización; sino con el sector industrial en general, ya que esto implicaría un ingreso de recursos, permitiendo que la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sea la pionera en la utilización e investigación de este tipo de sistemas; lo que afianzaría los procesos de investigación y vinculación alineándose con el plan nacional del buen vivir; con la misión y visión de la institución; justificando de esta manera la ejecución del mismo.

Es por esta razón que este proyecto debería ser considerado de importancia, ya que proveerá a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de un equipamiento necesario para cumplir lo descrito anteriormente.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 GENERAL

“DISEÑAR, Y CONSTRUIR EL SISTEMA COMPLEMENTARIO PARA LA PUESTA A PUNTO DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA DE 20 KW PARA EL LABORATORIO DE CONVERSION DE ENERGIA DE LA ESPE”

1.5.2 ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros de diseño para el sistema complementario del gasificador.
- Diseñar el sistema alternativo acoplado al motor de combustión interna.
- Diseñar el protocolo de Pruebas para el sistema de gasificación.
- Evaluar técnica y económicamente el sistema.

1.6 ALCANCE

El proyecto tiene como alcance la implementación, montaje y construcción del sistema de gasificación de 20KW de potencia; para el funcionamiento de un motor de combustión interna previamente modificado para biogás para el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; y posterior desarrollo de procedimientos para el uso del mismo.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1 BIOMASA

Se refiere a cualquier conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, procedente de un proceso biológico espontáneo o provocado. Conteniendo carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrogeno como cada ser vivo. Puede clasificarse como natural (producida en ecosistemas) y la residual producida por cualquier actividad humana principalmente en procesos agrícolas, industriales, basura producida y aguas residuales.

En ecuador la utilización de biomasa se reduce a la autogeneración en agroindustrias como por ejemplo ingenios azucareros, piladoras de arroz e industrias agroforestales, Se destacan por su disponibilidad residuos de madera, tusa de maíz, Bagazo de caña de azúcar, cascara de coco, cascara de café, cascara de arroz, cascara de cacao. Cuya mayor dificultad es obtener un estimado de la cantidad de residuos ya que son utilizados mayormente para fertilización y combustión para la obtención de calor.

No se puede obtener un estimado ya que nadie cuantifica la biomasa, por lo que no hay notas fiscales para la compra de la misma siendo difícil y casi imposible recolectar datos sobre la biomasa disponible en el país.

2.1.1 Residuos de bosques

En la provincia de Pichincha se tiene grandes parques los cuales tienen vegetación endémica de su localidad. Tienen una gran capacidad de generación de biomasa como por ejemplo los parques Metropolitanos de Quito como el Guanguiltagua y el Metropolitano Sur. Así como explotación de maderas comerciales en la provincia de Esmeraldas, Los ríos y muy controlada en la amazonia ecuatoriana.

2.1.2 Especies Agrícolas

Cascara de café

Producida en pequeñas agroindustrias productoras de café localizadas principalmente en la zona de la sierra sur del Ecuador. Su residuo se utiliza como fuente energética con combustión directa.

Cascara de arroz.

Producida en toda la zona de la costa del Ecuador donde la producción y almacenamiento del residuo lo realizan las piladoras utilizada mayormente para en avicultura y ganadería como filtros para recolección de residuos animales. También la semi - combustión de esta materia prima para el uso como fertilizante de tierra.

Bagazo de caña de azúcar

Este material es el más utilizado en la industria ecuatoriana, el residuo de la producción de azúcar es utilizado en la cogeneración de energía a través de calderos, los cuales ayudan a la autonomía energética de las empresas azucareras.

Cascara de coco

En toda la costa ecuatoriana se puede encontrar esta especie agrícola, con pequeñas industrias dedicadas al procesamiento de este producto, la utilización del agua y corteza como fuente de alimento y procesamiento de dulces y utilización en la cocción de alimentos teniendo como residuo la fibra la cual se desecha sin ningún tipo de procesamiento.

Cascara de palma africana

La industria de producción de aceites utiliza este especie vegetal cuyo producto es la pulpa y residuo es toda la cascara.

Cascara de cacao.

Ecuador es un exportador de cacao de alta calidad, cuya producción se lo realiza en todas las zonas del piso climático caliente, el producto final es los granos secos de cacao y su residuo es toda la cascara la cual se utiliza como fertilizante de tierra.

Tusa de maíz

Toda la producción de harinas y diferentes granos se la realiza con diferentes especies de maíz en los cuales solo se utiliza los granos y la tuza viene a ser un desecho los cuales combustionan en los campos y son utilizadas sus cenizas como fertilizante de tierra.

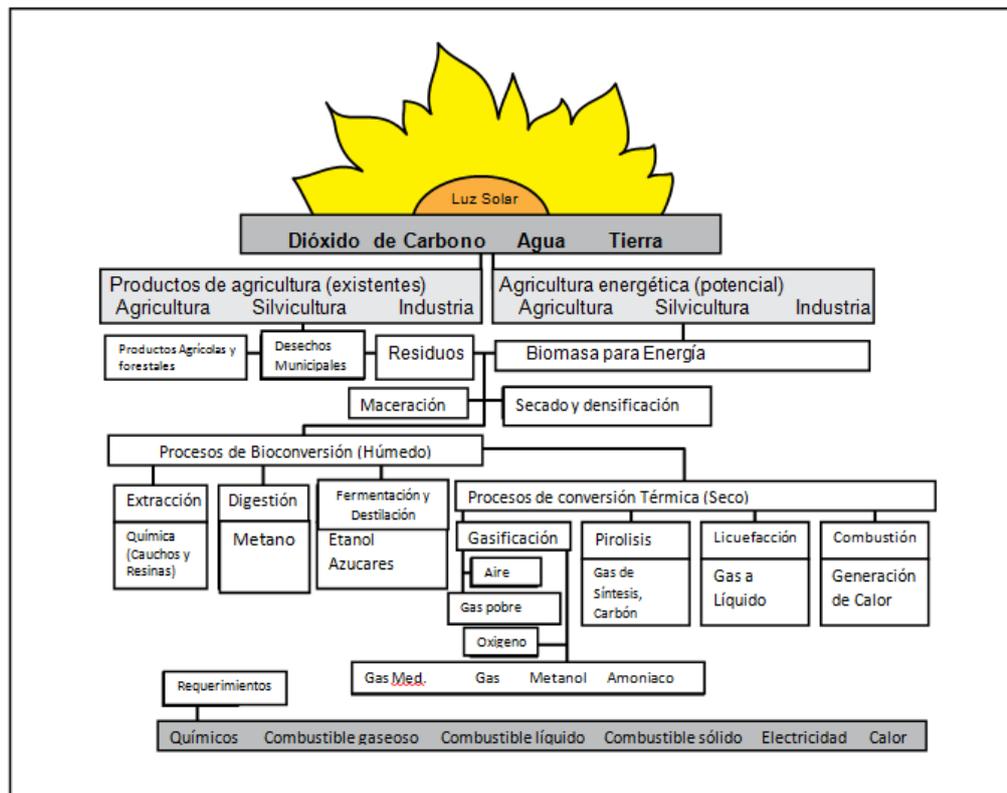


Figura 1 Diagrama energía de biomasa

Fuente (Reed, 1978)

2.2 GASIFICACIÓN

La gasificación es definida como la conversión de la biomasa, o cualquier combustible sólido, en un gas energético, a través de la oxidación parcial a temperaturas elevadas. Esta conversión se la realiza a través de diferentes tipos de reactores termoquímicos, tales como de lecho fijo o lecho fluidizado. (Sánchez, 2003).

El gas producido en el proceso puede ser utilizado en calderas, hornos, turbinas a gas, motores de combustión interna o externa para generación eléctrica, para utilización directa de calor, y la obtención de biocombustibles sintéticos con propiedades semejantes a los combustibles fósiles como el metanol y dimetil éter. El gas producido es llamado comúnmente gas de madera, gas pobre, o gas sinterizado.

2.3 ETAPAS DE GASIFICACIÓN.

2.3.1 Secado

El secado se lo realiza para liberar el porcentaje de humedad contenida en la biomasa. Este proceso se lo realiza antes de que la biomasa ingrese a cualquier proceso, debe tener un porcentaje de humedad máximo del 30% ya que esto influye en la calidad del gas sinterizado, el porcentaje de alquitrán y cenizas.

2.3.2 Pirolisis

Es un proceso previo a la gasificación que consiste en la degradación térmica de un material causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno, se produce por una serie compleja de reacciones químicas y de procesos de transferencia de calor y masa. Este proceso se realiza en un rango de temperaturas de 70 a 500 ° C, Las proporciones relativas de las fracciones obtenidas durante el proceso dependen de las condiciones en las cual se realice, como velocidad de calentamiento, temperatura máxima alcanzada, composición química y granulometría del material.

Productos formados mediante la pirolisis son:

Gases: Compuestos principalmente de CO, CO₂, CH₄, C₂H₆, H₂ y pequeñas cantidades de hidrocarburos pesados.

Líquidos (alquitranes o bioaceites y agua condensada): Alquitranes compuestos por una mezcla de distintos productos como pueden ser cetonas, ácido acético, y compuestos aromáticos, y otras fracciones más pesadas y agua proveniente del secado y reacciones químicas.

Sólidos (carbonizado): Residuo carbonoso puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo, y ceniza. (García, 2011)

2.3.3 Combustión.

Son reacciones químicas que involucran la oxidación completa de un combustible. Los principales elementos químicos que componen un combustible son Carbono e Hidrógeno, estos elementos reaccionan con Oxígeno y liberan calor. La combustión aporta el calor a los demás procesos.

2.3.4 Reducción o craqueo de alquitrán.

Es la conversión de los productos de la combustión a un combustible gaseoso, en el craqueo térmico el gas producido en la gasificación se calienta y las moléculas del alquitrán son descompuestas a moléculas más simples, como resultado gas más ligero, alquitrán, cenizas y vapor de agua.

Fuente (FJELLERUP J., 2005)

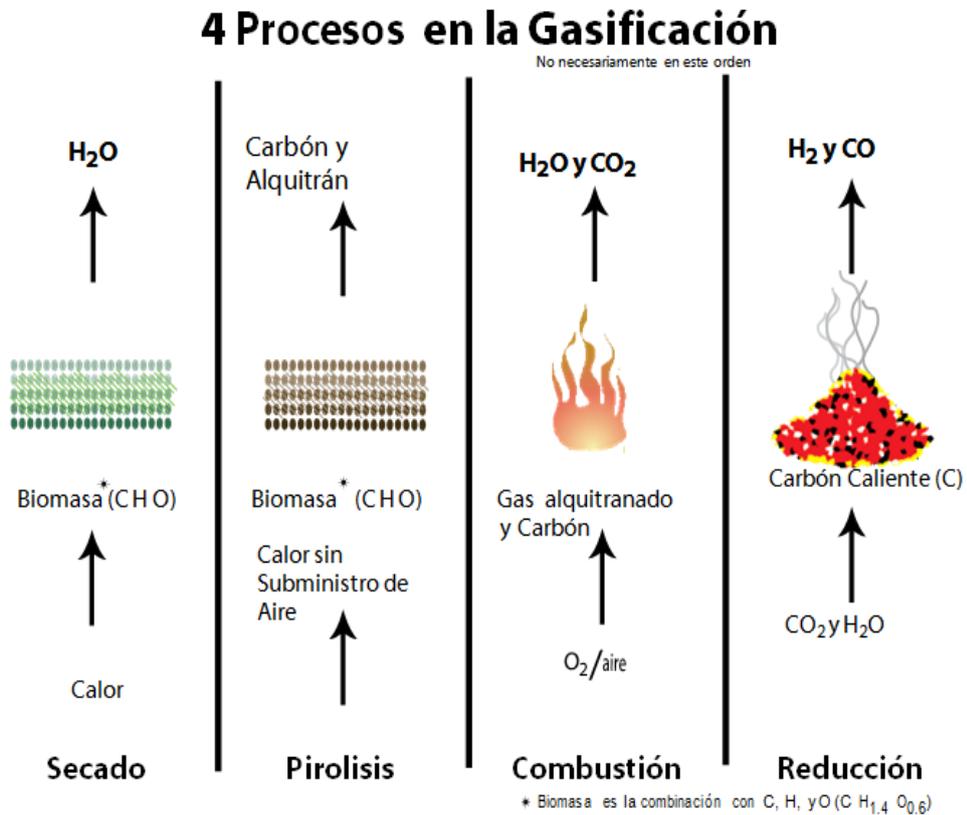


Figura 2 Procesos en la gasificación

Fuente (Mason, 2009)

2.4 REACCIONES DURANTE LA GASIFICACIÓN.

Durante el proceso de gasificación ocurren principalmente reacciones exotérmicas de oxidación (combustión) y reacciones endotérmicas de reducción incluyendo fases sólidas y gaseosas.

Reacciones heterogéneas gas – sólido:

Oxidación del carbono (cuando se emplea oxígeno o aire como agente gasificante):



Reacción de Boudouard



Reacción de gas de agua



Formación de Metano



Reacciones homogéneas (fase gaseosa):



Craqueamiento del alquitrán.



A demás de estas reacciones tenemos que destacar la oxidación de parte de los productos de la pirolisis.



Las reacciones 1 y 2 de oxidación son fuertemente exotérmicas, rápidas y pueden ser consideradas irreversibles en las temperaturas normales de gasificación. Las reacciones 3 y 4 son endotérmicas. La reacción de Boudouard (3) pasa a ser más importante en el rango de temperatura de 800 a 900 °C, ocurriendo en todo el lecho, al contrario de las reacciones de formación de dióxido e monóxido de carbono (1 y 2) que solo ocurren en presencia de oxígeno. (Sánchez, 2003)

2.5 GAS DE SINTESIS

Gas de síntesis es el nombre dado a una mezcla de hidrógeno (H₂) e monóxido de carbono (CO) producido a partir de gas natural, carbón, petróleo, biomasa y residuos orgánicos. La disponibilidad y variedad de recursos representa una fuente potencial de combustibles limpios e también para la síntesis de productos químicos, siendo una fuente importante de generación eléctrica con disminución de contaminantes atmosféricos como los óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x). (WENDER, 1996).

2.6 AGENTE GASIFICANTE

El agente empleado en el proceso es un factor importante en la composición final del gas de síntesis y su variación de su poder calorífico. Los principales agentes gasificantes son aire, oxígeno, vapor de agua, hidrógeno. En la Tabla 1 se identifican los agentes gasificantes con su respectivo poder calorífico del gas generado. (García, 2011)

Tabla 1 Poder Calorífico según agente gasificante

Agente gasificante	Gas generado	Poder calorífico MJ/m³
Aire	Gas pobre	4 – 7
Oxígeno	Gas medio	10 – 15
Vapor de Agua	Gas medio	13 – 20
Hidrógeno	Gas de alto	40

Fuente (García, 2011)

2.6.1 Ventajas y desventajas de Agente gasificante

Cuadro 1 Ventajas y desventajas de la gasificación con diferentes agentes de gasificación

Agente gasificante	Ventajas	Desventajas
Aire	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo. Es el más barato • Combustión parcial de la biomasa para suministro de energía necesaria en el proceso • Porcentaje de particulados y alquitrán moderados depende del tipo de gasificador 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo poder calorífico del gas
o Oxígeno	<ul style="list-style-type: none"> • El gas de síntesis no es diluido por el nitrógeno. • Ausencia de alquitrán por las altas temperaturas de operación • Permite la gasificación de biomasa en estado líquido 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita planta de separación de aire • Es apenas utilizado en gasificadores de lecho arrastrado • Alta temperatura de gasificación (puede ser controlada con la mezcla con vapor de agua)
Vapor de Agua	<ul style="list-style-type: none"> • Alto poder calorífico del gas • Alto porcentaje de hidrógeno en el gas 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere suministro de calor externo para la generación de vapor
Hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Alto poder calorífico del gas • Entrada de hidrogeno puro 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología de producción y almacenamiento de hidrógeno • Alto costo

Fuente (Silva Lora, 2012)

2.7 LOS FACTORES EN LA COMPOSICIÓN DEL GAS

Los que afectan a la composición de los gases son:

2.7.1.1 Tipo de biomasa.

En la biomasa hay 3 polímeros celulosa, hemicelulosa, y lignina los cuales varían la composición a través de la pared celular, sin embargo hay una relación atómica relativamente constante para toda la biomasa que parte de una composición química de carbono, hidrógeno y oxígeno ($\text{CH}_{1-4}\text{O}_{0.6}$), los cuales pueden variar ligeramente entre distintas especies. La relación entre combustibles sólidos, líquidos y gaseosos se ve en la Figura 3 donde las concentraciones químicas se trazan para diferentes componentes. (Solar Technical Information Program, 1988).

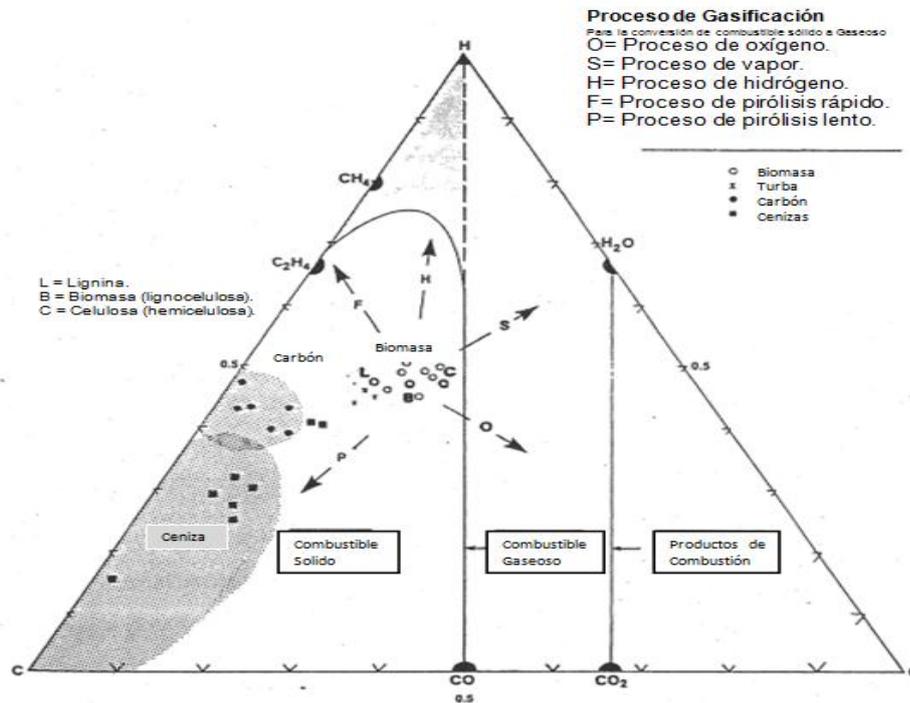


Figura 3 Cambio químico durante la Gasificación de biomasa

Fuente (Reed, 1978)

2.7.2 Porcentaje de humedad de la biomasa.

El contenido de humedad afecta la eficiencia de recuperación de calor el cual se reduce drásticamente con el aumento de la humedad ya que el calor de vaporización del agua no se recupera durante el proceso de combustión.

El contenido de humedad del combustible afecta la calidad del gas ya que requiere de 2300KJ/Kg para vaporizar el agua y 1500KJ/Kg para elevar la temperatura a 700°C durante los procesos de pirólisis y gasificación. Además de bajar el rendimiento del gasificador aumenta la producción de alquitranes

Tabla 2 Efecto del contenido de humedad en la recuperación del calor y eficiencia de combustión.

Humedad		Recuperación de Calor	Eficiencia de Combustión
Base seca	Base Húmeda		
%	%	Btu/lb	%
0,00	0,00	7097	82,5
4,76	4,54	7036	81,8
9,09	8,33	6975	81,1
13,04	11,54	6912	80,4
16,67	14,29	6853	79,7
20,00	16,67	6791	78,9
23,08	18,75	6730	78,3
28,57	22,22	6604	76,8
33,33	25,00	6482	75,4
42,86	30,00	6178	71,8
50,00	33,33	5868	68,2
CONTINUA			
60,00	37,50	5252	61,1
66,67	40,00	4639	53,9
71,43	41,67	4019	46,7

Fuente (Reed, 1978)

2.7.3 Temperatura.

En todos los procesos de pirolisis, gasificación y combustión requieren rangos de temperatura específicos los cuales afectan la composición del gas, producción de alquitrán, cenizas, y obtención de carbón vegetal. En la Figura 4 se indica cómo afecta la temperatura de llama a los procesos de gasificación.

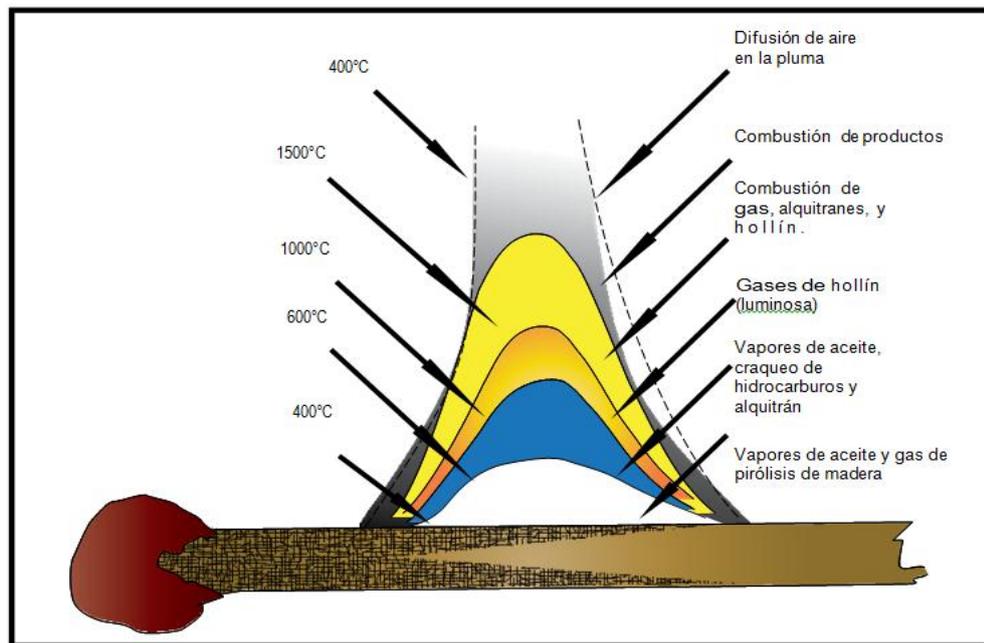


Figura 4 Pirólisis, Gasificación y Combustión

Fuente (Reed, 1978)

2.7.4 Presión.

La presión a la cual se realizan los procesos depende del diseño del gasificador, provoca cambios en la composición de los productos de pirólisis, la utilización a baja presión da como resultado mayor rendimiento en la producción de alquitrán, y al aumentar la presión se incrementa la producción de carbón vegetal. Este efecto está relacionado a la permanencia de la biomasa en las zonas de reacción. (Sánchez, 2003)

2.7.5 Entrada de aire.

Es uno de los factores más importantes determina los productos y la temperatura de la reacción en todos los procesos de pirólisis, gasificación y combustión a partir de la fracción de oxígeno añadida al sistema.

