UNIVERSIDAD DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL PIRHUA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA MOTO-GENERADOR EMPLEANDO GASIFICACIÓN DE BIOMASA

Edgardo Atoche-Sánchez

Piura, agosto de 2018

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Atoche, E. (2018). *Estudio de factibilidad de un sistema moto-generador empleando gasificación de biomasa* (Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.

Esta obra está bajo una licencia
Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

U N I V E R S I D A D D E P I U R A
FACULTAD DE INGENIERÍA

"ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA MOTO-GENERADOR EMPLEANDO GASIFICACIÓN DE BIOMASA"

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico Eléctrico

Edgardo Augusto Atoche Sánchez

Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana

Piura, Agosto 2018

A mis padres Luz y Moisés por sus
sacrificios y su constante apoyo,
a mis hermanas y amigos.

Prólogo

El uso de combustibles fósiles asociado a la demanda energética mundial se ha incrementado en los últimos años, aumentando el impacto ambiental y sus consecuencias; por ello ha sido necesario el estudio de tecnologías para el uso de energías renovables o alternativas, como el aprovechamiento energético de la biomasa, las cuales llegan a generar menor número de emisiones con respecto al uso de combustibles derivados del petróleo.

La biomasa constituye la cantidad total de materia orgánica, la cual puede utilizarse como alternativa para generación de energía. El bagazo de caña, la madera, hojas de árboles, cáscaras de semillas y frutos, residuos de poda, entre otras forman parte de la biomasa.

Las investigaciones realizadas a través de los años desarrollaron distintos procesos de aprovechamiento de la biomasa como fuente generadora de energía, sustituyendo parcial o totalmente a combustibles derivados del petróleo, planteando una alternativa ante la posible crisis en el suministro de combustibles convencionales.

Uno de los procesos para el aprovechamiento de la biomasa es la implementación de gasificadores, los cuales por medio de un proceso termo-químico con biomasa vegetal generan gases, de tal composición, que pueden utilizarse como combustible para el accionamiento de motores de combustión interna y moto-generadores originando potencia eléctrica.

Actualmente, los países emergentes, como Perú, generan gran cantidad de residuos agrícolas y forestales, los cuales no forman parte del comercio y suelen ser desechados sin darles un uso posterior, pese a que presentan un gran potencial energético. La implementación de un moto-generador empleando gas de gasificación como combustible representa una alternativa viable, para brindar suministro eléctrico, un mejor manejo y disposición de desechos y beneficios medioambientales.

Finalmente, se agradece al proyecto con CODIGO DE SUBVENCION N°130-2015-FONDECYT; “Identificación energética de la producción de syngas utilizando un gasificador de lecho fluidizado de diferentes tipos de residuos de biomasa con fines de aprovechamiento térmico o eléctrico".