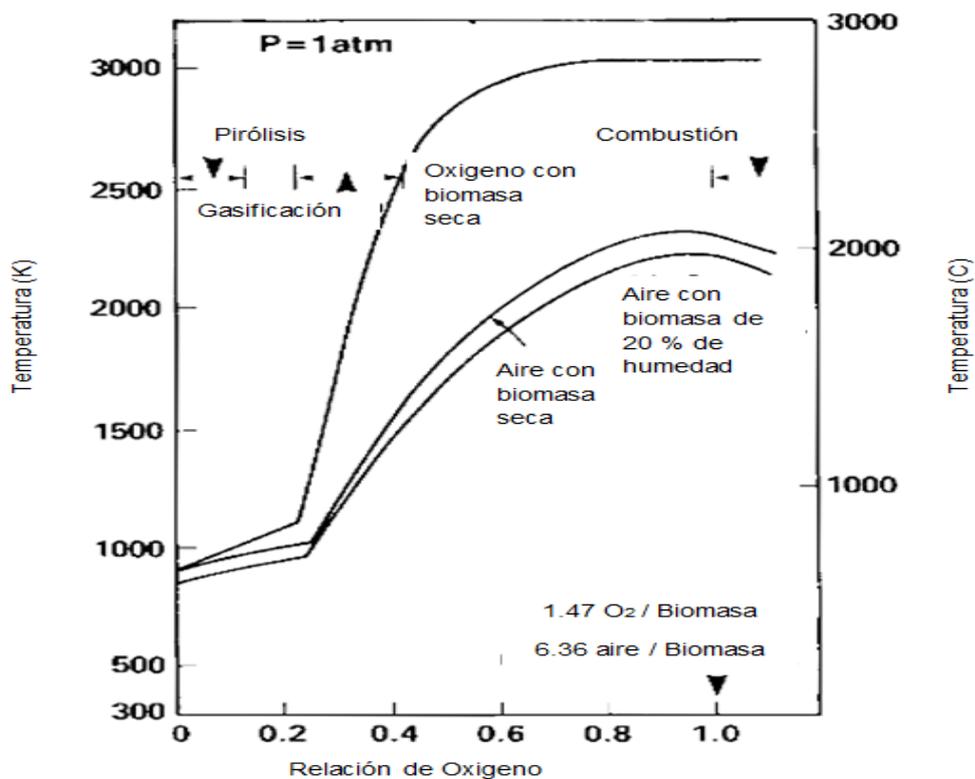


Figura 5 Reacción de temperatura adiabática para la biomasa con composición atómica de $\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.6}$ Reaccionando con oxígeno y aire, graficada contra la fracción de hidrógeno requerida para la combustión.

Fuente (Solar Technical Information Program, 1988)

Donde obtenemos que las relaciones estequiométricas para la combustión de biomasa son de $1,47 \text{ O}_2$:Biomasa y $6,36 \text{ aire}$: Biomasa. Esto para la oxidación completa.

La región de pirolisis indica una relación de oxígeno casi nula.

La etapa de gasificación necesita una relación de oxígeno de 0,2 a 0,4

2.8 COMPOSICIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS

Al realizarse la gasificación de biomasa se obtiene un cambio en la composición química producida por la gasificación de aire u oxígeno. Obteniendo una composición relativamente constante para la composición química de carbono, hidrógeno y oxígeno ($\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.6}$), cuyas propiedades térmicas están en la Tabla 3, para una producción de gas con diferentes propiedades Tabla 4.

Tabla 3 Propiedades térmicas típicas de la biomasa.

Formula típica de la biomasa seca (sin humedad ni ceniza) $\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.6}$			
	C	H	O
Composición (Peso%)	52.2	4.3	41.7
Composición (Molar%)	33.3	46.7	20.0
Valor calorífico Máximo		20.9	(8990
		KJ/g	Btu/lb)
Valor calorífico Mínimo		20.4	(8770
		KJ/g	Btu/lb)

Fuente (Solar Technical Information Program, 1988)

Tabla 4 Propiedades típicas de la producción de gas a partir de biomasa.

Compuesto	Símbolo	Gas (Vol. %)	Gas seco (Vol. %)
Monóxido de Carbono	CO	21.0	22.1
Dióxido de Carbono	CO ₂	9.7	10.2
Hidrógeno	H ₂	14.5	15.2
Agua (Vapor)	H ₂ O	4.8	
Metano	CH ₄	1.6	1.7
Nitrógeno	N ₂	48.4	50.8
Poder calorífico del gas			
Generación de gas base húmeda		5506 KJ/Nm ³	(135.4 Btu/scf)
Generación de gas base seca		5800 KJ/Nm ³	(142.5 Btu/scf)
Relación de Aire para la gasificación		2.38 Kg madera/ Kg de aire	
Relación de aire para la combustión		1.5 Kg madera/ Kg de aire	

Fuente (Solar Technical Information Program, 1988)

2.9 PROPIEDADES DEL GAS DE SINTESIS COMO COMBUSTIBLE PARA MOTORES

El número de octanos es la característica principal para utilizar la relación de compresión del motor, el número de octanos es mayor en el gas de síntesis por lo tanto se puede utilizar motores de encendido por chispa con relaciones altas de compresión 11:1, incluso de puede trabajar de manera dual en motores de encendido por compresión llegando hasta una relación de 17:1, obteniendo así una mayor eficiencia térmica y mayor

potencia específica. Los valores críticos indican las condiciones límites para la licuefacción de gases de los gases, de tal forma que los gases solamente pueden licuarse cuando se encuentran a una temperatura menor a la crítica y a presión mayor a la crítica, razón por la cual el gas de síntesis y el biogás no es rentable licuar, para su almacenamiento en volúmenes reducidos.

Tabla 5 Propiedades del gas de síntesis como combustible para motor

Combustible	Composición típica	Poder calorífico		Relación estequiométrica	Poder calorífico de la mezcla	Número de octanos	Valores críticos	
		MJ/nm ³	MJ/KG				Temperatura °C	Presión bar
Gas de síntesis	23% CO	5,57	5,05	1,17	2,57	10	-	51
	18% H ₂					115	-	130
	10% CO ₂							
	1% CH ₄							
Biogás	60% CH ₄	21,6	17,8	5,72	3,21	> 120	-36	76
	10% CO ₂							
Metano	CH ₄	35,9	50,1	9,53	3,41	22	-	47
Gas natural	88% CH ₄	38	50,7	9,4	3,65	21	82,5	1
	9% C ₂ H ₆							
	3% N ₂							
GLP	90% C ₃ H ₈	93,5	46,3	24,5	3,68	12	90	44
	10% C ₄ H ₁₀							
Gasóleo	C ₁₆ H ₃₄	-	4	14,5	3,8	-	-	-
			2,7	Kg/Kg	9			
Gasolina	C ₈ H ₁₆	-	4	15	3,7	90	> 296	24,2
			3,5	Kg/Kg	3			

Fuente (Fonseca, 2003)

2.10 REQUERIMIENTO UTILIZACIÓN GAS DE SINTESIS EN MOTORES

Para el sistema de gasificación del gasificador con un motor de combustión interna tiene los siguientes requerimientos:

- Se necesita un gas con un poder calorífico mínimo de 4,2 MJ/m³ para mantener una eficiencia razonable.
- Debe ser un gas libre de polvo, de alquitranes y ácidos.

Con cantidades tolerables de estas sustancias:

- Partículas < 50mg/m³n
- Tamaño de partícula < 3 micras
- Alquitranes < 100 mg/m³n
- Ácidos < 50mg/m³n de gas (medido como ácido acético)

2.11 USO DEL GAS DE SINTESIS

Básicamente el gas de síntesis tiene dos usos como combustible para generación de calor o energía eléctrica o mecánica.

2.11.1 Generación de calor

La ventaja fundamental de gasificar biomasa para ser usado en generación de calor en una caldera u horno, comparada en su combustión directa en el hogar, es que el gas de síntesis alcanza temperaturas mayores

de combustión, por lo tanto aumenta la eficiencia del equipo y el contenido exergético del calor generado. Muy útil para la industria metalúrgica, cerámica, cemento, cal pasta celulosa, etc. Pues la transformación de hornos, calderas y secadores es muy sencilla.

2.11.2 Generación de energía eléctrica o mecánica.

A demás de la utilización del gas de síntesis como combustible en motores de combustión interna móviles o estacionarios, tecnología usada hace más de un siglo, se está desarrollando la utilización del gas en turbinas de gas y en motores de combustión externa tipo Stirling.

Los gasificadores conectados a motores de combustión interna estacionarios ofrecen la posibilidad para producir energía mecánica o eléctrica, con un campo de aplicación muy amplia que va de unos pocos KW hasta alguno MW. Para aplicaciones de gran dimensión se utilizan gasificadores de lecho fluidizado con un nivel de ingeniería y automatización elevado, diseñado y construido por empresas especializadas en gasificación. Las gasificaciones de mediana dimensión de 30 a 500 KW usan gasificadores de lecho móvil con algún grado de automatización, alimentados con madera, carbón, y residuos agrícolas, estas plantas son ideales para producción de energía en zonas no interconectadas eléctricamente, son producidas comercialmente por empresas europeas y americanas, con costos elevados debido a su baja demanda. En las aplicaciones de pequeña dimensión de 3 a 30 KW no hay desarrollos

comerciales importantes, las aplicaciones son pequeñas conectados a generadores o motores estacionarios de riego, bombas y motores pequeños.

El uso para motores móviles fue utilizado en el siglo XX especialmente en la segunda guerra mundial, debido a la escasez de combustibles derivados de petróleo, lo que obligó al desarrollo de esta tecnología, por lo que pueden ser usados en caso de guerras o emergencia energética.



Figura 6 Desarrollo de Gasificación en motores móviles USA (Chevrolet) y Europa (Volvo)

Fuente (Wilson, 2014)

2.12 EQUIPOS DE GASIFICACIÓN.

El proceso de gasificación se lleva a cabo en equipos diseñados para este fin llamados gasificadores. Pueden ser clasificados de acuerdo a los siguientes parámetros.

Cuadro 1 Clasificación de los gasificadores

Parámetro	Característica
Poder calorífico del gas producido	<ul style="list-style-type: none"> • Gas de bajo poder calorífico: hasta 5MJ/NM³ • Gas de medio poder calorífico: hasta 5 MJ/NM³ a 10 MJ/NM³ • Gas de medio poder calorífico: hasta 10 MJ/NM³ a 40 MJ/NM³
Tipo de agente gasificador	<ul style="list-style-type: none"> • Aire • Vapor de agua • Oxígeno • Hidrógeno (hidro-gasificación)
Dirección del movimiento relativo de los sólidos y del agente gasificante	<ul style="list-style-type: none"> • Contraflujo(contracorriente) • Flujo directo (co-corriente) • Flujo Cruzado • Lecho fluidizado – arrastrado
Presión de trabajo	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosféricos • Presurizados hasta 2000 KPa
Tipo de combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Combustible fósil (carbón y derivados de petróleo) • Combustibles no fósiles (biomasa)

Fuente (Sánchez, 2003)

2.12.1 Gasificador contracorriente.

Los gasificadores más simples son los contra corriente donde la entrada de aire está en la parte de abajo del gasificador, con un flujo ascendente de gases contrario al flujo de combustible introducido por la parte superior y desciende por la acción de la fuerza de gravedad.

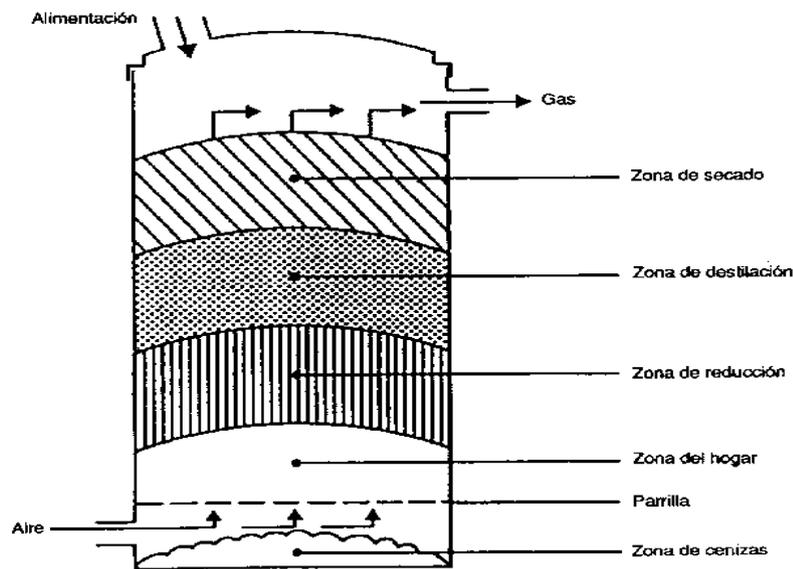


Figura 7 Gasificador contracorriente

Fuente (FAO, 1993)

La ventaja de estos gasificadores es que tienen una eficiencia térmica alta, por el hecho que los gases de combustión precalientan la carga de combustible al pasar alrededor. Teniendo como desventaja que el gas queda extremadamente sucio, es decir con una cantidad enorme de impurezas, porque ningún de los alquitranes y otros productos de la pirolisis son craqueados en la zona de combustión ya que son elevados por el flujo de

gases hacia la parte superior, pueden causar taponamiento en las tuberías. Algunos gasificadores de gran tamaño suelen tener cámaras en la parte superior para que se reduzca la velocidad del gas y permita la condensación de compuestos volátiles dentro del gasificador. Fuente (Sánchez, 2003)

2.12.2 Gasificador co - corriente.

Los más conocidos y utilizados son de este tipo desde la segunda guerra mundial son empleados para la generación de potencia mecánica. En este gasificador la zona de combustión está posicionada de forma opuesta a los gasificadores contracorriente. Con una alimentación de combustible en la parte superior, la alimentación de aire está hecha en flujo descendente (en el mismo sentido del flujo de combustible) pasando por las zonas de combustión y reducción. Fuente (Sánchez, 2003)

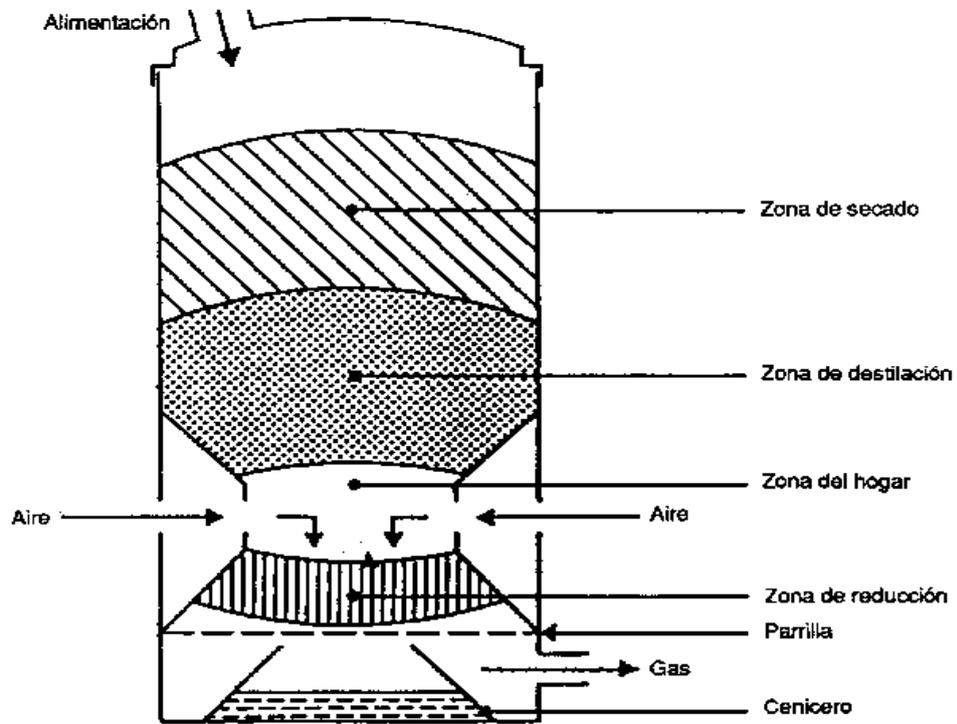


Figura 8 Gasificador co- corriente.

Fuente (FAO, 1993)

La característica esencial de estos gasificadores es que el flujo de gases alquitranes y elementos volátiles están obligados a pasar por la zona de combustión donde serán craqueados convirtiéndolos en compuestos más ligeros y con menos cantidad de alquitranes. Por lo que la zona de combustión es un elemento crítico en estos gasificadores ya que si la temperatura en esta zona es baja no va a permitir el craqueo de alquitranes, perdiendo el propósito del diseño. Por otro lado el gas liberado tiene gran cantidad de cenizas y hollín, para lo cual se acoplan sistemas de retención de cenizas y filtros para el acondicionamiento gas. (Sánchez, 2003)

2.12.3 Gasificadores de flujo cruzado

En los gasificadores de flujo cruzado el gas es retirado lateralmente de la cámara de gasificación a la misma altura en el lecho en que es inyectado el aire, el inyector de aire es fijo para inyectar directamente en la zona de combustión, se caracteriza por producir un gas combustible con características intermedias entre los gasificadores co-corriente y contracorriente.

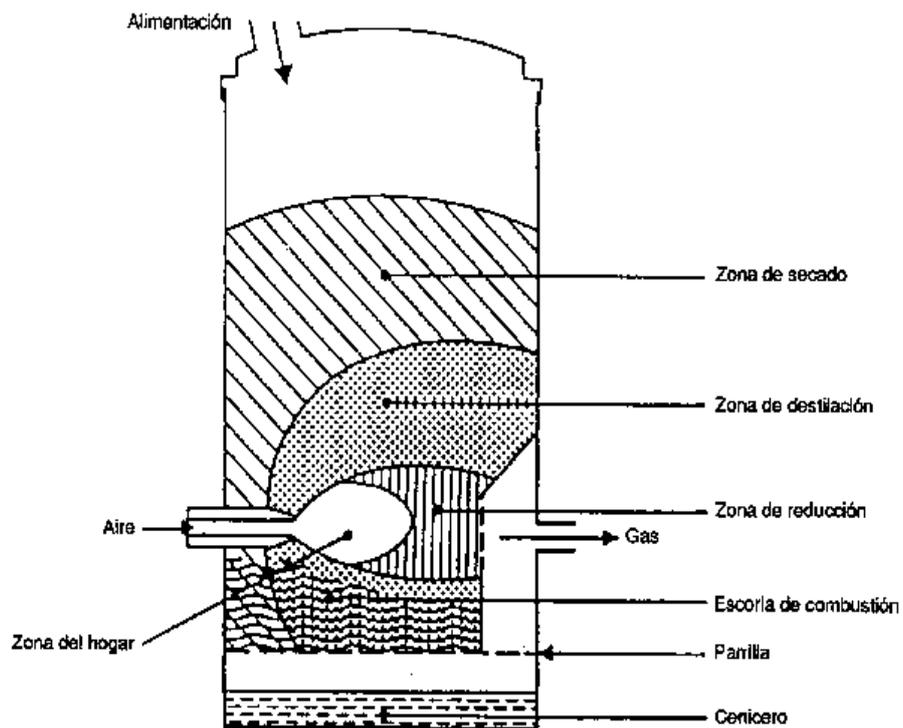


Figura 9 Gasificador de Flujo Cruzado.

Fuente (FAO, 1993)

La tasa de suministro de aire es considerablemente mayor que en otros tipos de gasificadores por lo que se crea una zona de combustión con

liberación de gases más rápida, ambas zonas de reducción y combustión son concentradas en un pequeño volumen en el centro del gasificador con el uso de material refractario es primordial. Las principales ventajas es la rápida respuesta a variaciones de carga, su construcción es simple. Su desventaja es que son muy sensibles a las variaciones en la composición y humedad de combustible, requiriendo casi siempre carbón vegetal limpio y seco. (Sánchez, 2003)

2.12.4 Gasificador de lecho fluidizado.

Un gasificador que puede convertir los residuos de biomasa en un gas libre de alquitrán con alta conversión de carbón e alta eficiencia térmica. En este gasificador las partículas de combustible son mantenidas suspendidas en el lecho de partículas inertes (arena o cenizas) fluidizadas por el flujo de aire, creando mejores condiciones de transferencia de calor y homogeneidad de la temperatura de la cámara de reacción en esta condición la mayoría de compuestos volátiles estará en contacto con las partículas del lecho calentado, contribuyendo con una gasificación completa y limpia.

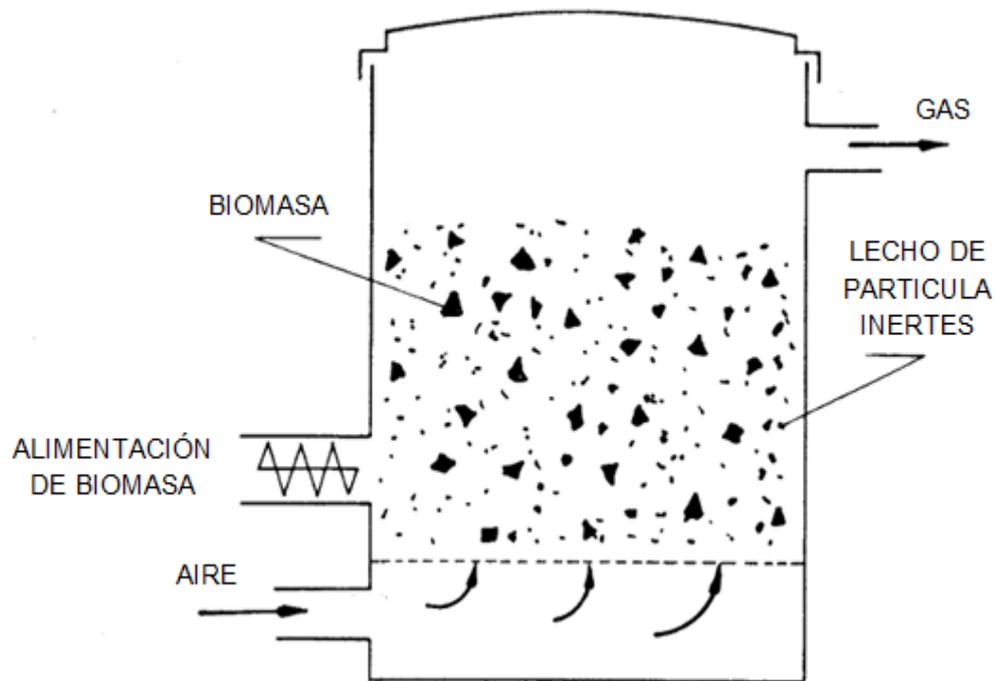


Figura 10 Gasificador de lecho fluidizado

Fuente (FAO, 1993)

2.13 TECNOLOGIAS DE DEPURACIÓN DEL GAS.

El problema principal de la producción de gas para la utilización en motores es la eliminación de partículas y alquita, cuya cantidad depende del tipo de gasificador y del combustible empleado.