Índice

Introducción **1**

Capítulo 1

Estado del arte **3**

Uso de gas de gasificación de biomasa en moto-generadores **3**

1.1. Fundamentos generales: motores de combustión interna 3

1.1.1. Tipos de motores de combustión interna 3

1.2. Contexto de biomasa y gas de gasificación 4

1.2.1. Biomasa y energía. 4

1.2.2. Gasificación 6

1.2.2.1. Gasificador de lecho fluidizado 7

1.3. Gas de gasificación 7

1.3.1. Clasificación del gas de gasificación como combustible 7

1.3.2. Composición y poder calorífico del gas de gasificación 8

1.3.3. Requisitos de la calidad del gas de gasificación para trabajar 9

en motores. 9

1.3.4. Tratamiento del gas de gasificación. 10

1.4. Clasificación de motores a combustible gaseoso 10

1.5. Viabilidad del uso de gas de gasificación en motores 12

1.5.1. Potencia de un motor empleando gas de gasificación 12

1.5.2. Eficiencia de un motor empleando gas de gasificación. 15

1.6. Investigaciones sobre uso del gas de gasificación para moto- 16

generadores. 16

1.6.1. Investigación casa Deutz. 16

1.6.1.1. Influencia de la composición de la mezcla. 16

1.6.1.2. Influencia de la relación de compresión. 17

1.6.1.3. Influencia del poder calorífico del gas de gasificación. 17

1.6.1.4. Influencia de la composición del gas de gasificación 17

1.6.2. Investigación en BEELab-Italia 17
1.6.3. Investigación de un motor Diesel dual 18

Capítulo 2
Cálculos y Análisis de Moto-generador utilizando Syngas 21
2.1. Justificación de la Tecnología. 21
2.2 Caracterización del gas de síntesis 22
2.1.1. Componentes del gas de gasificación 22
2.1.2. Relación Aire-Combustible en la combustión 24
2.1.3. Poder calorífico de la mezcla 25
2.1.3. Número de metano 27
2.2. Cálculos Aproximados 27
2.2.1. Ecuaciones 27
2.2.1.1. Consumo estimado de combustible. 28
2.2.1.2. Potencia esperada 29
2.2.2. Valores teóricos obtenidos 29
2.2.2.1. Potencia Teórica Resultante 30
2.2.2.2. Cilindrada del motor 31
2.2.3 Análisis del motor dual. 32
2.2.3.1. Aumentando 15% de diesel. 33
2.2.3.2. Reemplazando 15 % de diesel 34
2.2.3 Código Matlab 35
Capítulo 3
Selección de moto-generador 37
3.1. Sistema motor-generador. 37
3.1.1. Sistemas moto-generadores sin adaptar. 37
3.1.2. Sistemas moto-generadores adaptados. 38
3.2. Adaptación de Motores de combustión interna. 38
3.2.1. Motores de ciclo Otto. 38
3.2.1.1. Ensayo con Motor GM 366. 39
3.2.2. Motores duales. 39
3.2.2.1. Ensayo motor Ford 4000-1981. 40
3.2.2.2. Ensayo motor Diesel dual. 41
3.2.2.3. Ensayo moto-generador Leyland P76. 42
3.2.3. Motores de ciclo Diesel. 43
3.1.1 Ensayo motor Diesel 43

3.3. Criterios de selección. 44
3.3.1. Tipo de motor 44
3.3.2. Potencia y frecuencia. 44
3.3.3. Disponibilidad de biomasa. 44
3.3.4. Capacidad del gasificador. 45
3.3.5. El espacio disponible para la instalación. 46
3.2. Sistemas moto-generadores propuestos. 46
3.2.1. Sistemas sin adaptar. 46
3.2.2. Sistemas adaptados. 48
3.3. Análisis de los modelos 49
3.3.1. Sistema moto-generador MP-14. 49
3.3.1.1. Potencia esperada. 50
3.3.2. Sistema moto-generador MM-16. 50
3.3.2.1. Potencia esperada. 51
3.3.3. Sistema moto-generador MM-24. 51
3.3.3.1. Potencia esperada. 52
3.3.4. Sistema moto-generador LH-10GFT. 52
3.3.4.1. Potencia esperada. 52
3.4. Código Matlab 53
Capítulo 4 55
Pruebas y resultados 55
4.1. Funcionamiento con Syngas. 55
4.1.1. Poder calorífico del syngas. 55
4.1.2. Potencia teórica obtenida. 56
4.1.3. Capacidad máxima del motor. 57
4.2. Funcionamiento con doble combustible. 57
4.2.1. Potencia obtenida con doble combustible. 57
4.2.2. Capacidad obtenida con doble combustible 58
4.3. Pruebas 59
4.3.1. Preparación del sistema 59
4.3.1.1. Modificación del sistema de calentamiento 59
4.3.1.2. Modificación en el sistema de fluidización. 60
4.3.2. Pruebas de equipos. 60
4.3.3. Adquisición de datos. 62
4.3.4. Resultados experimentales. 63
4.3.4.1. Datos de temperatura. 64
4.3.4.2. Datos de composición del syngas. 64