2.13.1 Ciclones

Ciclones convencionales retienen partículas de hasta 10 micras del 60 – 70% del total de partículas producidas, además su rango máximo de operación es de 900°C, se debe adaptar otros sistemas para eliminación de partículas más pequeñas.

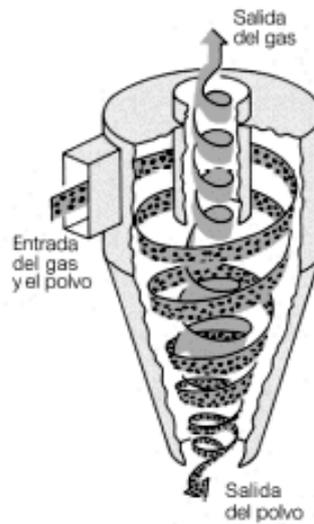


Figura 11 Esquema funcionamiento del Ciclón

Fuente (S&P, México, 2013)

2.13.2 Filtros de tela, cerámicos y metálicos.

Los filtros de tela demostraron ser efectivos pero con tela de fibra de vidrio u otro tipo de material resistente a altas temperaturas, mayores a 100°C para evitar condensaciones de la humedad y evitar las rápidas obstrucciones del filtro.

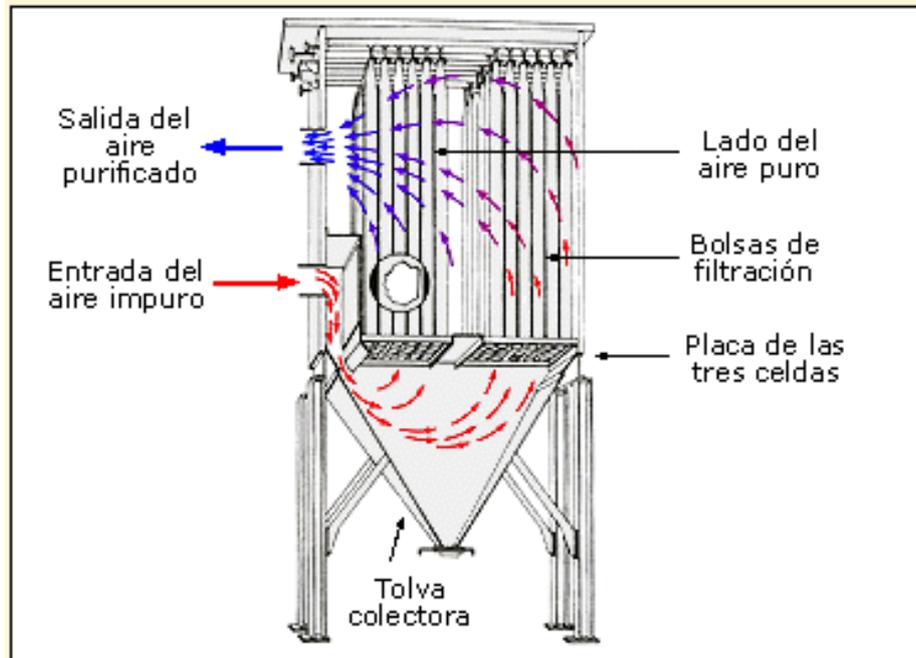


Figura 12 Filtro de tela

Fuente (Fonseca, 2003)

Pasar por filtros cerámicos o metálicos el gas caliente y a presión a través de los poros del material filtrante retiene las partículas casi en su totalidad, incluida los metales alcalinos que lleva la gasificación, estos filtros son de muy elevado costo y su operación requiere grandes presiones, se usan en instalaciones de gasificación de lecho fluidizado integrada turbinas a gas, trabajan entre los 450°C y 550°C y la presión entre 8 y 10 bar. El mayor problema con estos filtros es la obturación, por lo tanto el mantenimiento tiene un costo elevado.



Figura 13 Filtros cerámicos

Fuente (Chemicals, 2014)

2.13.3 Craqueo catalítico, térmico.

Como los alquitranes son compuestos orgánicos de alto peso molecular, tiene un contenido energético que se puede aprovechar cuando se produce grandes cantidades de alquitrán, esto se produce en gasificadores de lecho móvil en contra corriente, el craqueo térmico necesita un aporte adicional de calor que se lleva a cabo inyectando una pequeña cantidad de aire u oxígeno provocando una combustión del gas de síntesis.

El craqueo catalítico se usa catalizadores como dolomita, olivino y compuestos de níquel, especialmente en los gasificadores de lecho fluidizado por la facilidad de dosificación.

2.13.4 Filtros electrostáticos

Capturan partículas sólidas de diferentes tamaños presenta una elevada eficiencia de captación de partículas, presentan una gran sensibilidad a variables eléctricas, como el voltaje y la frecuencia de suministro de energía eléctrica.

Una manera eficiente de limpiar y enfriar el gas hasta los 60-80°C es usando los sistemas electrostáticos, el problema es que al enfriar el gas se condensa la humedad, resultando agua contaminada con disolventes orgánicos que requieren un adecuado tratamiento.

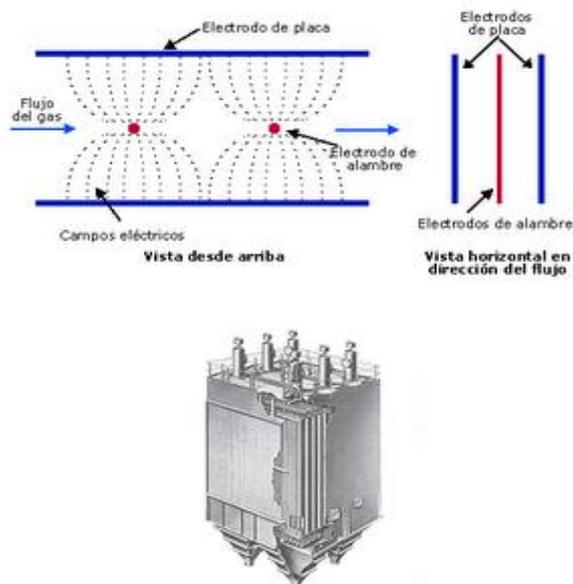


Figura 14 Filtro electrostático

Fuente (Silva Castro, 2010)

2.14 RIERGOS AL USAR GAS SINTERIZADO

El uso de gas de síntesis como combustible genera riesgos tóxicos, de incendio, de explosión y ambientales.

2.14.1 Riesgos Tóxicos

La producción importante de monóxido de carbono, un gas extremadamente tóxico y peligroso debido a que se mezcla con la hemoglobina de la sangre y evita la absorción y distribución de oxígeno. En el ANEXO A se encuentra la información sobre el envenenamiento por monóxido de carbono.

2.14.2 Riesgos de incendio

Los incendios pueden originarse cuando hay una elevada temperatura en el exterior del gasificado, cuando saltan chispas cerca de la salida del gas sinterizado, para disminuir el riesgo de incendio se debe aislar las partes más calientes del sistema.

2.14.3 Riesgo de explosión

Se puede producir riesgos de explosiones si el gas sinterizado se mezcla con el aire formando una mezcla explosiva, si se filtra aire al sistema puede producir explosiones, durante el apagado del sistema también se puede producir una explosión ya que se eleva la presión dentro del gasificador.

2.14.4 Riesgos ambientales

Durante el proceso se producen residuos sólidos como las cenizas y residuos líquidos como agua ácida, alquitranes que son hidrocarburos pesados y resinas fenólicas. Las cenizas no constituyen riesgo alguno ya que se las puede utilizar como abono agrícola, pero los líquidos condensados del proceso de gasificación son altamente contaminantes.

Las emisiones en los Motores de combustión interna adaptados a gas sinterizado se consideran aceptables ya que el impacto de que funcione con gas de síntesis es menor al provocado por motores a gasolina o a diésel.

CAPITULO 3

DISEÑO SISTEMA DE GASIFICACIÓN.

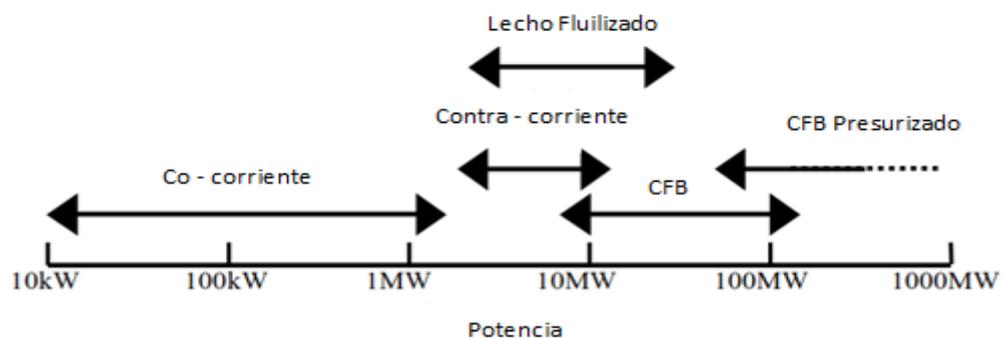
3.1 PARTES FUNDAMENTALES DEL SISTEMA

Cada Sistema de gasificación consiste de 4 partes fundamentales:

- El reactor del gasificador.
- La alimentación.
- La limpieza del Gas.
- La utilización del Gas Combustible.

3.1.1 El Reactor de Gasificación.

Se han desarrollado diferentes tecnologías adecuadas para cada escala de utilización. Como se muestra en la Figura 15.



CFB: Lecho fluidizado circundante.

Figura 15 Tipos de gasificadores y potencias óptimas de funcionamiento.

Fuente (ALTERNER, 2002)

3.1.2 La alimentación.

En los gasificadores de lecho presurizado la alimentación es problemática, pero como se escogió un gasificador co-corriente la alimentación se realiza a la presión atmosférica por lo que este adoptara la tecnología desarrollada para combustión de biomasa.

3.1.3 La limpieza del gas.

La limpieza del gas está basada en la remoción de alquitranes y material particulado proveniente de la gasificación, los implementos más adecuados para la remoción de partículas en la utilización MCI A son los ciclones y para la retención de alquitranes y compuestos pesados son los filtros con material particulado.

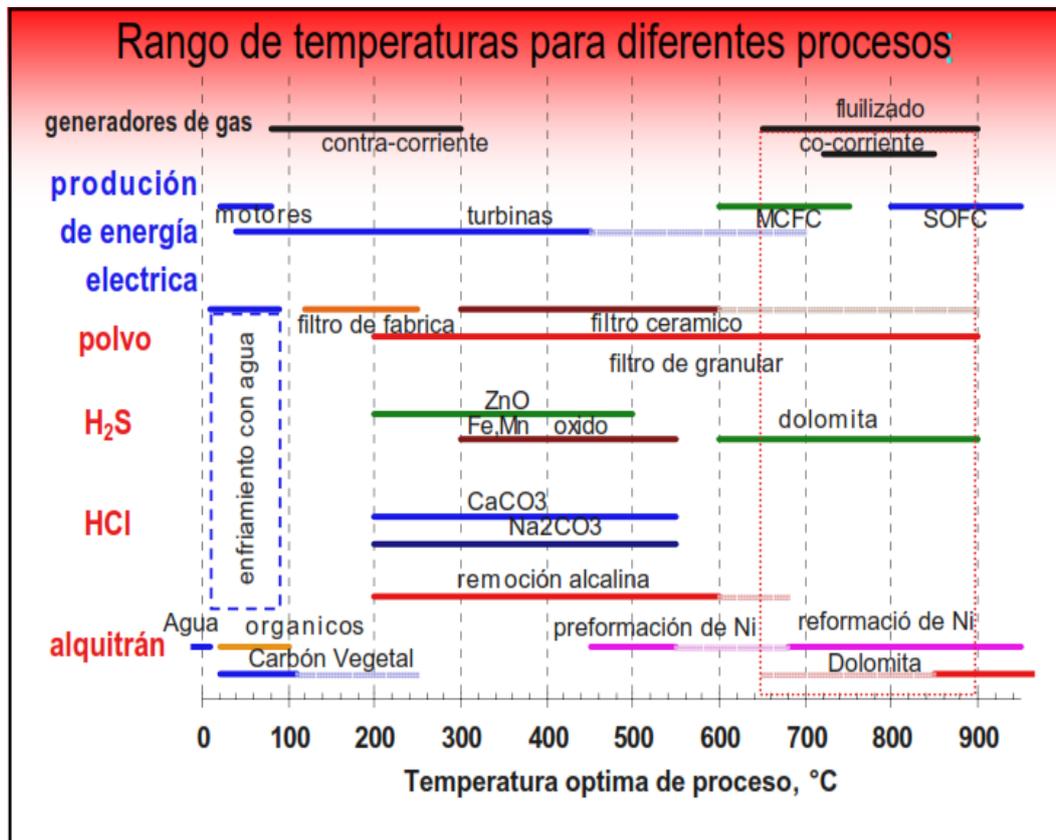


Figura 16 Resumen de los métodos catalizadores para limpieza de gas de síntesis atendiendo las impurezas y temperaturas de los procesos.

Fuente (Skoblja S., Malecha J., Koutsky B., Buryan P., 2005)

3.1.4 Utilización del gas combustible.

Es indispensable saber dónde va a ser utilizado el combustible gaseoso, ya que de aquí se va a incorporar los procesos de limpieza. Por ejemplo la utilización del gas va a ser la generación de calor directa no es necesario tener un gas puro, pero en nuestro caso es la adaptación para MCIA (motor de combustión interna alternativo) con los que los requerimientos de partículas y porcentaje de alquitrán se deben estar controlados ya que puede

incidir directamente sobre el rendimiento del motor, puede obstruir las válvulas del motor y desgastar las camisas del pistón.

Para la utilización dentro del motor necesariamente el gas sinterizado tiene que enfriarse hasta los requerimientos de operación máximos de 80°C, además mientras más baja sea la temperatura el gas va a estar más densificado y con mejores características para su combustión.

3.2 COMPARACIÓN ENTRE DISTINTOS TIPOS DE GASIFICADORES.

Tabla 6 Parámetros en diferentes tipos de gasificadores.

Tipo de gasificador	Pr esión de Opera ción (bar)	Te mperat ura de operaci ón del reactor (°C)	R eacta nte O ₂ Aire	PCI (MJ/Kg)	Poten cia MWth	Conteni do de polvo
Co- corriente (Downdr aft)	1	700 – 1200	O ₂ Aire	4,5 – 5	< 5	Bajo (bajas velocidades)
Contra- corriente (Updraft)	1	700 – 900	O ₂ Aire	5,0 – 6,0	< 20	Bajo (bajas velocidades)
BFB Lecho Fluidizado Burbujeante	1 – 1,35	650 – 950	O ₂ o Aire	4 – 15	3 – 100	Muy Bajo (tras paso por ciclón)
CFB Lecho Fluidizado Circundante	1 – 1,19	800 – 1000	O ₂ Aire	4 – 7,5	20 – 100	Muy Bajo (tras paso por ciclón)

(Rodríguez Muños, sf)

3.3 ELECCIÓN DEL GASIFICADOR A IMPLEMENTAR.

Tabla 7 Matriz de ponderación del gasificador

Tipo de Gasificador	Criterios de selección	ponderación				
		1	2	3	4	5
Tipo Downdraft	Utilización en MCI				X	
	Potencia de 20KW					X
	Aire como agente gasificante				X	
	Baja Presión en el reactor				X	
	Cantidad de alquitrán y cenizas				X	
Tipo Updraft	Utilización en MCI				X	
	Potencia de 20KW			X		
	Aire como agente gasificante				X	
	Baja Presión en el reactor			X		
	Cantidad de alquitrán y cenizas		X			
BFB Lecho Fluidizado Burbujeante	Utilización en MCI				X	
	Potencia de 20KW	X				
	Aire como agente gasificante		X			
	Baja Presión en el reactor	X				
	Cantidad de alquitrán y cenizas					X
CFB Lecho Fluidizado Circundante	Utilización en MCI				X	
	Potencia de 20KW	X				
	Aire como agente gasificante		X			
	Baja Presión en el reactor	X				
	Cantidad de alquitrán y cenizas					X

Fuente (García D., 2014)

Calificación del gasificador:

Tipo Downdraft	21
Tipo Updraft	16
BFB Lecho Fluidizado Burbujeante	13
CFB Lecho Fluidizado Circundante	13

La potencia es uno de los requerimientos importantes, para implementar un gasificador de potencia de 20KW la elección óptima es un equipo co-corriente, lecho fijo “downdraft”. Con una presión de operación de 1 bar, baja presión, operación atmosférica, como agente gasificador se utiliza aire, ya que el vapor de agua y el oxígeno necesitan plantas externas para la producción de los mismos elevando significativamente el costo del sistema, la temperatura de operación de 700 - 1200°C, con un contenido de polvo bajo para la utilización en un MCIA.

3.4 DISPONIBILIDAD DEL MCIA.

En el laboratorio de Motores de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se dispone de un motor de combustión interna marca Ford con las siguientes características.

Tabla 8 Características del MCI

Motor	
Tipo	4 cilindros en línea
Cilindraje (cc)	1298
Carrera (mm)	62,99
Diámetro pistón (mm)	80,99
Compresión	9.0:1
Potencia (HP)	57 a 5500rpm
Torque (lb/pie)	67,9
Encendido	Chispa

3.5 PUESTA A PUNTO DEL MOTOR

3.5.1 Estructura y soportes.

El motor es estático por lo cual se le realizó una estructura de acero soldada con sus respectivos soportes, los cuales se los colocaron en los cuatro apoyos del motor, se le colocó ruedas para poder movilizar el motor cerca del gasificador.



Figura 17 Fotografía Estructura y soportes del motor

Así como la estructura del tanque y probeta de gasolina, que sirve para el soporte del tanque de gasolina y la medición del consumo específico de gasolina conectado directamente al carburador del motor.

3.5.2 Mantenimiento mecánico

Se realizó la limpieza de todo el sistema de carburación, limpieza de todos los componentes y colocación de nuevos empaques, reparación de

mangueras de refrigeración, cambio de aceite, filtro de aceite, bujías y bandas.



Figura 18 Fotografía de componentes reemplazados

3.5.3 Mantenimiento de sistema eléctrico

Reparación del inducido y cambio de carbones en el motor de arranque, colocación del dinamo con su respectivo regulador gauss, swicht de

encendido, arreglo de cables de alta tensión, arreglo del distribuidor, cambio de la bobina de encendido.



Figura 19 Fotografía de componentes eléctricos reemplazados

3.5.4 Refrigeración del motor

Se la realiza mediante el sistema de agua presurizada, se conecta directamente a la toma la bomba de agua que refrigera todo el motor.

3.6 ESQUEMA TÍPICO DEL FUNCIONAMIENTO DE UN GASIFICADOR CON UN MCIA

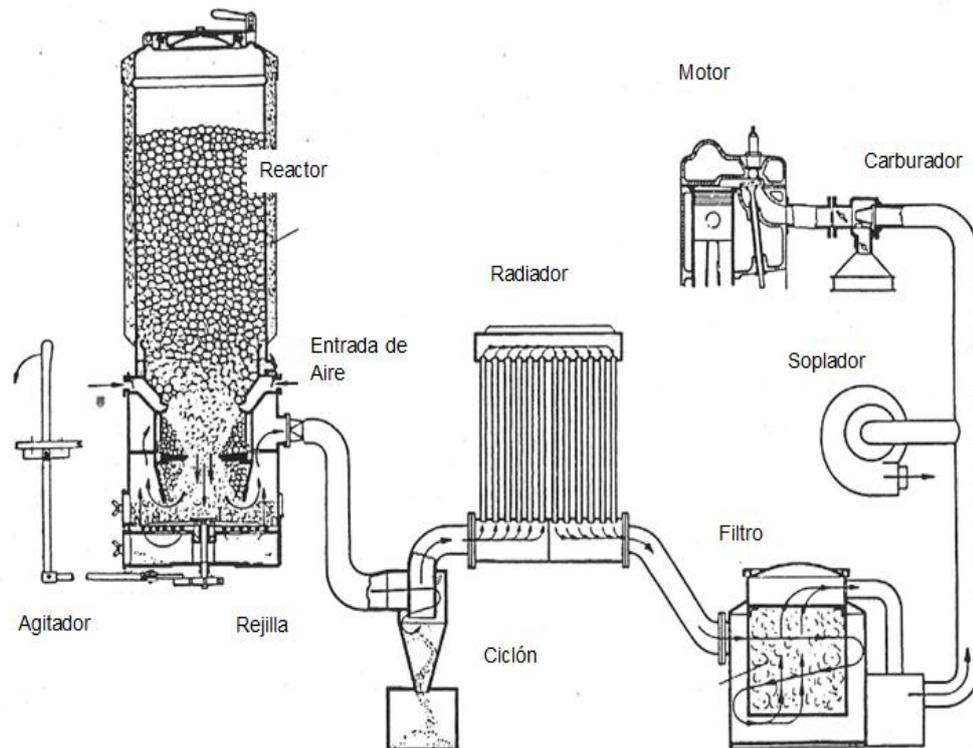


Figura 20 Esquema gasificador – motor

Fuente (Solar Technical Information Program, 1988)

En la figura 20 se representa un gasificador downdraft, con 2 entradas de aire, cuyo flujo de gas sale lateralmente por las paredes del reactor con aislamiento térmico. El equipo que realiza el trabajo de extracción de gas sinterizado es el soplador, el gas pasa por el gasificador a través del ciclón, donde se extrae el material particulado, pasa por un radiador donde es enfriado en el radiador también se condensan los alquitranes y agua ácida, pasa a través del filtro con material granulado, que se encarga de retener alquitranes y material particulado sumamente fino, el soplador inyecta el gas

enfriado y limpio hacia el carburador donde se regula la mezcla estequiométrica aire combustible (gas sinterizado), y por último la mezcla es quemada en la cámara de combustión produciendo la transformación de energía química a energía mecánica.

3.7 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN.

3.7.1 Carga de la biomasa

3.7.1.1 Tolva

La tolva e desarrollada con un tanque de almacenamiento de aceite de 30 galones, interiormente tiene una lámina de acero en la parte inferior de la tolva de que permite la caída de la biomasa por medio de la inclinación de sus paredes, así también ayuda una superficie lisa que no permite a la biomasa acumularse en el fondo ni pegarse a las paredes de la tolva, el diseño permite que caiga por medio de la fuerza de gravitacional a siguiente elemento que es el intercambiador de calor de secado.



Figura 21 Esquema de la tolva

Capacidad

Ecuación 1 densidad

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho = 800 \frac{kg}{m^3}$$

$$V = 30 \text{ gal}$$

$$m = \rho \times V$$

$$m = 800 \frac{kg}{m^3} \times 30 \text{ gal} \times \frac{3,785 \text{ l}}{1 \text{ gal}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}}$$

$$m = 90,84 \text{ Kg}$$

La carga máxima de biomasa es de 90,84 Kg siendo esta cualquier tipo de madera con densidad de 800kg/m^3



Figura 22 Fotografía de tolva

Consta con una tapa hermética con sus respectivos empaques, en la cual se encuentra una válvula de alivio, funciona cuando se producen contra explosiones dentro del gasificador y la presión se eleva lo suficiente para activar esta válvula.



Figura 23 Fotografía tapa de tolva y válvula de alivio.

Flujo de masa en la tolva.

El flujo de biomasa es un problema serio, cuando la biomasa deja de fluir puede causar problemas serios aguas abajo, incluyendo sobrecalentamiento del reactor y reducción de calidad del gas. Diferentes materiales tienen diferentes ángulos de reposo que influyen en el reposo de la biomasa, las partículas más pequeñas fluyen fácilmente a través de cualquier elemento, pero si son materiales muy polvorientos y de tamaño muy pequeño entran en juego las fuerzas cohesivas. El material ideal para el sistema de gasificación es el chipeado de madera.

Flujo másico

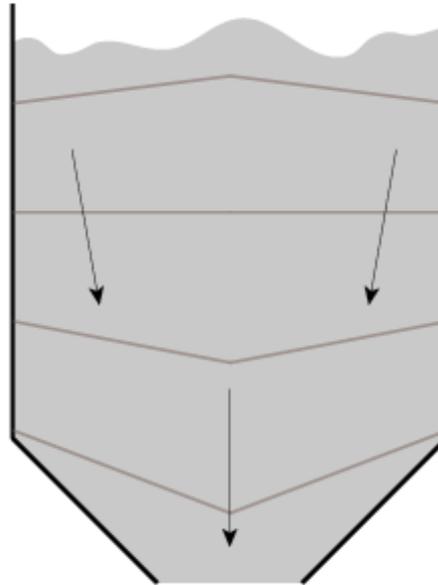


Figura 24 Flujo másico en la tolva

Fuente (Mason, 2009)

3.7.2 Sistema de alimentación de Biomasa

Hay diferentes sistemas de alimentación de biomasa, hay que tomar en cuenta que la alimentación de biomasa debe ser hermética con relación al proceso es decir que ninguna compuerta se puede abrir durante la gasificación. Por lo cual el sellado mecánico que impide que el gas salga por las compuertas de alimentación de biomasa y el sellado por tapón esto quiere decir por la propia biomasa se sella el sistema.

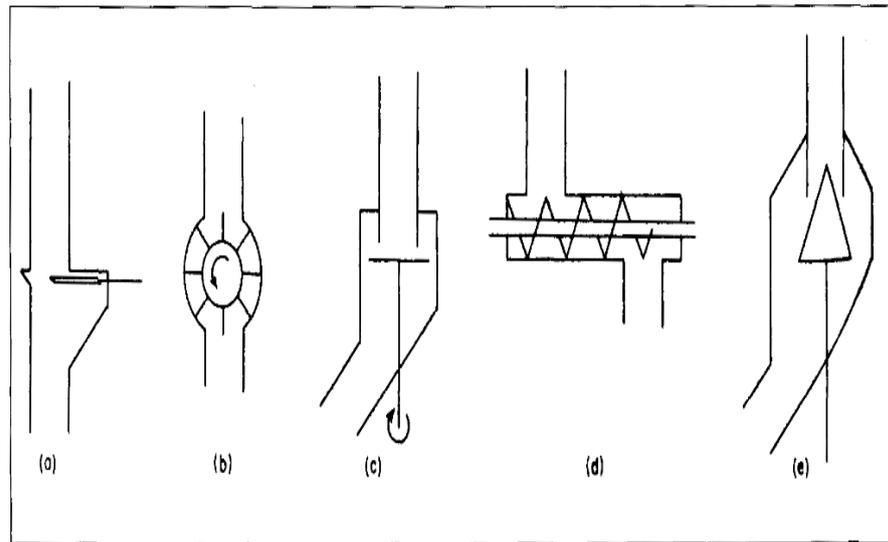


Figura 25 Dispositivos de alimentación de biomasa

Fuente (Solar Technical Information Program, 1988)

Donde:

- a. Válvula lateral
- b. Válvula de estrella
- c. Alimentación por tabla
- d. Tornillo sin fin
- e. Válvula cónica

Tabla 9 Matriz de ponderación dispositivo de alimentación

Dispositivo de alimentación	Criterios de selección	ponderación				
		1	2	3	4	5
Válvula lateral	Robustez			X		
	Separación Zona de secado	X				
	Control Electrónico				X	
	Trabajo a altas Temperaturas				X	
	Alimentación continua		X			
Válvula estrella	Robustez				X	
	Separación Zona de secado	X				
	Control Electrónico				X	
	Trabajo a altas Temperaturas				X	
	Alimentación continua			X		
Alimentación por Tabla	Robustez				X	
	Separación Zona de secado			X		
	Control Electrónico				X	
	Trabajo a altas Temperaturas				X	
	Alimentación continua			X		
Tornillo sin fin	Robustez					X
	Separación Zona de secado					X
	Control Electrónico				X	
	Trabajo a altas Temperaturas				X	
	Alimentación continua					X
Válvula Cónica	Robustez				X	
	Separación Zona de secado			X		
	Control Electrónico				X	
	Trabajo a altas Temperaturas				X	
	Alimentación continua			X		

(García David, 2014)

Calificación del dispositivo de alimentación:

Válvula lateral 14

Válvula estrella 16

Alimentación por Tabla	18
Tornillo sin fin	23
Válvula Cónica	18

Siendo el más calificado el Tornillo sin fin, con una robustez optima y el único que separa en 90 grados la zona de secado con la zona de pirólisis, a demás es muy sencillo de controlar mediante un motor.

3.7.2.1 Tornillo sin fin.

Dentro del intercambiador de calor de secado se coloca el tornillo sin fin para alimentar de biomasa a todo el gasificador, es impulsado por un motor eléctrico de corriente continua de 12 V, y controlado por el sensor de nivel de combustible. Fijado a través de un eje cojín el cual permite el giro de tornillo dentro del intercambiador de calor de secado.

3.8 INTERCAMBIADOR DE CALOR (ETAPA DE SECADO)

Es alimentado por la tolva, aquí la biomasa pasa por su etapa de secado donde se libera el porcentaje de humedad contenido en ella, El intercambiador de calor de secado utiliza el gas de síntesis producido en la gasificación para calentar la biomasa. Es un recipiente de doble pared en el cual internamente fluye el gas de síntesis caliente alrededor de 350°C, internamente seca la biomasa y la pared del exterior está a temperatura ambiente.

Este intercambiador de calor aumenta la eficiencia del gasificador, por que recupera calor generado en todos los procesos de gasificación, reutilizándolo en el proceso de secado y al mismo tiempo enfría el gas de síntesis producido, evitando la utilización del radiador para el condensado y el enfriamiento del gas.

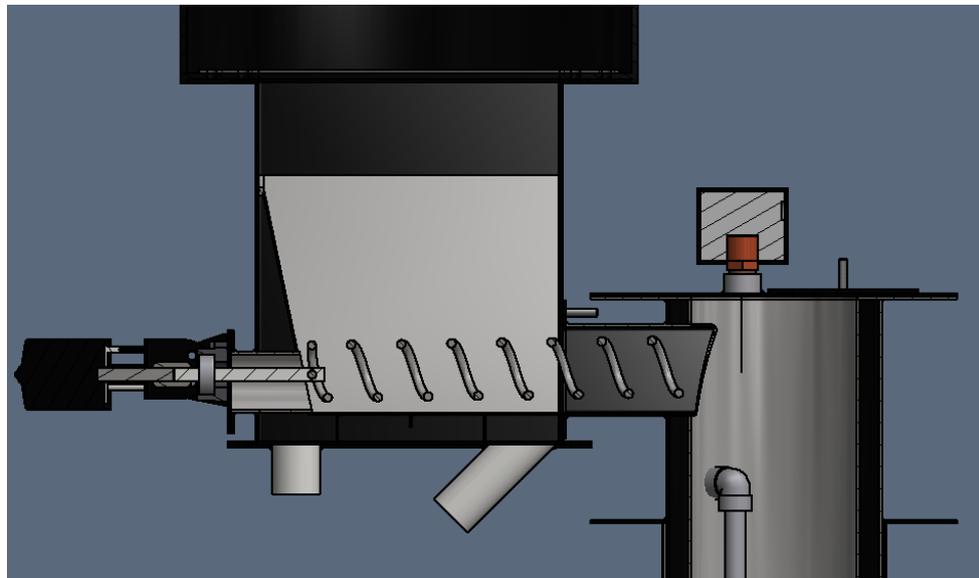


Figura 26 Esquema Intercambiador de calor Etapa de secado

Esta desarrollado para conectarse al intercambiador de calor de pirolisis y sostener la tolva encima suyo en forma de L con para separar la zona de secado y de pirolisis, es una ventaja porque el agua proveniente de la zona de secado no compite con el calor necesario para vaporizar el alquitrán de la biomasa, si se mezcla el agua en la zona de pirolisis causa una disminución de la solubilidad del alquitrán ya que esta propiedad depende de la temperatura. Disminuye la eficiencia de combustión y craqueo de alquitranes

ya que las partículas de hollín y alquitrán tienden aglomerarse alrededor de las gotas de agua aumentando el aumento del tamaño de la gota y provocando una oxidación parcial.

3.9 INTERCAMBIADOR DE CALOR PIROLISIS

Es un intercambiador de calor de gas circundante (gases de escape del motor) utilizado para introducir fuentes de calor externas a la zona de pirolisis del gasificador. Una fuente de calor externa ayuda a mejorar significativamente la dinámica de pirolisis, lo que resulta en una ruptura fácil de alquitranes, así como la eliminación de la resistencia térmica de la zona de reducción.

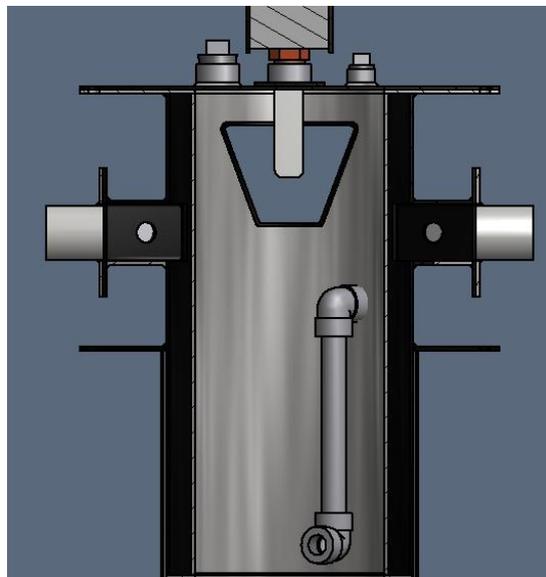


Figura 27 Esquema Intercambiador de calor de Pirólisis

Se adhiere al reactor mediante la brida circular y mediante las bridas cuadradas ingresa y sale los gases de escape.

Recibe la biomasa del intercambiador de calor de secado ayudado por el tornillo sin fin.

3.9.1 Tapa del Intercambiador de calor de pirolisis

La tapa tiene un orificio el cual va a ser útil para revisar todo el funcionamiento del sistema, verificar encendido, consumo de biomasa, la producción de gas, y revisar cualquier alteración en los procesos de la gasificación. En la tapa está instalado el sensor de nivel de combustible.

3.9.2 Puerto de iluminación

El puerto de iluminación es un tubo que cruza por toda la pared del intercambiador de calor, sirve para el encendido del gasificador ya que durante este proceso, la ingesta de la mezcla aire y propano se lo realiza por este puerto.

3.10 REACTOR

Es el principal componente de todo el gasificador.

Dimensionamiento basado en diseño de reactores de lecho fijo tipo downdraft elección del tamaño de los inyectores y ancho de la campana y reducción de la misma. De la figura 28 se obtiene todas las dimensiones, consumo de biomas, flujos máximos de aire y gas.

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	Range of Gas Output		Maximum Wood Consumption	Air Blast Velocity
												max. Nm^3/h	min. Nm^3/h	kg/h	V_m m/s
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

Variables not given in figure are defined as follows:

d_m = inner diameter of the tuyere.

A_m = sum of cross sectional areas of the air jet openings in the tuyeres.

A_h = cross sectional area of the throat.

A = number of tuyeres.

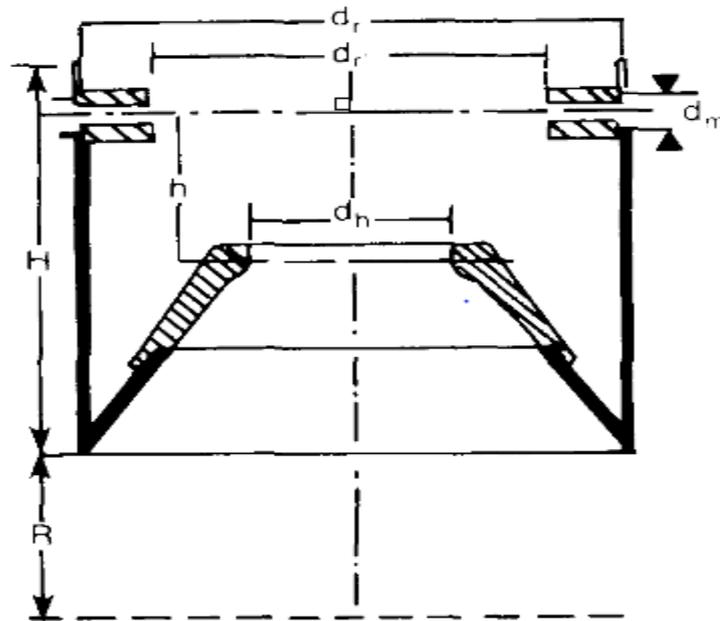


Figura 28 Inyectores y dimensiones de la campana del gasificador downdraft

Fuente (Solar Technical Information Program, 1988)

Cálculos del reactor

$$dm = \frac{1}{4} \text{ pulg}$$

$$h = 2,5 \text{ pulg}$$

$$H = 8,5 \text{ pulg}$$

$$dh = 4 \text{ pulg} = 101,6 \text{ mm}$$

$$dr = 14,5 \text{ pulg} = 368 \text{ mm}$$

$$\dot{d}r = 7 \text{ pulg}$$

$$R = 4 \text{ pulg}$$

$$dn = \frac{1}{4} \text{ pulg}$$

Se eligió la relación con 5 inyectores

$$\frac{dr}{dh} = \frac{368 - (2 \times 50)}{101,6} = \frac{268}{101,6}$$

Donde la resta de 50 por 2 representa el ancho a través del cual pasa el gas para la salida y su disposición tipo j de inyectores.

Para los cuales tiene un consumo máximo de combustible de 30 Kg/h, una salida mínima de gas de 8 Nm³/h y máximo de 63 Nm³/h, y una velocidad de inyección de aire de 22,4 m/s

3.10.1 Camisa de acero inoxidable

La camisa de acero inoxidable recubre a todo el reactor, diseñada con sus respectivos agujeros para la colocación de los puertos de ceniza, el agitador, entrada de termocuplas y salida de gas.

3.10.2 Aislante térmico

El aislante térmico que se utiliza es lana de vidrio que se coloca alrededor de todo el reactor, así se evita la pérdida de calor en las paredes del gasificador.

Se eligió lana de vidrio porque es un buen aislante térmico, por su baja resistividad térmica, es muy fácil de colocar, existente en el mercado y con un bajo costo.

3.10.3 Campana

Fabricado en acero inoxidable, es una reducción donde están colocados los cinco inyectores de aire en la zona de combustión. En el espacio entre la camisa y la reducción se coloca material aislante granular (piedra pómez o cenizas del proceso de gasificación), para que el calor del proceso de combustión no afecte a otros procesos como el ingreso de aire y la salida de gas de síntesis.

La campana es el corazón del gasificador ya que controla la velocidad del flujo por lo tanto el tiempo de residencia de los gases que pasan a través de la zona de combustión y reducción.

3.10.4 Inyectores de aire

Son 5 inyectores la disposición de los inyectores son en forma de tubo en J el cual recibe el aire a presión atmosférica y lo ingresa precalentado directamente al centro de la campana en la zona de combustión. Este diseño de inyectoras aumenta la eficiencia del gasificador ya que recupera calor del gas de síntesis producido y precalienta el aire para llevarlo a un punto de auto inflamación alrededor en la zona de combustión con los gases alquitranados. Medida de la boquilla de los inyectores es de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

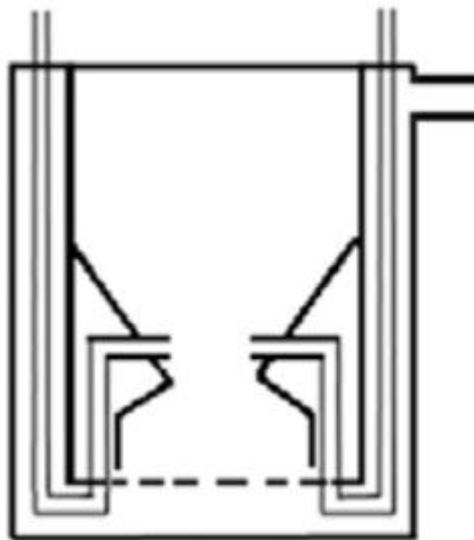


Figura 29 Inyector de aire tipo J con pre calentamiento del aire

(Mason, 2009)

3.11 ENTRADA DE AIRE

La entrada de aire se realiza a través de una abertura en el reactor que comunica con una cavidad superior, la cual distribuye la entrada de aire a 5 tomas de mangueras. La ingesta de aire se lo realiza a presión atmosférica.

Para el encendido la entrada de aire se lo realiza a través del puerto de iluminación ubicado en el intercambiador de calor de pirolisis, esto debido a que se debe encender todo el carbón para dar paso a todos los procesos de gasificación.

3.11.1 Mangueras

Las mangueras de acero inoxidable están colocadas alrededor del gasificador y se conectan con los inyectores de aire que van directo a la zona de combustión. Esta disposición ayuda al precalentamiento del aire que ingresa a la zona de combustión. Así se eleva el aire a una temperatura de auto ignición del gas de síntesis aumentando la eficiencia de la ingesta de aire a condiciones normales, y evitando el choque térmico en la zona de combustión de los alquitranes descompuestos en la zona de pirolisis con el aire.

Especificaciones de la manguera flexible de acero inoxidable:

- Estándar: DIN,
- Grado: 304

- Rango de OD: 30-400m m
- Rango de espesor de pared: 0.28-1.0mm
- Longitud: 1,5 m
- Tipo: tipo corrugado anular o helicoidal
- Max. presión de trabajo: 10Mpa
- Temperatura de trabajo: -200 ~ +900 ° c
- Tipo de conexión: brida giratoria.



Figura 30 Fotografía de mangueras

3.12 SOPORTE CAMA DE CARBON (CENICERO)

Para que el carbón realice la etapa del craqueo debemos colocarlo sobre una superficie, la cual es una lámina de acero perforado apoyado en la camisa interna de acero inoxidable, el cual internamente tiene un sistema de agitación que se la realiza manualmente para retirar toda la cantidad de ceniza acumulada de los procesos previos de pirolisis y combustión.

Sostenido por pernos colocados en agujeros de la camisa de acero inoxidable, diseñado con una pestaña que calza dentro del puerto de cenizas, evitando movimientos giratorios del soporte de carbón.

3.13 PUERTOS DE CENIZA Y AGITADOR

El agitador es manual, en la rejilla se encuentra la cama de carbón conectada a través de una varilla roscada y con el debido aislamiento térmico de fibra de vidrio para que no se caliente a manija del agitador. Si los fragmentos y residuos de la gasificación no son agitados, tapa la cama de carbones impidiendo el correcto flujo en la etapa de craqueo.

El puerto de cenizas colocado en la parte inferior del gasificador se utiliza para realizar los mantenimientos y limpieza del gasificador.

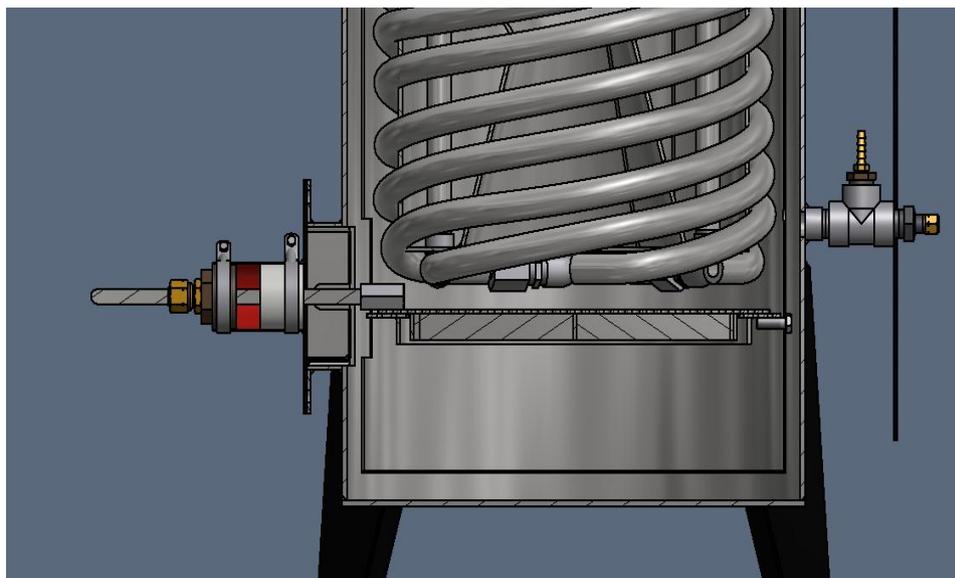


Figura 31 Agitador

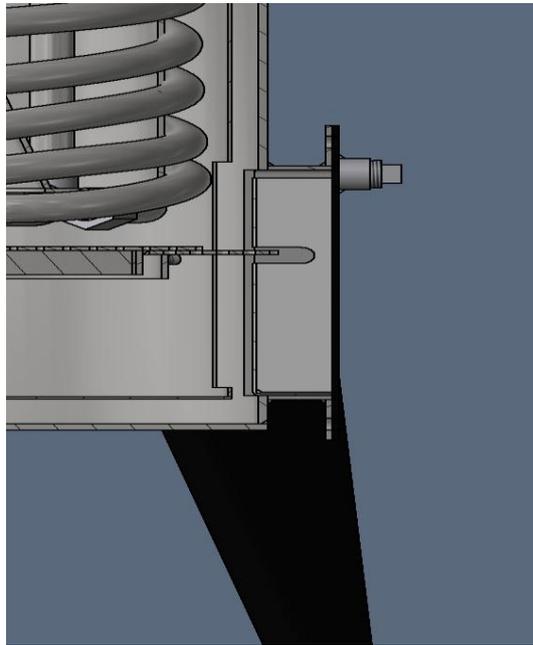


Figura 32 Puerto de cenizas

3.14 CICLÓN

El ciclón está fabricado en acero dulce es un cono truncado invertido que utiliza el principio de vórtice de un fluido, aumenta la velocidad de sedimentación inducida por la fuerza de gravedad, es esencialmente un separador gravitacional reforzado por una componente de la fuerza centrífuga, es un separador de partículas eficiente ya que separa partículas mayores a 10 micrómetros, se utiliza en rangos elevados de temperatura y su manufactura es barata.