4.3.4.3. Análisis teórico-experimental. 66
Conclusiones 71
Bibliografía 77
Anexos 79

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de los motores alternativos de combustión interna basada en los parámetros que caracterizan su funcionamiento. 4
Tabla 2. Composición y poder calorífico inferior (PCI) de algunos combustibles gaseosos. 9
Tabla 3. Composición del syngas producido en relación al agente de fluidización. 9
Tabla 4. Clasificación del gas de gasificación según el agente de gasificación. 9
Tabla 5. Indicadores de las tecnologías para la generación de electricidad a partir de la gasificación de la biomasa. 21
Tabla 6. Análisis elemental de las hojas de caña de azúcar. 22
Tabla 7. Análisis elemental del bagazo de caña de azúcar. 23
Tabla 8. Caracterización química del syngas empleando hojas de caña. 23
Tabla 9. Caracterización química del syngas empleando bagazo de caña. 23
Tabla 10. Relación de aire-combustible para combustión estequiométrica del gas de gasificación empleando bagazo de caña. 24
Tabla 11. Relación aire-combustible teórica según la biomasa utilizada. 24
Tabla 12. Poder calorífico del gas de gasificación empleando bagazo de caña. 25
Tabla 13. Poder calorífico inferior del gas de síntesis según biomasa utilizada. 26
Tabla 14. Poder calorífico de la mezcla estequiométrica aire-gas de gasificación. 26
Tabla 15. Poder calorífico de la mezcla estequiométrica según biomasa utilizada. 26
Tabla 16. Resultados del dimensionamiento del gasificador. 30
Tabla 17. Parámetros característicos de motores típicos para diferentes campos de aplicación. 31
Tabla 18. Características técnicas del motor Ashok Leyland 42
Tabla 19. Ficha Técnica Grupo Electrógeno MP-14. 46
Tabla 20. Ficha Técnica Grupo Electrógeno MM-16. 47
Tabla 21. Ficha Técnica Grupo Electrógeno MM-24. 47
Tabla 22. Ficha Técnica Grupo Electrógeno MP-24. 48
Tabla 23. Resultados de la composición del syngas de hoja de caña. 66
Tabla 24. Características del syngas de hoja de caña. 67
Tabla 25. Potencias disponibles empleando hoja de caña como biomasa. 67

Tabla 26. Capacidad de motor a distintas revoluciones empleando hoja de caña como biomasa. 67
Tabla 27. Valores empleando 15% de diesel en reemplazo. 67
Tabla 28. Valores empleando 15% de diesel en aumento. 68
Tabla 29. Parámetros básicos del sistema moto-generador. 68
Tabla 30. Evaluación de motores propuestos según parámetros básicos. 69
Tabla 31. Resultados de los sistemas moto-generadores seleccionados. 69

Índice de figuras

Figura 1. Energía total aprovechable (TEP) disponible correspondiente a residuos biomásicos. 5
Figura 2. Fases existentes en los procesos de gasificación. 6
Figura 3. Gasificador de lecho fluidizado. 7
Figura 4. Proceso completo gasificación-obtención de energía eléctrica. 13
Figura 5. Relación entre el índice de compresión y la eficiencia térmica de un motor. 14
Figura 6. Balance de energía de un motor de gas-Dual trabajando con gas pobre. 15
Figura 7. Balance de energía de un motor de encendido por chispa trabajando con gas pobre. 16
Figura 8. Presión en los cilindros(bar) vs ángulos del cigueñal a 10 Nm. 19
Figura 9. Eficiencia al freno del motor en función de la energía del syngas y la carga del motor 19
Figura 10. Motor de combustión interna GM 366. 39
Figura 11. Sistema diesel-syngas en motores duales. 40
Figura 12. Carburador IMPCO 40
Figura 13. Motor-generador Diesel modelo Leyland. 42
Figura 14. Sistema Diesel antes y después de la adaptación. 43
Figura 15. Almacenamiento de biomasa. 45
Figura 16. Prototipo de gasificador de lecho fluidizado burbujeante. 45
Figura 17. Grupo Electrógeno MP-14 Motor Perkins. 47
Figura 18. Grupo Electrógeno MM-16 Motor Mitsubishi. 47
Figura 19. Grupo Electrógeno MM-24 Motor Mitsubishi. 48
Figura 20. Grupo Electrógeno Ronsun LH-10GFT. 49
Figura 21. Composición del gas de síntesis. 55
Figura 22. Poder calorífico inferior del syngas. 56
Figura 23. Potencia disponible según el tipo de biomasa. 56
Figura 24. Capacidad máxima del motor según el tipo de biomasa y las RPM. 57
Figura 25. Potencia eléctrica de motor funcionando con doble combustible. 58
Figura 26. Cilindrada del motor según RPM y porcentaje de diesel. 58
Figura 27. Reemplazo y sellado del orificio del quemador. 59
Figura 28. Instalación del ducto de ingreso del gas propano. 60
Figura 29. Reemplazo del soplador. 60
Figura 30. Encendido de la mezcla y tapa superior (visor). 61