Para un gasificador de 20kw de potencia se diseña el ciclón.

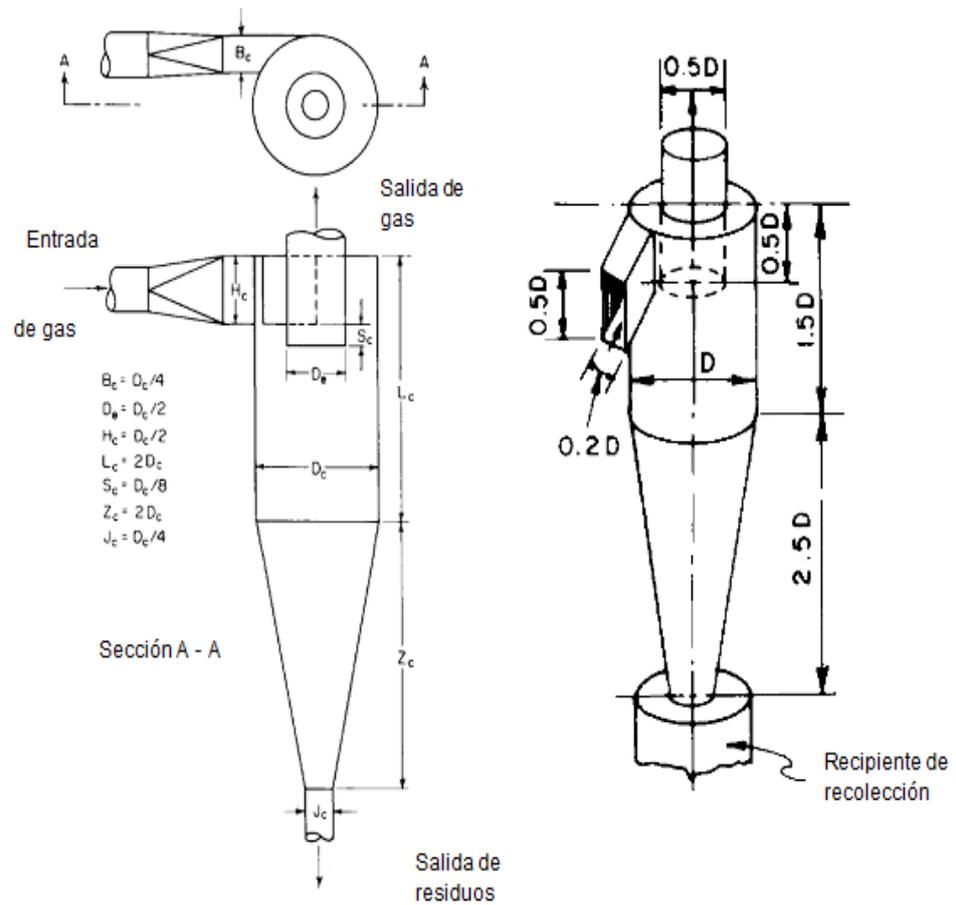


Figura 33 Dimensiones del ciclón

Fuente (Solar Technical Information Program, 1988)

Dónde:

$$\text{poder calorífico} = C_p = 5,8 \frac{MJ}{Nm^3}$$

$$\text{consumo específico} = 3 \frac{\text{Nm}^3}{\text{KWh}}$$

Ecuación 2 Requerimiento del gas

$$\text{Requerimiento gas} = \text{consumo específico} \times \text{Potencia}$$

$$\text{Requerimiento gas} = 3 \frac{\text{Nm}^3}{\text{KWh}} \times 20\text{KWh}$$

$$\text{Requerimiento gas} = 60\text{Nm}^3$$

Ecuación 3 Energía Producida

$$\text{Energía producida} = \text{requerimiento del gas} \times \text{poder calorífico}$$

$$\text{Energía producida} = 60\text{Nm}^3 \times 5,8 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3}$$

$$\text{Energía producida} = 348 \text{ MJ}$$

El ciclón funciona con temperaturas de alrededor de 300°C

Ecuación 4 Caudal función de temperaturas

$$Q = \text{requerimiento del gas} \times \frac{\text{Temp. funcionamiento}}{\text{temp Ref.}}$$

$$Q = 60\text{Nm}^3 \times \frac{573,16\text{K}}{273,16\text{K}}$$

$$Q = 126 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Ecuación 5 Velocidad del flujo de gas

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{126 \frac{m^3}{s} \times 10^4 \frac{cm^2}{m^2}}{6,35cm \times 6,35cm \times 3600 \frac{s}{h}}$$

$$V = 21,7 \frac{m}{s}$$

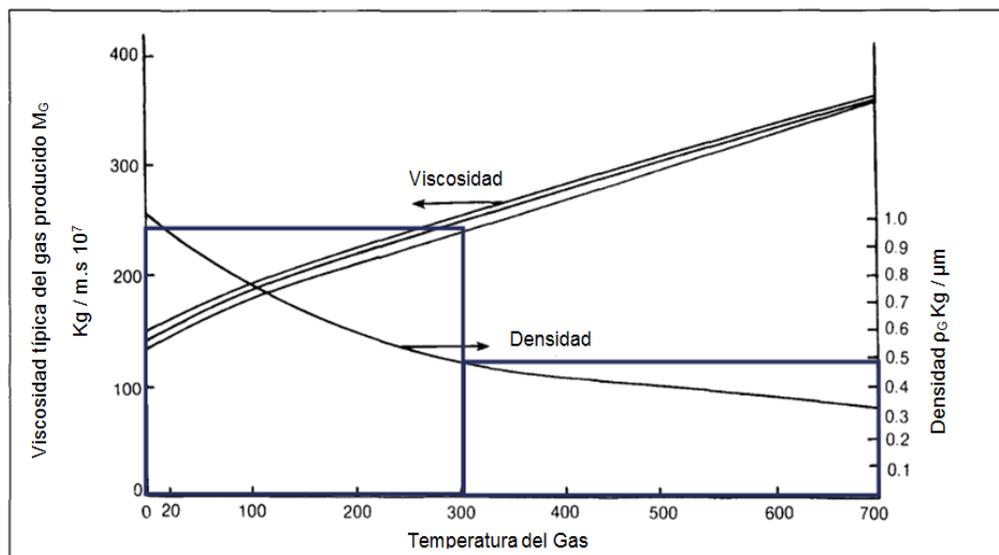


Figura 34 Densidad y viscosidad del gas en función de la temperatura

Fuente (Solar Technical Information Program, 1988)

La densidad de la ceniza es 2000 Kg/m^3 a la salida del gasificador y entrada al ciclón y la densidad del carbón de 200 Kg/m^3

$$\mu_{G(300^\circ C)} = 255 \times 10^{-7} \frac{Kg}{m \cdot s}$$

Ecuación 6 Tamaño de partícula capturado

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu_G b}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_G)}}$$

$b = \text{diametro de la entrada}$

Equivalencia diámetro lados del rectángulo

$$ab = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = 2 \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$$

Entrada de 2,5"x2,5"

$$D = 2 \sqrt{\frac{6,35cm \times 6,35cm}{\pi}}$$

$$D = 7,16cm$$

Para la ceniza

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9 \times (255 \times 10^{-7}) \frac{Kg}{m-s} \times 0,0716}{2\pi \times 5 \times 21,7 \frac{m}{s} (200 - 0,489) \frac{Kg}{m^3}}}$$

$$d_{pc} = 1,74\mu m$$

Para el carbón

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9 \times (259 \times 10^{-7}) \frac{Kg}{m-s} \times 0,0716}{2\pi \times 5 \times 21,7 \frac{m}{s} (200 - 0,489) \frac{Kg}{m^3}}}$$

$$d_{pc} = 1,75\mu m$$

3.14.1 Recipiente de recolección

Debajo del ciclón se coloca un recipiente de recolección de vidrio, sellado herméticamente al ciclón a través de un empaque de alta temperatura, Aquí se puede observar todas las impurezas que tiene el gas y también parte del condensado de alquitranes se deposita en este recipiente. Como el recipiente es de vidrio se le coloca un retenedor de acero que ayuda a sostenerse al ciclón y evitar la ruptura del recipiente por cualquier golpe.

3.15 CONEXIONES DE GAS

Las conexiones se las realizan a través de mangueras de acero inoxidable de una pulgada y media, son las más adecuadas ya que soportan temperaturas elevadas, se maneja presiones bajas. Los acoples se lo realiza

con abrazaderas industriales y se las sella herméticamente con silicona de alta temperatura.

3.16 FILTRO GRANULAR

El filtro es un tanque de aceite de galones 16 galones, el cual tiene la entrada del gas impuro, con partículas que no fueron retenidas en el ciclón y alquitrán, ingresa por la parte inferior, y la salida del gas limpio conectada al Venturi en la tapa superior el cual se encara de la extracción de todo el gas del sistema de gasificación a través de las diferencias de presiones en la entrada y salida del filtro, consta de un agujero de extracción de alquitrán una parrilla donde se asienta el material granular y se condensa todo el alquitrán filtrado.

El filtro se lo llena con material que no vaya a reaccionar con el gas de síntesis, en la base colocamos la parrilla sobre esta colocamos una capa de alambre fino de acero, sobre este colocamos el material granular grueso Carbón o chipeado de madera con una granulometría promedio de ½" a 1" (1,3 - 2,5cm) después se coloca un grano medio chipeado de madera con una granulometría de 1/8" a ½" (0.3 a 1,3cm), después se coloca el grano fino chipeado de madera muy fino (aserrín) con granulometría de 0,1 a 0,3 cm, de allí se coloca una lámina de Acero perforado con una esponja bañada en aceite encima de la lámina esto evita que el Venturi extraiga las partículas pequeñas de material granulado y que solo salga El gas limpio

para la utilización en el motor. También se puede colocar una tela después del material granular fino y así evitar la filtración de partículas pequeñas.

Este tipo de filtro es suficiente para utilizar el gas en un motor de combustión interna ya que retiene partículas de hasta 2 micras.



Figura 35 Fotografía de Material granular

A.- Granulometria grande $\frac{1}{2}$ " a 1" (1,3 - 2,5cm)

B.- Granulometria media $\frac{1}{8}$ " a $\frac{1}{2}$ " (0.3 a 1,3cm)

C.- Granulometria pequeña 0,1 a 0,3 cm

3.17 VENTURI

Es el sistema que controla toda la gasificación, ya que gobierna la ingesta de aire y la velocidad de succión del gas de síntesis, Está basado en el efecto Venturi el cual se conecta a una válvula aire a presión

subministrado por el compresor de aire el cual genera un flujo por un conducto cerrado disminuyendo su presión y aumentando su velocidad después de pasar por la reducción, Con este sistema se extrae todo el gas del Gasificador y del filtro. Es un sistema de extracción barato y muy fácil de operar.

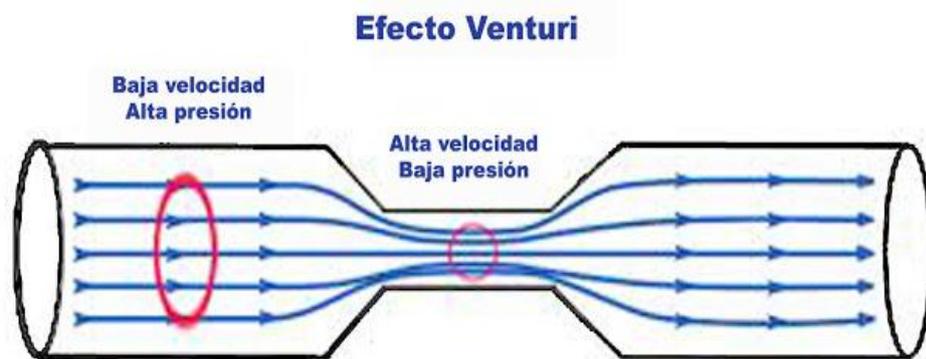


Figura 36 Efecto Venturi

(OLMO, 2014)

3.18 QUEMADOR

Desarrollado en acero inoxidable el quemador, se coloca al final del Venturi donde está la mezcla con aire aquí se quema toda la mezcla estequiométrica aire gas de síntesis. Se puede determinar la calidad del gas según el color de la llama en el interior del quemador.



Figura 37 Esquema del Venturi adaptado al quemador

3.19 DEPURADOR

Hace exactamente lo mismo que el quemador, aquí se le agregaron válvulas para controlar la mezcla estequiométrica aire - gas que ingresa al carburador y se combustiona en el motor de combustión interna.

Incluye dentro del depurador el filtro de aire, es la última barrera que recoge toda impureza que no haya sido podida retener mediante el filtro.



Figura 38 Fotografía del depurador adaptado válvulas de admisión de aire

3.20 EMPAQUES Y SELLOS HERMETICOS.

Todas las conexiones en el gasificador deben ser herméticas, ya que la entrada mínima de aire afecta a todo el proceso de gasificación, para los sellos se utiliza una cinta adhesiva cerámica de alta temperatura THERMEEZ 397PS -81M capaz de soportar temperaturas de 2600 °C, recubierta con mortero refractario de alta temperatura, se utiliza en las juntas empaques de alta temperatura y en todas las uniones, juntas y acoples se coloca silicona de alta temperatura para sellar y empalmar herméticamente para que no exista fugas ni pérdidas de presión.

3.21 INSTRUMENTACIÓN

3.21.1 Alarma de monóxido de carbono

Es una alarma digital de detección de CO, no confundir con alarma de detección de humo son muy diferentes, ya que el humo se puede juzgar inmediatamente con sus sentidos el grado de peligro al que está expuesto ya que al humo se lo puede ver, oler sentir el calor, y escuchar el incendio si se suscita, en cambio el CO es un gas incoloro, inodoro e insípido, no irritante que es completamente indetectable a los sentidos, por lo cual es sumamente importante esta alarma.



Figura 39 Foto alarma CO

3.21.2 Medidor de humedad

Es un instrumento de medición de humedad alimentado por una batería de 9V puede detectar humedades de hasta el 40%, funciona pinchando con las púas del medidor dentro de la biomasa y la lectura es la que indica en la pantalla.



Figura 40 Foto medidor de humedad

3.21.3 Sensor de nivel de combustible

Es un interruptor de corriente, el cual se controla a través de una paleta colocada internamente en el gasificador, censa el nivel de biomasa inyectada por el tornillo sin fin y cuando está lleno de biomasa, la paleta del sensor de nivel es activada, el swicht corta la corriente del motor conectado al tornillo sin fin dejando de suministrar biomasa al gasificador.



Figura 41 Foto sensor de nivel

3.21.4 Termocuplas

Se instaló en el sistema tres termocuplas tipo K , la primera colocada directamente en la cama de carbón , para medir la temperatura de formación del gas sinterizado, la segunda termocupla colocada por un conducto paralelo a la zona de combustión, y la tercera termocupla instalada en el motor para medir la temperatura de operación del motor.



Figura 42 Foto termocuplas

3.21.5 Manómetros de agua

Son dos manómetros de agua colocados en sobre una regleta de medición en pulgadas de agua, el primero está colocado directamente al gasificador, y la segunda colocada en el filtro del gasificador esta va ser muy importante ya que en el manejo del Venturi está relacionado con la presión del filtro, también indica cualquier tipo de obstrucción o taponamiento en el filtro.



Figura 43 Foto manómetros de agua

3.21.6 Caudalímetro Placa orificio

Para medir el caudal de aire que ingresa y el caudal de gas que se extrae se construyó una placa orificio, es un sistema robusto barato y de fácil operación.

Un fluido pasa a través de un orificio, una constricción donde experimenta una caída de presión la cual es utilizada para medir la velocidad del flujo

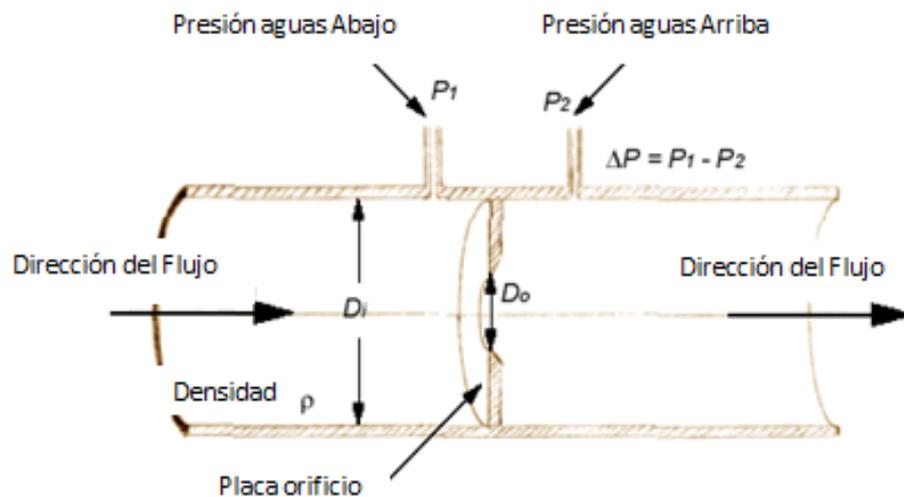


Figura 44 Esquema del funcionamiento de la placa orificio

Fuente (Efunda, 2014)

Dónde:

D_i = Diámetro interior del tubo

D_o = Diámetro del agujero de la placa orificio

ρ = Densidad del fluido

P_1 = Presión aguas abajo

P_2 = Presión aguas arriba

Su construcción fue a través de un tubo roscado a ambos lados se le soldó una arandela internamente. Se le colocó dos salidas de presión una antes de la arandela y otra después de la arandela, y la medición de la diferencia de presión se lo hizo mediante manómetros de agua.



Figura 45 Foto Placa orificio

La medición se lo realiza tomando la diferencia de presión entre los dos manómetros de agua, con el diámetro de la tubería y el diámetro del agujero en la reducción se obtiene directamente el caudal de aire o gas.

Calculo para el uso de la placa orificio

Uso de las ecuaciones de Bernoulli y de la continuidad, así como la aplicación de coeficientes de descarga

Ecuación 7 Ecuación de Bernoulli para flujos incompresibles.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \frac{1}{2} \rho V_1^2$$

Desde la ecuación de la continuidad se reemplaza las velocidades por secciones transversales y el caudal volumétrico.

Ecuación 8 Diferencia de presión en función de áreas y caudal

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho Q^2 \frac{1}{A_2^2} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]$$

Ecuación 9 Caudal volumétrico

$$Q = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}}$$

Coeficiente de descarga se aplica para flujos reales como el aire o agua donde la viscosidad y turbulencia estén presentes.

Esta depende de la relación de diámetros β

$$\beta = \frac{D_o}{D_i}$$

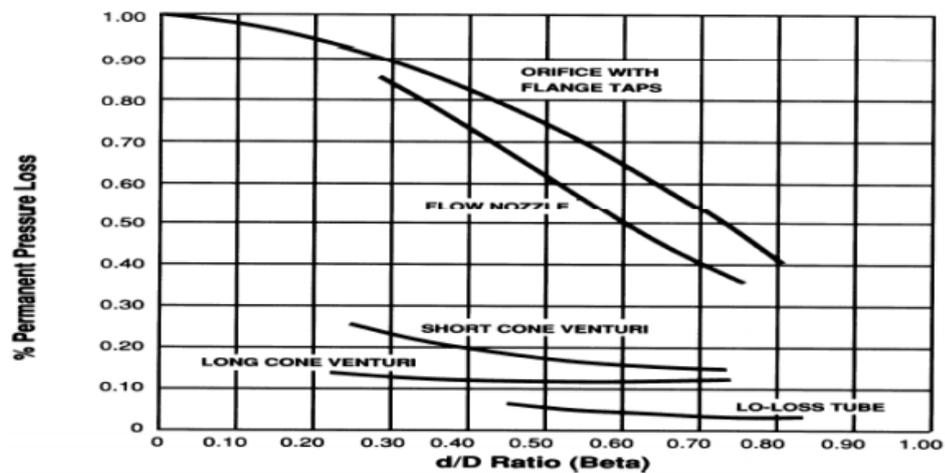


Figura 46 Diagrama perdida de presión en función de la relación β (ThePetroStreet, 2014)

Finalmente se tiene el caudal para flujos reales

Ecuación 10 Caudal corregido con el coeficiente de descarga

$$Q = C_f A_o \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Para cálculos el caudal másico se encuentra multiplicando el caudal Q por la densidad ρ .

$$Q_{masico} = \rho \times Q$$

En el ANEXO B se desarrolla la Calibración de la placa orificio.

3.22 SECUENCIA DE FLUJOS EN EL GASIFICADOR

Cada uno de los procesos del sistema de gasificación se indica la trayectoria de la materia desde la materia prima hasta la salida de gases de escape.

Secado.- extracción de humedad de la biomasa.

Pirolisis.-Es la descomposición térmica de la biomasa en alquitrán, gas y carbón.

Combustión.- De los gases de alquitrán para proveer de calor a los demás procesos.

Reducción o Craqueo de alquitrán.- es la conversión de productos de la combustión en combustible gaseoso.

Hay una secuencia de flujos en estos procesos.

- Flujo de sólidos.
- Flujo de gases.
- Flujo de gases de escape.

3.23 FLUJO DE SÓLIDOS EN EL GASIFICADOR.

La biomasa está contenida en la tolva, pasa al intercambiador de calor de secado donde es extraída la humedad de hasta 30% a una temperatura de alrededor de 100 a 300°C, mediante el tornillo sin fin es inyectada la biomasa al intercambiador de calor de pirolisis donde se utiliza los gases de escape del motor para ayudar a la etapa de pirolisis, es un proceso donde la biomasa se convierte en carbón emitiendo grandes cantidades de gases combustibles y alquitranes, esto en un rango de temperaturas de 300 a 700°C.

En la combustión los gases producidos en el intercambiador de calor de pirolisis descienden a la reducción o campana, con forma de reloj de arena, es inyectado el aire precalentado en las mangueras alrededor del reactor donde 5 chorros de aire combustionan con los gases de la pirolisis formando la zona de combustión con temperaturas de llama de 1000 a 1200°C.

En la reducción o craqueo de alquitranes el vapor de agua y el dióxido de carbono producido en la combustión pasan a través de la reducción, produciendo tres efectos.