Figura 31. Distribución de sensores de temperatura en el gasificador. 62
Figura 32. Sistema completo para la adquisición de datos. 63
Figura 33. Salida de syngas por la manguera y por el orificio de ingreso de biomasa. 64
Figura 34. Gráficas de temperatura durante las pruebas. 65
Figura 35. Potencia eléctrica de motor seleccionado. 70
Figura 36. Reducción de potencia según motor seleccionado. 70

Introducción

La biomasa es una de las fuentes de energía renovable con mayor expectativa a nivel mundial, debido a su potencialidad energética y menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles. Sometiendo la biomasa a diversos procesos y tecnologías de conversión energética, como la gasificación, es posible obtener distintos tipos de combustibles ya sean sólidos líquidos o gaseosos. En este estudio se presenta un análisis y selección de un sistema moto-generador empleando gas de síntesis como combustible, el cual se obtiene mediante un proceso de gasificación a través de un prototipo de gasificador de lecho fluidizado burbujeante.

En el primer capítulo se abordarán temas acerca de la biomasa y definiciones básicas acerca del gas de síntesis. Se relacionará los temas del potencial energético del gas de síntesis y su uso para el funcionamiento en motores de combustión interna, además se contrastará con casos de estudio a nivel mundial acerca de la utilización de gas de síntesis en motores de combustión interna.

En el segundo capítulo tomando en cuenta los resultados y recomendaciones de diferentes estudios empíricos y teóricos referidos al gas de síntesis proveniente de la gasificación de hoja de caña y bagazo de caña, se realizarán cálculos con el fin de obtener la potencia eléctrica disponible en un sistema moto-generador y algunos parámetros del motor a seleccionar que vayan de acuerdo con la capacidad del gasificador.

En el tercer capítulo a partir de bibliografía basada en ensayos empíricos sobre el uso del gas de síntesis en motores de combustión interna, se identificarán diversos criterios de selección para el sistema moto-generador, logrando elegir algunos sistemas moto-generadores y analizándolos según la metodología planteada en el segundo capítulo.

El cuarto capítulo incluye resultados obtenidos en los capítulos precedentes realizando una comparación entre el syngas obtenido a partir de hoja de caña y de bagazo de caña, además a partir de pruebas realizadas y datos experimentales obtenidos sobre el syngas de hoja de caña se plantearán los parámetros básicos que debe tener el sistema moto-generador a emplear, y, se realizará una selección más específica respecto a los sistemas plantados en el tercer capítulo.

Capítulo 1

Estado del arte
Uso de gas de gasificación de biomasa en moto-generadores

Un moto-generador es un sistema que consta de dos partes principales: un motor y un generador eléctrico, los cuales trabajando en conjunto son capaces de convertir energía. Es un proceso, en el cual energía química obtenida de un combustible es liberada mediante un motor de combustión interna y transformada en energía mecánica, la cual a su vez es transformada en energía eléctrica por un generador, por inducción electromagnética[1], para el fin que se requiera.

En el presente capítulo se desarrollarán temas vinculados con los conceptos de moto-generadores; principalmente el gas de gasificación y su uso en motores de combustión interna alternativos.

1.1. Fundamentos generales: motores de combustión interna

Los motores de combustión interna (MCI) son máquinas motrices térmicas que convierten la energía química de un combustible líquido y/o gaseoso, liberado por medio de un proceso de combustión discontinuo o continuo al interior del motor, en trabajo mecánico.

Según la definición dada, también los turbogrupos de gas o turbogas pertenecen a esta categoría de motores, aunque la frase motores de combustión interna siempre ha sido reservada a los motores volumétricos alternativos [1]. En este estudio se seguirá esta última convención debido a los requisitos planteados en este estudio.

1.1.1. Tipos de motores de combustión interna

Existen distintos criterios de clasificación de los motores de combustión interna; sin embargo, se considerará aquellos que faciliten el desarrollo de este estudio.

[1] Proceso mediante el cual campos magnéticos generan campos eléctricos.

Tabla 1. Clasificación de los motores alternativos de combustión interna basada en los parámetros que caracterizan su funcionamiento.

Criterio	Tipo
Según sistema de encendido del combustible	Motores de encendido por chispa Motores de encendido por compresión
Según el ciclo operativo o de trabajo	Motores de dos tiempos. Motores de cuatro tiempos.
Según el combustible utilizado	Motores que funcionan con combustible líquido (Gasolina, gasóleo o diesel, combustóleo o bunker, metanol, etanol) Motores que funcionan con combustible gaseoso (GLP, gas natural) Motores que funcionan con doble combustible (gas como base y líquido para el inicio de la combustión) Motores pluricombustibles

Fuente: Clasificación y campo de aplicación de los motores alternativos de combustión interna (MACI) – 2016

Las principales diferencias entre los tipos de motores señalados en la tabla 1 son:

- Los motores de encendido por chispa (MECH) producen encendido de la mezcla aire-gasolina a través de una chispa producida por los electrodos de una bujía, llevándose a cabo una combustión rápida; a éstos se les conoce como motores Otto.

- Los motores de encendido por compresión (MEC) producen el encendido de la mezcla mediante la compresión de aire en la cámara de combustión, el cual alcanza temperaturas que generan el autoencendido del combustible al ser pulverizado en la misma cámara, entonces se origina una combustión lenta y gradual, estos motores se conocen como motores Diesel.

- Motores de cuatro tiempos: más de la mitad del ciclo de trabajo es dedicado a la expulsión de los gases de combustión y la aspiración de carga fresca[2] realizando un buen recambio de fluido.

- Motores de dos tiempos: destinan normalmente menos de la mitad del ciclo de trabajo a la sustitución de carga, por lo tanto el recambio del fluido de trabajo será menos satisfactorio [1].

1.2. Contexto de biomasa y gas de gasificación

1.2.1. Biomasa y energía

La biomasa para que pueda considerarse como material biológico capaz de utilizarse como combustible, es necesario que tenga la propiedad de liberar energía de forma violenta.

[2] Fluido de trabajo que ingresa al cilindro puede ser aire-combustible (en MECH) o aire en (en MEC).

Para transformar energía primero hay que obtenerla. Todo material biológico obtiene la mayor parte de su energía de los rayos del sol mediante diferentes procesos. La fotosíntesis, medio por el cual las plantas absorben energía, toma una cantidad menor al 1% del total de la energía para realizar dicho proceso. Es decir, 173,000 TW es la energía que llega del Sol a la Tierra sólo 40 TW se convierte en materia orgánica por el proceso de fotosíntesis [2].

La biomasa almacena energía, proveniente de los rayos del sol, en el proceso de fotosíntesis, las plantas absorben la energía lumínica del sol (fotones) en unas células llamadas cloroplastos, las cuales tienen una sustancia que absorbe la energía luminosa del sol, llamada clorofila. En el proceso fotosintético se consigue una regeneración del CO_2 y el agua, así como el reciclaje de la energía solar mediante procesos que se dan a través del agua, el suelo, los animales y el proceso de descomposición.

Un kilogramo de biomasa puede generar 12,560 kJ, mientras que un litro de gasolina proporciona 41,868 kJ. El contenido energético de la biomasa se mide en función del poder calorífico del producto energético obtenido durante su tratamiento, o bien en función del poder calorífico del recurso [3]. En la figura 1 se muestra la energía total aprovechable correspondiente a residuos biomásicos en el Perú.