- Los gases de combustión se concentran en una zona uniforme de 800 a 900 °C.
- El carbón sobrecalentado pasa a través de la zona de combustión y se hace muy reactivo.

- La mitad superior de la chimenea canaliza los gases no quemados de alquitrán a través de la zona de combustión que cuando está suficientemente caliente, craquea los alquitranes en el producto final un gas de síntesis con los siguientes productos H_2 , CO , y algunos CH_4 .

El carbón caliente C y el agua H_2O y el dióxido de carbono CO_2 producido durante la combustión desciende por la zona de reducción debido a la alta reactividad del carbón a altas temperaturas, el carbón elimina o reduce 1 átomo de H_2O y CO_2 a medida que se filtra a través del carbón caliente, esta reducción produce gas de Hidrógeno, y monóxido de carbono, los cuales se queman calientes y limpios, sin poder condensarse en alquitranes.

Esta conversión de biomasa en estado sólido a un gas sinterizado inflamable es el objetivo de la gasificación.

Es importante agitar la rejilla de cenizas (cenicero), en el transcurso de las reacciones de reducción, los chips de carbón se consumen y se encogen, por lo cual se llenan de cenizas se debe sacudir para que caigan las pequeñas piezas y el flujo de gas se mantenga, la rejilla es el final del flujo de sólido en el sistema de gasificación.

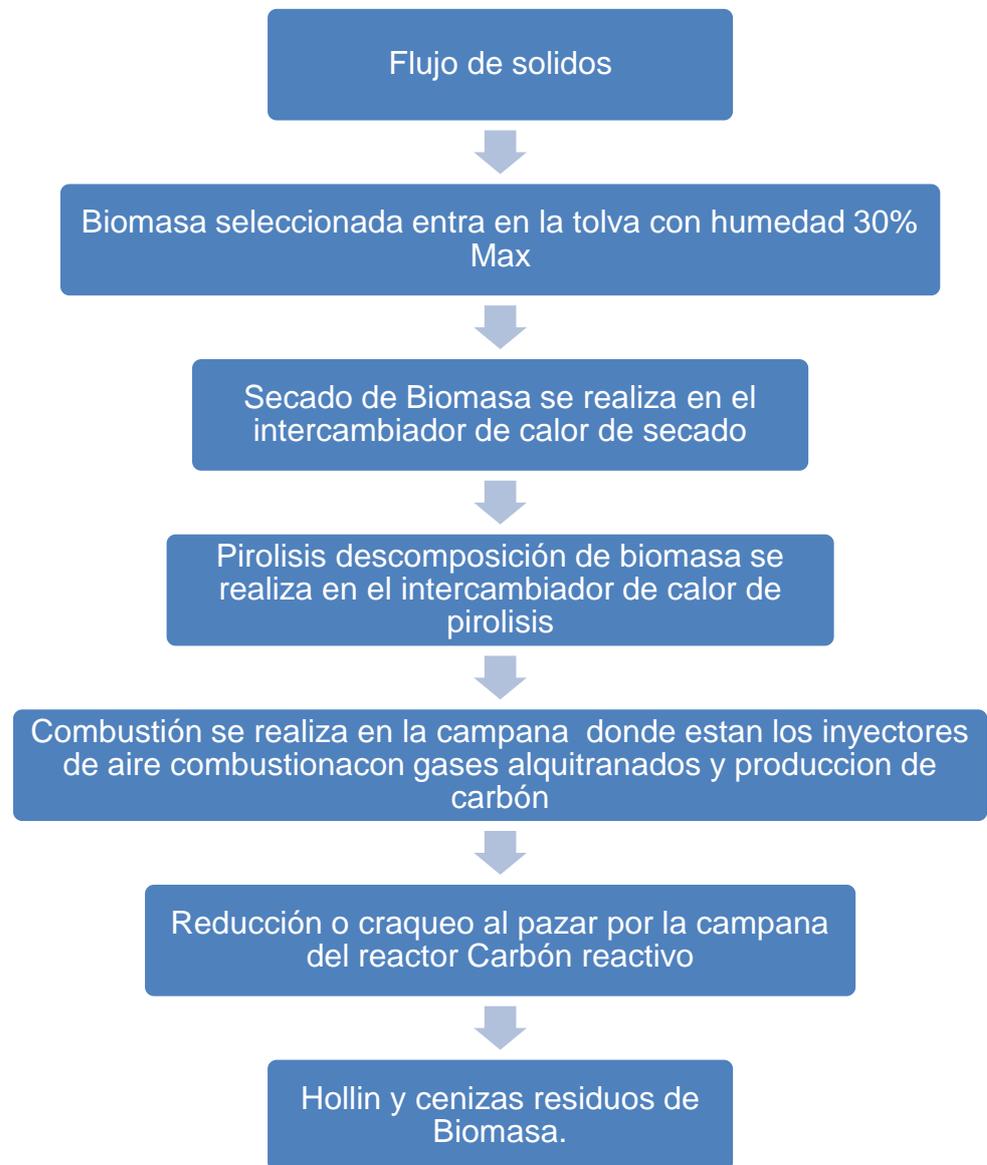


Figura 47 Diagrama de flujo de sólidos

3.24 FLUJO DE GASES EN EL GASIFICADOR.

La primera etapa de recuperación de calor residual es el precalentamiento de aire de admisión.

Al final de la reducción el aire es muy caliente para ser utilizado en el motor de combustión interna. Los gasificadores pasan el gas a través de un radiador para enfriar el gas, el gasificador recupera este calor para aumentar la eficiencia operativa y la calidad del gas de madera.

El flujo de sólidos termino en el cenicero descendiendo hasta la base del reactor.

El gas de madera caliente asciende a través del espacio fuera del núcleo del reactor, intercambia calor con las mangueras de aire, por los cuales ingresa el aire a los inyectores en la zona de combustión.

Este proceso no solo calienta el aire para la combustión también enfría el gas de síntesis producido.

Eliminación de partículas se lo realiza mediante el ciclón, después del paso por la reducción se obtiene un gas sucio lleno de cenizas y polvo de carbón, los cuales se separan en el ciclón, donde el gas gira en un vórtice descendente que causa que el polvo y ceniza se separe debido a la fuerza centrífuga. El gas de madera luego de pasar por el ciclón asciende fuera del ciclón por el orificio central dejando las partículas en el recipiente de recolección del ciclón.

El gas dentro del ciclón está caliente y el exterior del ciclón está a temperatura ambiente por lo cual es el gas intercambia calor con las paredes del ciclón perdiendo calor.

La segunda etapa de recuperación de calor residual es en el intercambiador de calor de secado de biomasa, el gas todavía con calor residual a pesar de pasar por las mangueras de inyección de aire.

La transferencia de calor se realiza mediante el paso del gas caliente en las paredes del intercambiador, este proceso enfría el gas para ser filtrado en forma segura, y conjuntamente permite que al sistema de gasificación la entrada biomasa con menor porcentaje de humedad.

Filtración del gas

El último paso antes de entrar a un motor es filtrar el gas, donde se logra eliminar los alquitranes, el filtro condensa el alquitrán protegiendo el motor de la acumulación del mismo.

Seca el gas de madera, el vapor de agua residual se condensa. El filtro se utiliza materia orgánica que no va a causar ninguna reacción con el gas.

La mezcla con aire enfría aún más el gas y está limpio y con las características adecuadas para ser introducido al motor, el cual es el proceso final de flujo de gases y el inicio de los gases de escape.

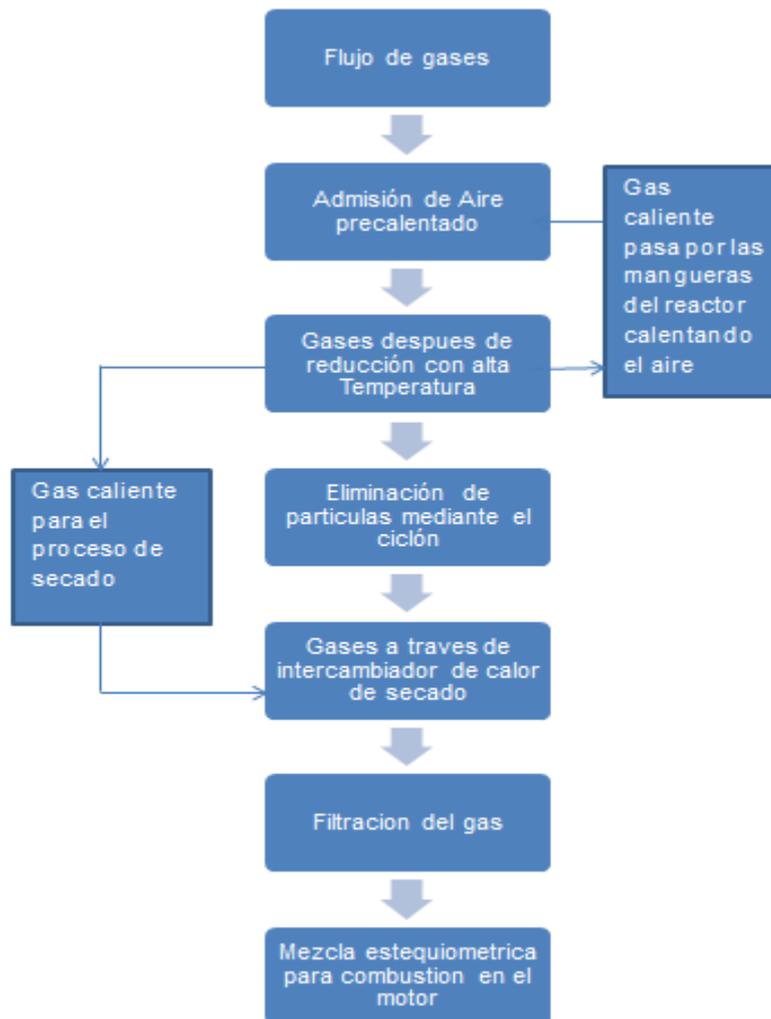


Figura 48 Diagrama de flujo de gases

3.25 FLUJO DE GASES DE ESCAPE.

La tercera etapa de recuperación de calor residual se realiza en el intercambiador de calor de pirolisis, el motor emite gases de escape lo suficientemente caliente para iniciar la etapa de pirolisis, en lugar de dejar que esta energía se desperdicie, se recupera toda esta energía y se la utiliza

canalizando los gases de escape dentro del intercambiador de calor facilita la descomposición de la biomasa en alquitranes y gases de madera.

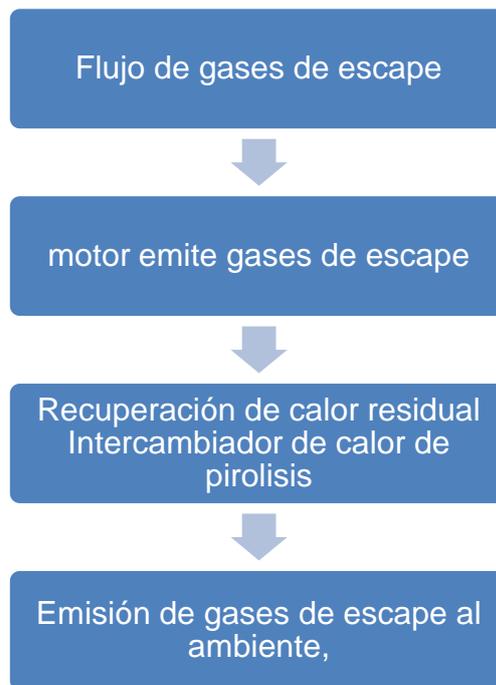


Figura 49 Diagrama de flujo de gases de escape

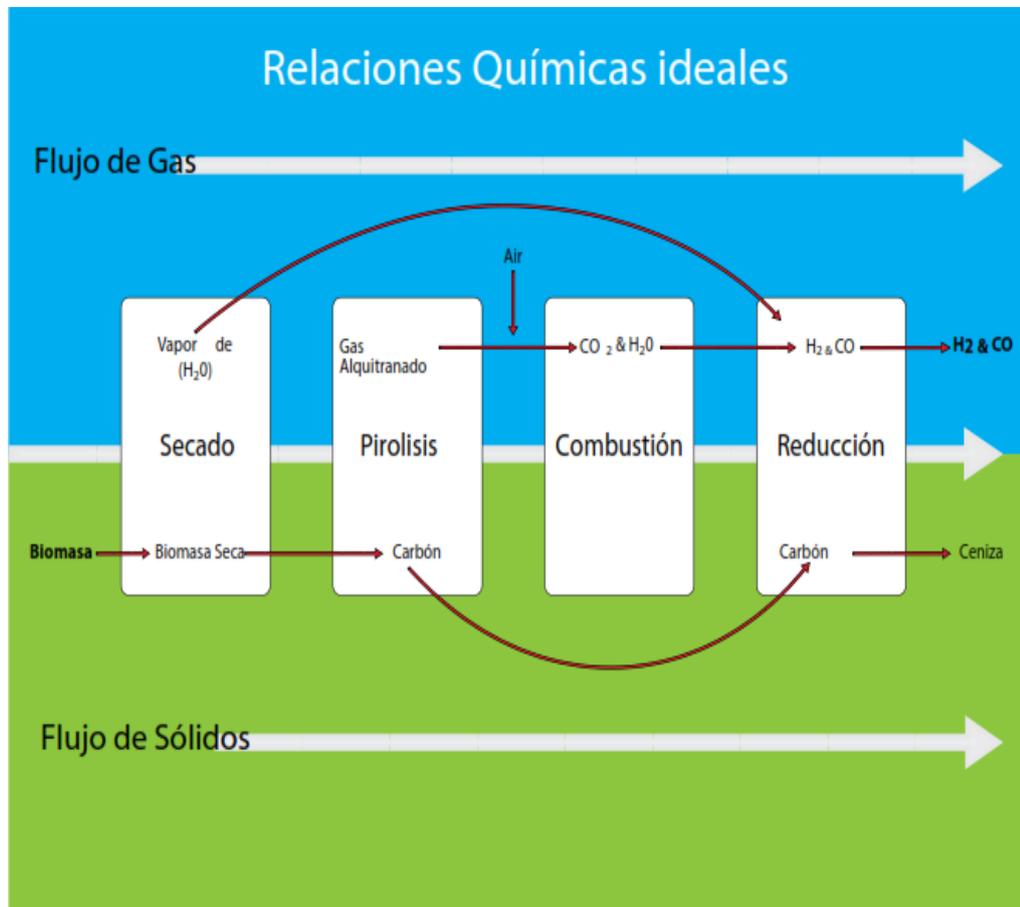


Figura 50 Diagrama de las relaciones de química ideales en los procesos de acuerdo con la secuencia de flujos

Fuente (Mason, 2009)

CAPITULO 4

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACION

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN

Para la construcción se desarrollaron los planos y hojas de proceso, los que indican los detalles, dimensiones y especificaciones técnicas a utilizar en la construcción e implementación. También ayuda a determinar el costo de los materiales empleados en la construcción.

4.1.1 Planos de construcción

ANEXO C

4.1.2 Hojas de procesos

ANEXO D

4.2 CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN.

La construcción del sistema de gasificación se ejecutara de acuerdo a las especificaciones en los planos de construcción. Los materiales y herramientas se muestran en la tabla listado de materiales y herramientas utilizados en la construcción del sistema de gasificación.

Tabla 10 Materiales utilizados en la construcción del Sistema de gasificación

CTDAD	NOMBRE DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	Ciclón Soldado	Ver planos C-1 a C-5
1	Soporte Colector Soldado	Ver planos C-8 y C-9
1	Tapa Ciclón Soldada	Ver planos C-6 y C-7
1	Tapa Colector Soldada	Ver planos C-10 y C-11
8 1/2	Tapón de cabeza cuadrada	Tapón de cabeza cuadrada
2	Boquilla simple 1	Boquilla
1	Filtro	Tanque de 16 gal. reciclado y preparado, ver planos F-3 y F-4
2	Soporte de Filtro	Ver plano F-5
1	Tapa de Filtro	Ver planos F-1 y F-2
4	Terminación de manguera para tubería macho 125HBL de Parker 125HBL-4-2	Terminación de manguera para tubería macho
2	Boquilla simple 1 1/2	Boquilla
1	Codo - Clase I 1 1/2	Codo
1	Intercambiador de Calor de Pirólisis (ICP)	Ver planos ICP-1 a ICP-8
2 in	Tubería con finales roscados 1/2 - Schedule 40S - 2	Tubería
2	Codo roscado de 90 grad - 1/2	Codo forjado y roscado de 90° - Clase 2000
7 in	Tubería con finales roscados 1/2 - Schedule 40S - 7	Tubería
1	Tapa de fundición de tipo 2 - Clase 125 1/2	Tapa roscada de bronce fundido de tipo 2 - Clase 125
1	Camisa ICP	Ver plano ICP-13
1	Tapa ICP Soldada	Ver planos ICP-9 y ICP-10
1	Sensor de Paleta 12v DC	Sensor para activar motor de tolva

CONTINUA 

2	Unión Escape Soldada	Ver planos ICP-11 y ICP-12
1	Tapa de Inspección ICP	Ver plano ICP-13
1	Tapón de cabeza cuadrada 1	Tapón de cabeza cuadrada
1	Unión Eje-Motor	Ver plano MT-1
1	Chumacera de 1/2" UCFL201-008D1	Con cubierta antipolvo de acero estampado
1	Espiral de Tolva	Ver planos MT-3 y MT-4
1	Motor 12v DC	Motor para mantener activo flujo de biomasa
1	Conector Ejes 1/2"	Conector
1	Unión Tolva-Eje Soldada	Ver planos MT-1 y MT-2
1	Reactor Externo Soldado	Ver planos RE-1 a RE-7
2	Soporte Base Izquierdo	Ver plano RE-9
2	Soporte Base Derecho	Ver plano RE-9
1	Tubo en T roscado - 1/2	Tubo en T roscado y forjado - Clase 2000
1	Reductor hembra - Clase 250 1/2 x 1/4	Reductor hembra roscado de bronce fundido - Clase 250
1	Boquilla hexagonal de reducción - Clase II 1/2 x 1/4	Boquilla
1	Camisa de Reactor	Ver plano RE-8
1	Soporte Cenicero Soldado	Ver planos RE-17 y RE-18
1	Cenicero Soldado	Ver planos RE-15 y RE-16
1	Manómetro	Ver plano RE-10
1	Ensamblaje de tuercas y mangas 61CA de Parker	Ensamblaje de tuercas y mangas
1	Tapa de Inspección Soldada	Ver planos RE-11 y Re-12
1	Tapa de Agitador Soldada	Ver planos RE-13 y Re-14

CONTINUA 

1	T	Conector para agitar cenicero
1	Conector macho 68CA de Parker	Conector macho
1	Cobertor de Mangueras	Cobertor aislante para altas temperaturas
1	Reductor de reborde macho 250 1 1/2 x 1/2	Reductor de reborde macho roscado de bronce fundido - Clase 250
2	Abrazadera 1 1/2	Abrazadera
1	Fondo de Camisa	Ver plano RE-9
5	Perno - 5/16 x 1 UNC	Tuercas unificadas UNC
1	Reactor Interno Soldado	Ver planos RI-1 a RI-8
5	Boquillas hexagonales N1 1/2A304	Accesorios para fontanería de acero inoxidable ISO 7-1
1	Tapa de tipo 3 - Clase 150 1 1/2	Tapa
1	Manguito M2 3/8	Accesorios de hierro fundido maleable - Manguito M2
1	Reductor roscado modelo i - Clase I 3/8 x 1/4	Reductor roscado
1	Conector macho 48F de Parker	Conector macho
1	Ensamblaje de tuercas y mangas 61CA de Parker	Ensamblaje de tuercas y mangas
5	Manguera de acero inoxidable 1/2"	Manguera con conectores de acero inoxidable A304
1	Tolva Soldada	Ver planos T-2 a T-10
1	Barril 30 Gal Preparado	Tanque de 30 gal, reciclado y preparado, ver plano T-1
1	Conector Tanque	Ver plano T-1
1	Tapa Inferior Soldada	Ver planos T-11 y T-12

CONTINUA 

1	Tapa Tanque	Tapa de tanque de 30 gal.
1	Cruz roscada - Clase 2000 1 1/2	Cruz forjada y roscada
1	Válvula de compuerta atornillada 1 1/2	Válvula de compuerta
5	Boquilla simple 1 1/2	Boquilla
1	Codo roscado de 90 grad - 1 1/2	Codo forjado y roscado de 90°
1	Reductor roscado modelo ii - Clase I 1 1/2 x 1	Reductor roscado
1	Finales de tubería hembra-hembra	Finales de tubería hembra-hembra
1	Acoplamiento de reducción - 1 1/2 x 1/2	Acoplamiento
6 in	Tubería con finales roscados 1/2 - Schedule 40S - 6	Tubería
1	Válvula de bola de latón XV520P de Parker XV520P-8	Válvula de bola de latón
1	Boquilla roscada 1/2	Boquilla
1	Tubo fraccional de Parker 1/4 x 1/4	Adaptador
1	Tubo en T roscado - Clase 2000 1/2	Tubo en T roscado y forjado - Clase 2000
1	Válvula de bolas mini MV608 MV608-8	Finales de tubería macho-hembra Válvula de bolas mini
1	Acoplamiento de aire	Acoplamiento
6 in	Tubería con finales roscados 3/4 - Schedule 40S - 6	Tubería
1	Boquilla larga 3/8 x 125	Boquilla
2	Acoplamiento de reducción - Clase 125 1 1/2 x 3/4	Acoplamiento
1	Quemador	Ver planos V-1 a V-3
2	Acoplamiento de reducción - Clase 125 2 x 1 1/2	Acoplamiento
1	Tornillo - 12 - 24 x 1 SR HMS	Tornillo con cabeza redonda ranurada
1	Arandela - 1/4	ANSI B18.22.1 Tipo A
CONTINUA 		

1	Tuerca - 1/4 UNC	Tuercas, tornillos y pernos hexagonales unificados
97	Perno 5/16 x 5/8 UNC	Pernos hexagonales con roscas UNC
11 4	Tuerca 5/16 UNC	Tuercas unificadas
24	Perno 5/16 x 3/4 UNC	Pernos hexagonales unificados con roscas UNC
2	Tuerca mariposa 5/16 - 18 Serie ligera	Tipo A - Tuerca de mariposa
4	Arandela de presión - 0,3125	Arandelas de presión
2	Arandela de presión - 0,375	Arandelas de presión
2	Tuerca 3/8 UNC	Tuercas, tornillos y pernos hexagonales unificados
3	Tornillo 8-32 UNC - 1	Tornillo de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal
1	Empaque de caucho de alta temperatura; unión barril-tolva	Cortado con CNC
1	Empaque de caucho de alta temperatura; unión ciclón-tapa	Cortado con CNC
1	Empaque de caucho de alta temperatura; unión ciclón-reactor	Cortado con CNC
1	Empaque de caucho de alta temperatura; unión tolva-tapa inf	Cortado con CNC
1	Empaque de caucho de alta temperatura; unión reactor-agitador	Cortado con CNC
1	Empaque de caucho de alta temperatura; unión reactor-inspección	Cortado con CNC
1	Empaque de caucho de alta temperatura; unión tolva-motor	Cortado con CNC

CONTINUA 

1	Empaque de caucho de alta temperatura; unión chumacera- brida	Cortado con CNC
4	Empaque de lámina de metal	Cortado con CNC
98 in	Manguera de acero inoxidable de 2"	Manguera con pliegues
2	Abrazadera 2"	Abrazadera
1	Termocupla de 1/8" diámetro	Termocuplas de alta temperatura
2	Termocupla de 1/16" diámetro	Termocuplas de alta temperatura
1	Alarma de concentración de CO ₂	Electrónico
1	Termómetro digital	Electrónico
1	Medidor de humedad	Electrónico
2	Esponjas de filtro	Esponja sintética

Fuente (Morales, H. 2014)

4.3 MANUAL DE ENCENDIDO Y OPERACIÓN

ANEXO E

4.4 PROTOCOLO DE PRUEBAS

ANEXO F

4.5 MANUAL DE MANTENIMIENTO

ANEXO G

CAPITULO 5

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

5.1 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

5.1.1 Variables de entrada

5.1.1.1 Biomasa

Se opera el gasificador con 3 tipos de biomasa con diferente contenido de humedad.