La transformación de energía procedente de la biomasa ha continuado su incremento desde el 2015, ayudando a satisfacer la demanda de energía en algunos países y contribuyendo a alcanzar objetivos ambientales. Sin embargo, el sector se enfrentó a diversos retos, en particular, a los bajos precios del petróleo y a la incertidumbre política presente en algunos mercados [4].

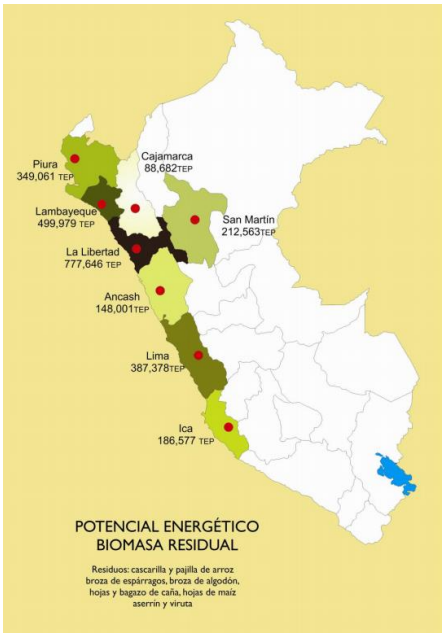


Figura 1. Energía total aprovechable (TEP) disponible correspondiente a residuos biomásicos.
Fuente: "Potencial Energético de la Biomasa Residual en el Perú"- Pontificia Universidad Católica del Perú, 2013.

1.2.2. Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico[3] que se produce en un ambiente con presencia de oxígeno en forma controlada que da como resultado la transformación de un combustible sólido a uno gaseoso, mediante una serie de reacciones que ocurren promovidas por altas temperaturas y presencia de un agente gasificante. La figura 2 detalla las fases existentes en el proceso de gasificación.

En el proceso de gasificación de biomasa tienen lugar varias reacciones cuyo orden e importancia depende de las condiciones de operación, del combustible y de los elementos del agente gasificante. Existe una gran variedad de agentes gasificantes como, por ejemplo: hidrógeno, vapor de agua, oxígeno o aire. Los gases producidos con cada uno de ellos difieren en su composición final y sus propiedades como combustible.

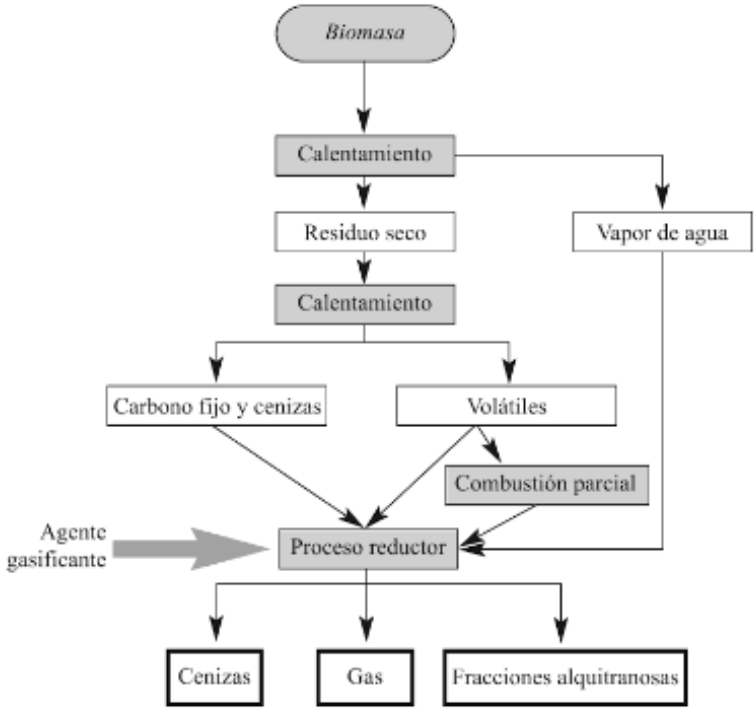


Figura 2. Fases existentes en los procesos de gasificación.
Fuente: Libro "Energía de la biomasa (Volumen I)" pag 61- Fernando Sebastián Nógues**.**

Tras el calentamiento inicial, que promueve el craqueo de las componentes de la biomasa (pirólisis[4]), las fracciones orgánicas ligeras se escapan de la materia sólida y se recombinan, debido a las altas temperaturas locales, con el agente gasificante (gases reactivos introducidos en las zonas donde se prevé tengan lugar las reacciones de gasificación).