- Tusa de maíz
- Cascara de coco
- Chipeado de madera

La humedad se mide con el sensor de humedad la cual va a variar en rangos de baja humedad de 0 a 5%, de mediana humedad de 5 a 13% y alta humedad de 14 a 25%.

Propiedades de biomasa con 0% de humedad

Tabla 11 Propiedades Biomasa en base seca.

Propiedad	Tusa de maíz	Cascara de coco	Chipeado de madera (eucalipto)
Carbono (%)	48,80	88,95	49,51
Hidrógeno (%)	5,38	0,73	5,75
Nitrógeno (%)	0,4	1,38	0,17
Oxígeno (%)	44,42	6,04	43,98
Total con haluros (%)	100	100	100
Contenido de cenizas (%)	3,6	5,10	0,53
Material volátil (%)	80,20	69,60	86,61
Carbono fijo (%)	16,20	25,30	12,86
Poder calorífico (MJ/Kg)	17	19,24	17,96

(ECN pyllis2, 2012)



Figura 51 Fotografía de medición del porcentaje de humedad de los 3 tipos de biomasa

5.1.1.2 Entrada de aire

Se calcula teóricamente en la figura 5 se necesita 6,36 kg de aire para gasificar 1kg de biomasa.

5.1.2 Variables de salida

5.1.2.1 Cantidad de ceniza

Es el último proceso en el flujo de sólidos, es importante para la medición de la cantidad de ceniza utilizar la biomasa con el porcentaje de humedad casi similar, también para recolectar la ceniza agitar bien el cenicero para que caiga al fondo y se pueda recolectar a través del puerto de cenizas. Pesada en una balanza Fisher 3000 con una apreciación de una décima de gramo



1Figura 52Medición de cantidad de ceniza

El flujo de cenizas total es la relación de la masa de cenizas sobre el tiempo de operación del sistema de gasificación.

5.1.2.2 Restos de cenizas y condensado de alquitrán en el recipiente del ciclón.

Grandes cantidades de partículas se acumulan en el ciclón así como también mínimas cantidades de condensado de gas sinterizado, ya que este proceso ocurre antes del paso del gas por el filtro granular.



Figura 53 Fotografía de restos de ceniza y condensado

Se los suma a las cenizas totales

5.1.2.3 Cantidad de alquitrán

Es recolectado en todo el filtro granular donde se condensa y retiene el alquitrán, a través de una abertura en la parte inferior del filtro.



Figura 54 Fotografía recolección de alquitrán

Igual que el análisis de la cantidad de ceniza, el flujo de alquitrán se calcula con la masa dividida para el tiempo de operación del sistema.

5.1.2.4 Salida de Gas

Se mide mediante la placa orificio se lee las presiones y se calcula la cantidad de gas que se produce.

El cálculo de salida de gas se lo desarrolla en el anexo B donde se tiene las tablas de caudales y flujo másico, en función de la diferencia de presión y la densidad del gas.

Calidad del gas

Existen dos tipos de pruebas para medir la calidad del gas

Prueba en caliente

Se la realiza a la salida del gas sin pasar por una refrigeración previa.

Prueba en frio

Se realiza cuando el gas esta suficiente mente frio para la mezcla estequiométrica que entra al motor.

Se realizó la toma de muestras mediante el Instituto Ecuatoriano de Energías Renovables (INER).

Las muestras se tomaron a la salida del filtro y fueron pruebas en caliente ya que para la toma de datos no se colocó la tolva con los intercambiadores de calor de pirolisis, ni de secado. Pues si estaban colocados la ingesta de biomasa al gasificador se complicaba y la revisión de consumo no se la podía realizar.

Después del filtro cuando el gas está libre de partículas y alquitranes se tomó mediante un compresor para forzar la salida del gas en un recipiente especial cilindro de acero inoxidable con doble válvula en cada extremo, como se muestra en la figura 56 el tipo C.



Figura 55 Fotografías de toma de muestras INER

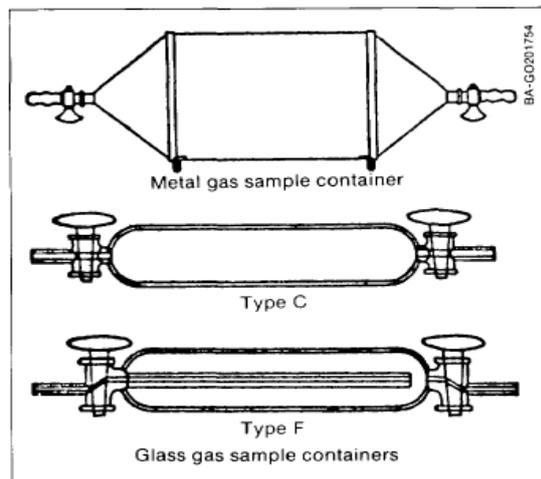


Figura 56 Tipos de contenedores para muestreo de gas

(Solar Technical Information Program, 1988)



Figura 57 Fotografía contenedores de muestreo Tipo C

Este gas es analizado en el cromatógrafo de gases del Instituto Ecuatoriano de Energías Renovables INER, que a través del convenio macro presente entre esta institución y la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en la cláusula 3.6 se estipula la colaboración mutua el uso e implementación del laboratorios, sistemas de información metodológicas y otras facilidades de información.

Resultados ANEXO H cromatografía de gases de 3 distintos tipos de biomasa con cascara de coco, residuos de maíz y chipeado de madera.

La toma de datos de contenido de alquitrán y de partículas en el gas no se pudo realizar por el requerimiento de equipo de medición sumamente sofisticado inexistente en el país.

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.2.1 Balance de masa

Ley de la conservación de materia, la materia ni se crea ni se destruye, solo se transforma.

Ecuación 11 Conservación de la masa

$$\textit{entradas} + \textit{producción} = \textit{salidas} + \textit{acumulación}$$

En la reacción de combustión

$$\text{Biomasa} + \text{oxígeno} = \text{gases alquitranados}$$

Para la combustión completa según la figura 5 de relación de oxígeno con los procesos de gasificación. Para la biomasa en base seca 0% de humedad se necesita 6,36 kg de aire y 1,47 Kg de oxígeno, por su relación estequiométrica, donde la relación de oxígeno los mejores resultados se obtiene con un rango típico de factor de aire entre 0,25 y 0,45. Con valores inferiores estaríamos en la etapa de pirolisis.

Con factores de aire más elevados indica que el gasificador es ineficiente, tiene muchas pérdidas de calor en las paredes, o la humedad de la biomasa es muy alta lo que representa en un gasto de energía del combustible para la evaporación de la humedad contenida en la biomasa.

Ecuación 12 Factor de aire

$$\text{Factor de aire} = \frac{\text{Relacion aire combustible real}}{\text{Relacion aire combustible estequiometrica}}$$

Combustión.

$$1\text{kg de Biomasa} + 6,36\text{ Kg de aire} = 7,36\text{ Kg de gas de sintesis}$$

Ejecutando el gasificador con un factor de aire de 0,35 combinamos.

$$1\text{kg de Biomasa} + (6,36\text{ Kg de aire} \times 0,35) = 3,226\text{ Kg de gas de sintesis}$$

$$1\text{kg de Biomasa} + (2,226\text{ Kg de aire}) = 3,226\text{ Kg de gas de sintesis}$$

Para quemar el gas de síntesis añadimos la otra cantidad de aire.

$$3,226\text{ kg gas de sintesis} + 4,134\text{Kg de aire} = 7,36\text{ Kg de gas de sintesis}$$

Las cantidades relativas de gas y de aire respectivamente son 3,226 y 4,134. Significa que la relación estequiométrica de gas de madera es 1,28:1 Kg de aire por cada Kg de gas, como la densidad del gas es casi similar a la del aire se necesita aproximadamente un y medio volumen de aire para un volumen de madera.

5.2.2 Balance de energía

El balance de energía se lo realiza contabilizando la energía que entra al gasificador y sale con el objetivo de evaluar las pérdidas en el gasificador y su influencia en el proceso.

Ecuación 13 Balance de energía

$$\begin{aligned}
 m_{biomasa} \times PCI_{biomasa} + m_{aire} \times h_{aire} \\
 = m_{gas} \times PCI_{gas} + m_{gas} \times h_{gas} + Q_{cen} + Q_{perdido}
 \end{aligned}$$

$$PCI_{biomasa} = 17,96 \frac{MJ}{Kg}$$

$$h_{aire} = 300 \frac{KJ}{Kg}$$

(Lesme; Recio; Preston; Rodriguez, Oliva, 2008)

$$PCI_{gas} = 5759,75 \frac{KJ}{Kg}$$

$$h_{gas} = 2342,03 \frac{KJ}{Kg}$$

(Lesme; Recio; Preston; Rodriguez, Oliva, 2008)

$$Q_{cen} = m_{cen} \times Cp_{cen} \times (T_{cen} - T_{\alpha})$$

$$Q_{cen} = 0,08 \text{ kg} \times 0,96 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C} \times (800^{\circ} - 25^{\circ})$$

$$Q_{cen} = 59,52 \text{ KJ}$$

$$\begin{aligned}
 & 1kg \times 17960 \frac{KJ}{Kg} + 6,36 kg \times 1,00625 \frac{KJ}{Kg} \\
 & = 2,04 kg \times 5759,75 \frac{KJ}{Kg} + 2,04 Kg \times 2342,03 \frac{KJ}{Kg} + 59,52 KJ \\
 & + Q_{perdido}
 \end{aligned}$$

$$Q_{perdido} = 1207,33KJ$$

Tabla 12 Balance de energía con los 3 diferentes tipos de biomasa

Biomasa	m PCI (MJ)	haire (MJ)	PCI gas (MJ)	mgas h gas (MJ)	Qcen (MJ)	Qper (MJ)
madera	99,14	10,53	64,86	28,62	0,66	15,53
coco	148,52	15,78	97,17	44,63	1,09	21,41
tusa	116,43	12,37	76,17	35,58	0,87	16,18

Fuente (García D.,2014)

5.2.3 Poder calorífico del gas de síntesis

El poder calorífico depende de la cantidad relativa de cada componente se calcula utilizando las propiedades de cada componente combustible, y multiplicarlas por el porcentaje contenido en el gas de síntesis obteniendo el total de poder calorífico de la mezcla de gases.

Ecuación 14 Poder calorífico de la mezcla de gases

$$PCI_{gas} = \sum_{i=1}^{i=n} C_i PCI_i$$

Dónde:

PCI_i = Poder calorífico inferior de los componentes combustibles del gas

C_i = Fracción volumétrica del componente del gas en %

Tabla 13 Poder calorífico del gas de Síntesis

Componente	Formula	Conte nido en %	Poder calorífico KJ/m ³ N	contenido x poder calorífico
Monóxido de carbono	CO	20	12655	2531,00
Hidrógeno	H ₂	20	10770	2154,00
Metano	CH ₄	3	35825	1074,75
Etano	C ₂ H ₆	0	64385	0,00
Eteno	C ₂ H ₄	0	59398	0,00
Dióxido de carbono	CO ₂	7	0	0,00
Nitrógeno	N ₂	50	0	0,00
	Σ	100		5759,75

Fuente (García D., 2014)

Se obtiene un poder calorífico de 5759,75 KJ/Kg donde los gases como el nitrógeno y el dióxido de carbono son gases que no reaccionan, y no aportan al poder calorífico.

5.2.4 Cantidad de aire para la mezcla estequiométrica

El gas de síntesis para su correcta combustión tiene que mezclarse con una cantidad apropiada de aire, por lo tanto la mezcla tiene un menor poder calorífico, la cantidad de aire necesario para la combustión completa se calcula a partir de su composición y cantidad de oxígeno estequiométrico necesitan los componentes

Tabla 14 cantidad de aire para la combustión estequiométrica del gas de síntesis.

Componente	Formula	Contenido en %	m ³ O ₂ /m ³ Componente	M ³ aire / m ³ O ₂	contenido x poder calorífico
Monóxido de carbono	CO	20	0,5	4,73	0,4730
Hidrógeno	H ₂	20	0,5	4,73	0,4730
Metano	CH ₄	3	2	4,73	0,2838
Etano	C ₂ H ₆	0	3,5	4,73	0,0000
Eteno	C ₂ H ₄	0	3	4,73	0,0000
Dióxido de carbono	CO ₂	7	0	4,73	0,0000
Nitrógeno	N ₂	50	0	4,73	0,0000
		100	m ³ aire / m ³ gas – 1,2298		combustión estequiométrica

Fuente (García D., 2014)

El poder calorífico de la mezcla se calcula teniendo en cuenta que el volumen de la mezcla es igual a la suma del volumen de aire más el volumen del gas.

Ecuación 15 poder calorífico de la mezcla

$$H_m = \frac{H_c}{1 + L_o \lambda}$$

Dónde:

H_m = poder calorífico de la mezcla

H_c = poder calorífico del combustible

L_o = mezcla estequiometrica

λ = coeficiente de exceso de aire

$\lambda = 1$ para calculos teoricos

Tabla 15 Poder calorífico de la mezcla

Parámetro	símbolo	unidades	Valor
Poder calorífico del gas	Hc	KJ/ m ³ N	5759,75
m³ de gas de síntesis	mf	m ³	1
m³ aire / m³ gas – combustión estequiométrica	Lo	m ³ / m ³	1,2298
m³ mezcla / m³ gas – estequiométrica	1+Lo	m ³ / m ³	2,2298
Potencia de la mezcla estequiométrica	Hme	KJ/ m ³ N	2583,07

Fuente (García D., 2014)

5.3 REGULACIÓN DEL MOTOR

Para el encendido del motor se necesita varios requisitos para funcionar con gas de síntesis.

5.3.1 Compresión de cada pistón.

Tabla 16 Compresión de cilindros

Numero de Cilindro	Compresión PSI
1	140
2	130
3	120
4	140

Fuente (García D., 2014)

Con los valores de compresión se observa que el motor está en óptimas condiciones, esto favorece a la combustión de la mezcla estequiométrica dentro de la cámara, ya que como es una mezcla gas-aire las moléculas de la mezcla tienden a escapar por las paredes del cilindro pistón.

5.3.2 Angulo de adelanto al encendido

El gas se quema lentamente, como indica la figura 51, lo que da una calificación de alto octanaje, el motor se encuentra en funcionamiento óptimo y con el ángulo de adelanto al encendido en 0, para que pueda encenderse el motor con la mezcla aire gas hay que adelantar el ángulo de 5 a 15 grados más, que el óptimo para gasolina, esto se lo realiza con la lámpara estroboscópica, con el motor encendido y girando, para poder coger el

“tiempo”(ángulo de adelanto al encendido), dando leves giros al distribuidor hasta encontrar la posición ideal.

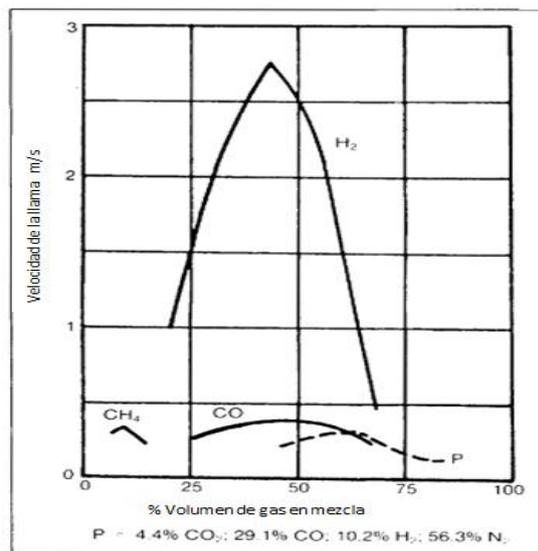


Figura 58 Velocidad de Llama

Fuente (Solar Technical Information Program, 1988)

El avance al encendido depende de la velocidad de llama de los componentes del gas.

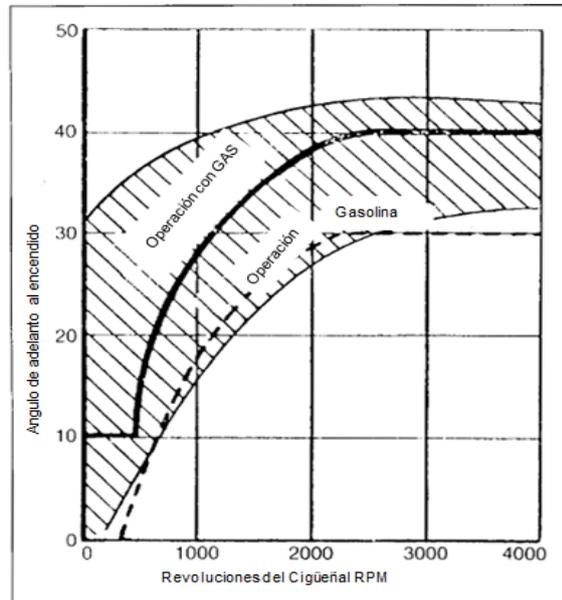


Figura 59 Ángulo de adelanto al encendido

(Solar Technical Information Program, 1988)

5.3.3 Eficiencia y pérdida de energía

El motor de encendido por chispa alcanza una eficiencia térmica del 25% al 30% el mismo motor funcionando con gas de síntesis puede alcanzar una eficiencia térmica del 25%, dependiendo de lo bien que se comporte el motor con gas de síntesis, mejores rendimientos se alcanzarán en motores diésel por la relación de compresión alta de 30% al 35%.

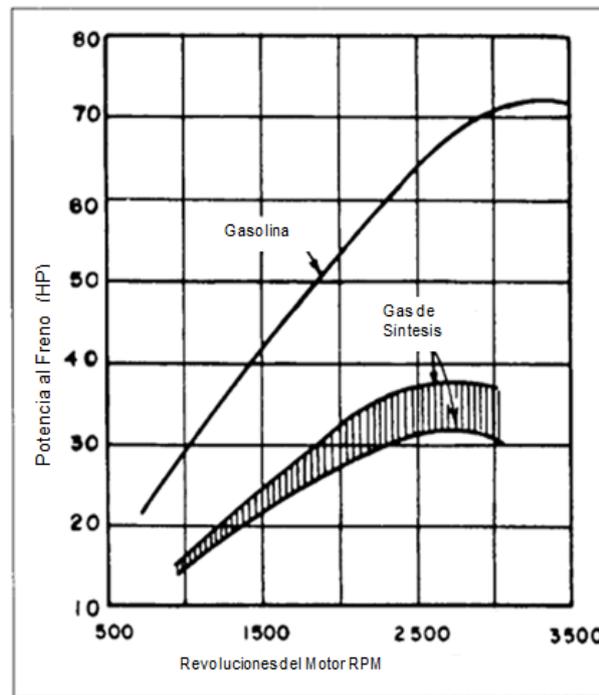


Figura 60 Potencia al freno en función de la velocidad del motor
(Solar Technical Information Program, 1988)

5.4 EFICIENCIA DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN

5.4.1 Eficiencia del gasificador

Eficiencia energética

Ecuación 16 Eficiencia energética

$$eficiencia\ energetica = \frac{Energía\ Util}{Energía\ disponible}$$

$$eficiencia\ energetica = \frac{Flujo\ de\ gas \times PCI\ gas + Energía\ física\ del\ gas}{Flujo\ de\ masa \times PCI\ masa + aire \times h_{aire}}$$

Ecuación 17 Energía física del gas

$$\text{Energía física del gas} = mC_p\Delta T$$

Cp del gas se determina con las fracciones molares

Ecuación 18 calor específico

$$C_{p_{gas}} = \sum_{i=1}^{i=n} C_i C_{p_i}$$

Componente	Formula	Contenido en %	Cp	Cp del gas
Monóxido de carbono	CO	20	1,050	0,210
Hidrógeno	H2	20	14,280	2,856
Metano	CH4	3	2,191	0,066
Etano	C2H6	0	1,264	0,000
Eteno	C2H4	0	1,260	0,000
Dióxido de carbono	CO2	7	0,840	0,059
Nitrógeno	N2	50	1,050	0,525
		100		3,716

Fuente (García D., 2014)

$$\text{Energía física del gas} = 2,04\text{kg} \times 3,716 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \times (800 - 16)^\circ\text{K}$$

$$\text{Energía física del gas} = 5943,22\text{KJ}$$

$$\text{eficiencia energética} = \frac{2,04\text{kg} \times 5759,75 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 5943,22}{1\text{kg} \times 17960 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 6,36 \text{Kg} \times 300 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}}$$

$$\text{eficiencia energética} = 0,89$$

Tabla 17 Eficiencia del gasificador utilizando los tres diferentes tipos de biomasa

Tipo de Biomasa	Eficiencia
madera	0,852
coco	0,863
tusa	0,868

Fuente (García D., 2014)

Con una eficiencia promedio de 86%

5.4.2 Eficiencia del motor

Con el poder calorífico de la mezcla estequiométrica aire gas 2583,07 KJ/m³, se compara con el poder calorífico de la mezcla gasolina aire, se calcula el poder calorífico de la mezcla gasolina aire donde la relación estequiométrica gasolina aire es de 1:14

Con la ecuación 15 de poder calorífico de la mezcla tenemos que

$$H_m = \frac{H_c}{1 + L_o\lambda}$$

Donde

H_m = poder calorífico de la mezcla

$$H_c = 49000 \frac{KJ}{Kg}$$

$$L_o = 14$$

$\lambda = 1$ mezcla ideal

$$H_m = \frac{49000 \frac{KJ}{Kg}}{1 + 14 \times 1} = 3266,67 \frac{KJ}{Kg}$$

$$H_m \text{ gasolina aire} = 3266,67 \frac{KJ}{Kg}$$

$$H_m \text{ gas aire} = 2583,07 \frac{KJ}{Kg}$$

Siendo la mezcla gasolina aire la referencia en la cual trabaja el motor, se realiza una regla de tres simple para obtener la fracción que representa la mezcla con gas de síntesis.

La mezcla de gas aire tiene un 30% de reducción del poder calorífico en relación a la gasolina, con lo cual es evidente la disminución de potencia del 30 % al usar gas de síntesis como combustible.

En la figura 60 de potencia al freno del motor en función de la velocidad, para una velocidad de 1500rpm funcionando con gasolina la potencia al freno me da como resultado 40 HP y con gas de síntesis una potencia de 28 HP.

El motor trabaja con gasolina, la cual es una referencia y de la cual se calcula la pérdida de potencia del motor, que representa el 30 %.

$$\eta_{motor\ a\ gas} = \eta_{combustible} \times \eta_{motor}$$

$$\eta_{motor\ a\ gas} = 0,70 \times 0,3$$

$$\eta_{motor\ a\ gas} = 0,21$$

El motor tiene una eficiencia de 21 % trabajando con gas de síntesis.

5.4.3 Eficiencia del sistema

La eficiencia del sistema se analiza en conjunto el gasificador y el motor de combustión interna y la recuperación de calor en la etapa de pirólisis con los gases de escape del motor.

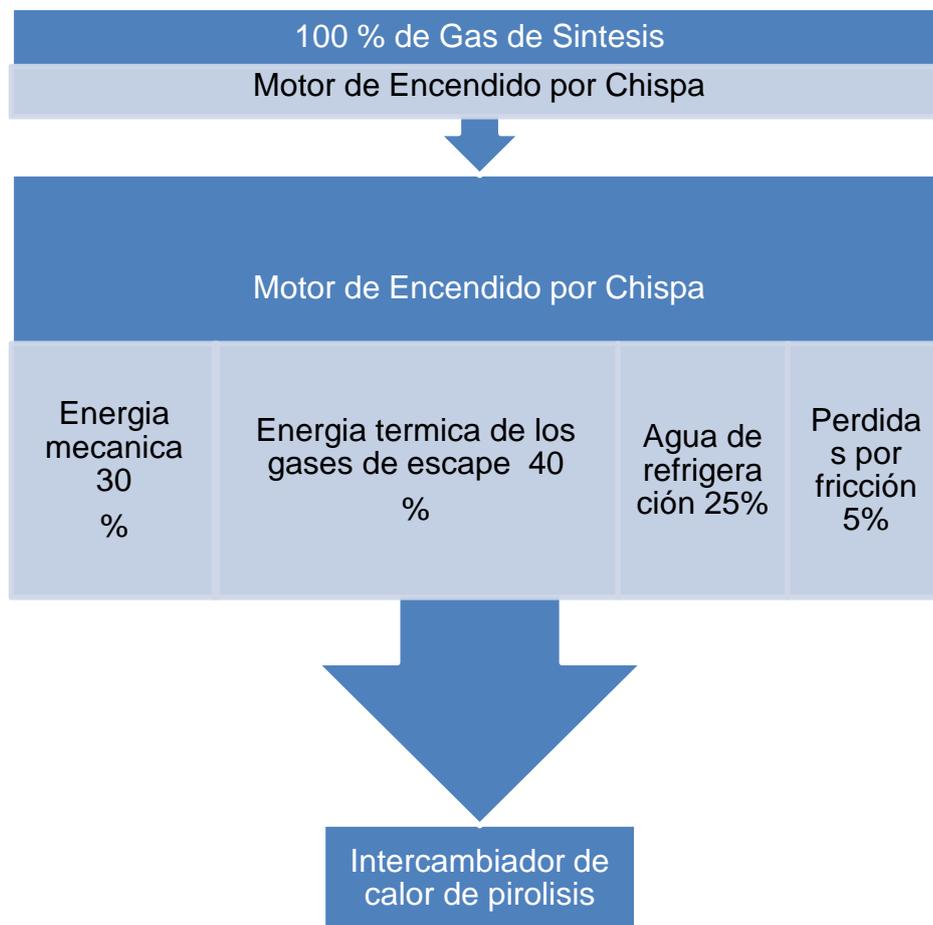


Figura 61 Diagrama de flujo de la transformación del gas de síntesis

La recuperación de calor de los gases de escape del motor es alrededor del 40 % de energía térmica.

Ecuación 19 Eficiencia del sistema

$$\eta_{sistema} = \eta_{gasificador} \times \eta_{motor}$$

$$\eta_{sistema} = 0,86 \times 0,21 = 0,1806$$

El sistema tiene una eficiencia del 18,06%

CAPITULO 6

ANALISIS ECONOMICO FINANCIERO

6.1 ANALISIS FINANCIERO

6.1.1 Costo de materiales directos

Son los costos de los materiales empleados en la construcción de todo el sistema de gasificación.

Tabla 18 Costo de la materia prima

ITEM	UNI DAD	CT DAD	PU	PT
Chapa de acero inoxidable A304, 3/16", 4x8´	UNI V	1	120	120
Chapa de acero inoxidable A304, 1/8", 4x8´	UNI V	3	110	330
Chapa de acero inoxidable A304, 1/16", 4x8´	UNI V	1	98	98
Chapa de acero al carbono 1040, 1/8", 4x8´	UNI V	4	72	288
Chapa de acero al carbono 1040, 1/16", 4x8´	UNI V	1	60	60
Medio manguito S1, 1/2"	UNI V	7	6,5	45,5
Medio manguito S1, 1"	UNI V	2	7	14
Medio manguito S1, 1 1/2"	UNI V	4	8	32
Tubo 1 1/2"	in	60	21,9	21,9
Tubo 1"	in	60	20	20
Tapón de cabeza cuadrada 1/2	UNI V	8	0,5	4
Boquilla simple 1	UNI V	2	1,6	3,2
Tanque de 16 gal reciclado	UNI V	1	2	2

CONTINUA 

Terminación de manguera para tubería macho 125HBL de Parker 125HBL-4-2	UNI V	4	1	4
Boquilla simple 1 1/2	UNI V	2	1,8	3,6
Codo - Clase I 1 1/2	UNI V	1	0,6	0,6
Tubería con finales roscados 1/2 - Schedule 40S - 2	in	2	1,5	1,5
Codo roscado de 90 grad - 1/2	UNI V	2	0,9	1,8
Tubería con finales roscados 1/2 - Schedule 40S - 7	in	7	5,25	5,25
Tapa de fundición de tipo 2 - Clase 125 1/2	UNI V	1	2	2
Sensor de Paleta 12v DC	UNI V	1	25	25
Tapón de cabeza cuadrada 1	UNI V	1	0,78	0,78
Chumacera de 1/2" UCFL201-008D1	UNI V	1	8,32	8,32
Motor 12v DC	UNI V	1	83	83
Conector Ejes 1/2"	UNI V	1	5	5
Tubo en T roscado - 1/2	UNI V	1	3	3
Reductor hembra - Clase 250 1/2 x 1/4	UNI V	1	5	5
Boquilla hexagonal de reducción - Clase II 1/2 x 1/4	UNI V	1	4	4
Ensamblaje de tuercas y mangas 61CA de Parker	UNI V	1	0,5	0,5
T	UNI V	1	10	10
Conector macho 68CA de Parker	UNI V	1	5	5
Cobertor de Mangueras	UNI V	1	14	14
Reductor de reborde macho 250 1 1/2 x 1/2	UNI V	1	4	4
Abrazadera 1 1/2	UNI V	2	0,5	1
Perno - 5/16 x 1 UNC	UNI V	5	0,5	2,5
Boquillas hexagonales N1 1/2A304	UNI V	5	30	150

CONTINUA 

Tapa de tipo 3 - Clase 150 1 1/2	UNI V	1	4,5	4,5
Manguito M2 3/8	UNI V	1	4,9	4,9
Reductor roscado modelo i - Clase I 3/8 x 1/4	UNI V	1	5	5
Conector macho 48F de Parker	UNI V	1	4	4
Manguera de acero inoxidable 1/2"	UNI V	5	152	760
Barril 30 gal reciclado	UNI V	1	20	20
Cruz roscada - Clase 2000 1 1/2	UNI V	1	6	6
Válvula de compuerta atornillada 1 1/2	UNI V	1	70	70
Boquilla simple 1 1/2	UNI V	5	2,5	12,5
Codo roscado de 90 grad - 1 1/2	UNI V	1	2	2
Reductor roscado modelo ii - Clase I 1 1/2 x 1	UNI V	1	5	5
Finales de tubería hembra-hembra	UNI V	1	4	4
Acoplamiento de reducción - 1 1/2 x 1/2	UNI V	1	4	4
Tubería con finales roscados 1/2 - Schedule 40S - 6	in	6	9	9
Válvula de bola de latón XV520P de Parker XV520P-8	UNI V	1	30	30
Boquilla roscada 1/2	UNI V	1	5	5
Tubo fraccional de Parker 1/4 x 1/4	UNI V	1	7	7
Tubo en T roscado - Clase 2000 1/2	UNI V	1	9	9
Válvula de bolas mini MV608 MV608-8	UNI V	1	20	20
Acoplamiento de aire	UNI V	1	3	3
Tubería con finales roscados 3/4 - Schedule 40S - 6	in	6	9	9
Boquilla larga 3/8 x 125	UNI V	1	4	4
Acoplamiento de reducción - Clase 125 2 x 1 1/2	UNI V	2	5	10

CONTINUA 

Lámina de empaque de caucho de alta temperatura	UNI V	1	200	200
Empaque de lámina de metal	UNI V	4	12	48
Manguera de acero inoxidable de 2"	in	98	40	40
Abrazadera 2"	UNI V	2	0,8	1,6
Termocupla de 1/8" diámetro	UNI V	1	71	71
Termocupla de 1/16" diámetro	UNI V	2	61	122
Alarma de concentración de CO2	UNI V	1	50	50
Termómetro digital	UNI V	1	70	70
Medidor de humedad	UNI V	1	40	40
Esponjas para filtro	UNI V	2	10	20
Espiral de Tolva	UNI V	1	71	71
			TOT	3129,95
			AL	

FUENTE (Morales H., 2014)

Tabla 19 Materiales consumibles

ITEM	UNIDAD	CTDAD	PU	PT
Tornillo - 12 - 24 x 1 SR HMS	mm	1	0,15	0,15
Arandela - 1/4	in	1	0,1	0,1
Tuerca - 1/4 UNC	in	1	0,15	0,15
Perno 5/16 x 5/8 UNC	in	97	0,35	33,95
Tuerca 5/16 UNC	in	114	0,3	34,2
Perno 5/16 x 3/4 UNC	in	24	0,4	9,6
Tuerca mariposa 5/16 - 18 Serie ligera	in	2	0,15	0,3
Arandela de presión - 0,3125	in	4	0,2	0,8
Arandela de presión - 0,375	in	2	0,1	0,2
Tuerca 3/8 UNC	in	2	0,2	0,4
Tornillo 8-32 UNC - 1	in	3	0,2	0,6
Silicona HI Temp RTV	UNIV	2	7	14
Teflón	UNIV	5	1	5
Rollo de cinta cerámica de alta temperatura	UNIV	2	8	16
Mortero de alta temperatura	UNIV	2	7	14
			TOTAL	129,45

FUENTE (Morales H., 2014)

6.1.2 Costo de mano de obra directa

Son los costos de todos los procesos de manufactura para la realización del sistema de gasificación.

Tabla 20 Costo de mano de obra

Trabajador	No. Semanas	Costo Semana	Total
Soldador	3	400	1200
Cortador	3	300	900
Ensamblador	1,5	300	450
TOTAL			2550

FUENTE (Morales H., 2014)

6.1.3 Costos Indirectos

Son os considerados los que no están asociados directamente con construcción e implementación del sistema de biomasa como: materiales indirectos, mano de obra indirecta y gastos indirectos de fabricación.

Materiales indirectos: energía que se requiere para las maquinas, lubricantes y combustible.

Mano de obra indirecta: costos ajenos a la producción como lo son supervisión, control, dentro de la mano de obra indirecta abarca los costos de ingeniería de los tesisistas, director y codirector.

Gastos indirectos de fabricación: son considerados como depreciación de la maquinaria, mantenimiento del equipo, impuestos, etc.

6.1.4 Costo total del Proyecto

El proyecto tiene un costo total de , el mismo que se obtiene de la suma de los costos de material directo y mano de obra directa, los costos indirectos son:

Tabla 21 Costo total del proyecto

COSTOS TOTALES	
Costos de Materiales Directos	3129,95
Costos de Materiales Consumibles	129,45
Costos de Mano de Obra	2550
TOTAL	5809,4

FUENTE (Morales H., 2014)

6.2 ANALISIS ECONOMICO

La evaluación económica nos permite determinar la viabilidad del proyecto de acuerdo con los indicadores financieros.

Tasa mínima Aceptable de riesgo (TMAR)

Ecuación 20 Tasa mínima aceptable de riesgo

$$TMAR = i + f + if$$

i = Porcentaje de 8% para este proyecto

f = 4,11 inflación de acuerdo con los datos del banco central

$$TMAR = 0,08 + 0,0411 + 0,0328$$

$$TMAR = 0,1244$$

6.2.1 Capacidad de producción

El sistema de gasificación es capaz de producir un máximo de 20KWh, con el operación correcta y el mantenimiento adecuado produce 24 horas continuas teniendo la precaución que la temperatura no sobrepase los 1000°C.

1 hora al 75 % de capacidad del sistema produce 15 KW/h

Tabla 22 potencia producida

Tiempo [h]	Producción [KW/h]
1	15
6	90
8	120
12	180
24	360

Al día se producen 360KW/h. la operación se la realiza dentro de los laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, siempre con operadores controlando la producción del sistema, su producción se reduce a máximo 8 horas diarias los 20 días al mes laborables. Teniendo una producción mensual de 2400KW/h.

Y una producción anual de 28800KW/h.

6.2.2 Generación de energía con biomasa

Por cada 1,2 kg que se consume de biomasa se producen 1KWh, la cual varía según el tipo de biomasa y el contenido de humedad de la misma.

Tabla 23 potencia en relación al consumo de biomasa

Potencia [kW]	consumo estimado de biomasa [kg/hr]
2	2,4
4	4,8
6	7,2
8	9,6
10	12,0
12	14,4
14	16,8
16	19,2
18	21,6
20	24,0

Con un máximo de consumo de 24 Kg/hr para la potencia de 20KW

6.2.3 Relación a otros combustibles

Para producir una potencia de 15HP se necesita 1 galón de gasolina, para la misma potencia se necesita 1 galón de diésel.

Un 1,2 kg de biomasa produce 1KW/h, su equivalencia en HP es de 0,75.

Por lo tanto para la producción de 1 HP se requiere 1Kg

La eficiencia del motor se reduce un 30 % utilizando gas de síntesis.

Para alcanzar los mismos 15 HP de potencia debo aumentar el 30% a la producción de gas.

Ecuación 21 Potencia con gas

$$\text{Potencia con gas} = \text{Potencia} + 30\% \text{ de Potencia}$$

$$\text{Potencia con gas} = 15\text{HP} + 4,5\text{HP} = 19,5\text{HP}$$

Para generar los 15 HP de potencia necesito aproximadamente 20 Kg de biomasa.

La generación de energía con biomasa tiene un costo de 0,03 USD el kilogramo de chipeado de madera que produce 1 HP de potencia.

Ahorro con relación a la gasolina.

Tabla 24 Relación de Gasolina - Biomasa

	gasolina	Biomasa
Producción	120,00 KW/h	120,00 KW/h
consumo	5,93 gal	88,89 Kg
Precio	1,48 USD/gal	0,003 USD/Kg
costo	8,77	0,26700
Ahorro de		8,5

El total de consumo anual es de 2040,89

Tabla 25 Determinación de los indicadores económicos

Años	Egresos	Ingresos	Flujo de efectivo	ingresos actualizados	egresos actualizados
0	5809,40		-5809,40	0,00	5809,40
1		2040,89	2040,89	1889,71	0,00
2		2040,89	2040,89	1749,73	0,00
3		2040,89	2040,89	1620,12	0,00
4		2040,89	2040,89	1500,11	0,00
5		2040,89	2040,89	1388,99	0,00
total	5809,40	10204,44	4395,04	8148,68	5809,40
VAN			\$ 2.339,28		
TIR			22%		
B/C			1,4		
PRI			2,847		

El Valor actual neto (VAN) es mayor a cero por lo cual el negocio es viable, la Tasa interna de retorno (TIR), es mayor a la TMAR por lo cual la inversión debe aceptarse, es decir se producirá ganancias con este proyecto, el factor costo beneficio mayor a uno lo que significa que es un proyecto rentable, la recuperación de inversión del capital (PRI), da un periodo de recuperación de 2,847 años equivalente a 2 años 10 meses y 4 días.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Proyecto cumple con los lineamientos del plan nacional del buen vivir. Genera alternativas, fortalece la planificación e implementa regulación al uso energético en el transporte, los hogares y las industrias, modifica los patrones de consumo energético, con criterios de eficiencia y sustentabilidad. Aprovecha el potencial energético basado en fuentes renovables. Aprovecha el potencial de desarrollo de la bioenergía, sin detrimento de la soberanía alimentaria y respetando los derechos de la naturaleza.
- El tipo de biomasa y contenido de humedad y cenizas influyen en la calidad y composición del gas, siendo más eficientes las maderas con bajo contenido de humedad.
- El alto contenido de cenizas en la biomasa genera el Clinker, el cual causa un aumento en la temperatura del gasificador, afectando los procesos y el flujo adecuado de gas.
- Estos sistemas de gasificación son viables donde no exista interconexión eléctrica de la red pública y fluctúa dependiendo de los recursos gasificables disponibles en las zonas y del precio de combustibles, también es viable en caso crisis energética, guerras.

- El gas producido presenta mejores propiedades en relación al sólido (biomasa), ya que su combustión es instantánea y requiere menos cantidad de aire para la misma.
- El gas es sumamente limpio, reduciendo la emisión de CO₂, la cantidad de CO₂ que se produce en el proceso de combustión del gas, es equivalente al que absorbe en el proceso de fotosíntesis la biomasa utilizada, es un proceso neutro de emisiones de CO₂

7.2 RECOMENDACIONES

- El sistema de gasificación requiere de un motor con una relación de compresión alta por el alto octanaje del gas, se recomienda implementar un motor a diésel adaptado a encendido por chispa o un motor de combustión externa tipo Stirling, aprovechando el gas de síntesis.
- Las dimensiones de la biomasa que ingresan deben ser las recomendadas ya que material particulado más grande puede atascar la alimentación del tornillo sin fin u obstruir la reducción del gasificador.
- Para una buena utilización y manipulación del equipo se recomienda la automatización del mismo.
- El sistema debe ser utilizado en áreas bien ventiladas ya que el gas de síntesis tiene una gran cantidad de monóxido de carbono,

altamente toxico, teniendo en cuenta las normas de seguridad OSHAS para monóxido de carbono.

- Se recomienda la implementación de, analizadores continuos de gases, para la inmediata caracterización del gas.

BIBLIOGRAFÍA

ALTERNER. (2002). *The future of biomass Pyrolysis and gasification: status, opportunities and policies for Europe*. Birmingham: Aston University.

Barriga, Balseca. (n.d.). *Situación actual del sector energético*. Guayaquil: Ecuador.

CONELEC. (2010). *Boletín Estadístico Sector Eléctrico Ecuatoriano*. Quito: Conelec.

Chemicals, A. (2014, 07 19). *ask chemicals*. Retrieved from <http://www.ask-chemicals.com/ES/foundry-products/products.html>

ECN phyllis2. (2012). *Database for biomass and waste*. Retrieved from Phyllis2: <https://www.ecn.nl/phyllis2/>

Efunda. (2014, 05 24). *orifice flowmeter*. Retrieved from (Efunda, 2014)

FAO, O. d. (1993). *El gas de madera como combustible para motores*. Roma: FAO.

FJELLERUP J., A. J. (2005). *FORMATION, DECOMPOSITION AND CRACKING OF BIOMASS TARS I GASIFICATION*. Kongens Lyngby: TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK.

- Fonseca, N. (2003). *Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa en motores de combustión interna alternativos*. Bogota: CIEMAT.
- García, H. (2011). *Modelación de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo*. Bogotá: Universidad nacional de Colombia.
- Lesme; Recio; Preston; Rodriguez, Oliva. (2008). *Analisis Termodinamico de un Gasificador ANKUR* . Saniago de Cuba: Centro de Estudios de Eficiencia energetica de Ingenieria Mecánica, Univesidad Oriente.
- Mason, J. (2009). *Gasification Basics* . Berkley: All Power Labs.
- OLMO, D. (2014, 05 28). *Angeles en la Cabeza*. Retrieved from <http://angelesenlacabeza.blogspot.com/2012/12/tuneles-de-viento-como-trabajan.html>
- Reed. (1978). *Biomass Energy A Two Edge Sword*. Denver: Solar Energy Research Institute.
- Rodríguez Muños, P. (sf). *Tecnología de gasificación de biomasa*. Sevilla, España: INERCO.
- S&P, México. (2013, 04 20). *Hojas Técnicas: Depuración de aire y Filtros*. Retrieved from <http://www.soler-palau.mx/casosaplicacion5.php>
- Sánchez, D. C. (2003). *Tecnologia de gasificación* . Campinas: UNICAMP.

- Senplades. (2013). *Plan Nacional del Buen Vivir 2013 -2017*. Quito : Ecuador.
- Silva Castro, I. (2010). *Tecnologías de mitigación de emisiones en centrales termoelectricas a carbon*. Santiago: Pontifica Universidad Catolica de Chile.
- Silva Lora, E. E. (2012). *Biocombustiveis*. Itajubá: Interciencia.
- Skoblja S., Malecha J., Koutsky B., Buryan P. (2005). *Hot gas cleaning for biomass gasification for clean gas production*. Prage: Institute of Chemical Technology Prague.
- Solar Technical Information Program. (1988). *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Golden, Colorado: Solar Energy Research Institute.
- Steem. (n.d.). *Tabla de densidades*. Guipúzcoa, España: Steem equipos industriales.
- ThePetroStreet. (2014, 05 26). *orifice meter Basic selection and basic consideration*. Retrieved from http://www.thepetrostreet.com/database/orifice_plate.pdf
- WENDER, I. (1996). *REACTION OF SYNTHESIS GAS. FUEL PROCESS TECHNOL.*

Wilson, B. (2014, 07 13). *Midwest Permaculture*. Retrieved from <http://midwestpermaculture.com/2012/10/downdraft-wood-gasification/>

ANEXOS

ANEXO C PLANOS, Y ANEXO D HOJAS DE PROCESO, ADJUNTOS
EN EL CD ENTREGADO EN BIBLIOTECA.