[3] Proceso que implica reacciones químicas irreversibles, a altas temperaturas y en condiciones variables de oxidación.

[4] Descomposición química de materia orgánica causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.

1.2.2.1. Gasificador de lecho fluidizado

Es un reactor en el cual la materia inerte se calienta hasta la temperatura deseada. El agente de gasificación ingresa de manera ascendente obligando la suspensión de la materia y la biomasa, debido a una determinada velocidad que consigue la fuerza de arrastre del fluido.

La temperatura es alta y constante en todo el reactor, con ello se permite obtener un gas a mayor temperatura. Además se obtiene menor cantidad de fracciones pesadas, aunque por otra parte aumenta la complejidad de los equipos incorporados al proceso.

Existen dos tipos de gasificadores de lecho fluidizado: el burbujeante y el circulante. En el primero, con el cual se trabajará en el estudio, los alquitranes y algunas partículas inertes que hayan sido arrastradas no son reenviadas al lecho y se trabaja con velocidad próxima a las de arrastre neumático. En cambio, los de lecho circulante poseen mayor cantidad de conversión de carbón debido al mayor tiempo de residencia de las partículas [5]. En la figura 3 se muestra la estructura general de un gasificador de lecho fluidizado.

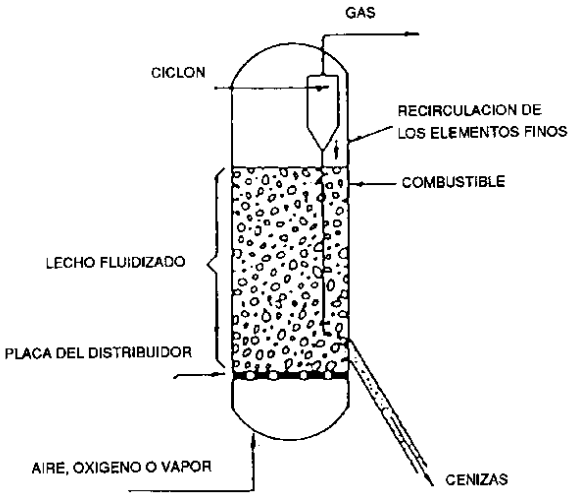


Figura 3. Gasificador de lecho fluidizado.
Fuente: FAO - Roma, 1993

1.3. Gas de gasificación

El gas de gasificación es el resultado del proceso termoquímico de gasificación de la biomasa, posee una composición química basada en una mezcla gaseosa de hidrógeno y monóxido de carbono, aunque presenta variaciones en su composición dependiendo del agente gasificante empleado durante el proceso [6].

1.3.1. Clasificación del gas de gasificación como combustible

Combustible es toda sustancia que emite o desprende energía por combustión controlada capaz de convertir su contenido energético en trabajo. Es también cualquier sustancia capaz de arder en determinadas condiciones (necesitará un comburente[5] y una energía de activación) [7].

[5] Sustancia que logra la combustión, o en su defecto, contribuye a su aceleración.

Los combustibles, actualmente, utilizados para generar potencia en los motores de combustión interna se dividen principalmente en:

Combustibles sólidos, combustibles líquidos y combustibles gaseosos.

Combustibles sólidos hacen referencia al carbón húmedo pulverizado el cuál se ha utilizado en motores de combustión interna a finales del siglo XIX y su uso actualmente es muy limitado; el gran problema que presentan, es la inaceptable erosión provocada en los pistones, válvulas y cilindros de las maquinas que los utilizan.

Combustibles líquidos se clasifican en dos grupos: los derivados del petróleo y los no derivados del petróleo. Los combustibles líquidos, derivados de la industria del petróleo, son todas las gasolinas y aceites livianos, y los combustibles no derivados de la industria del petróleo son todos los bio-alcoholes siendo estos químicamente similar al derivado de los combustibles fósiles y los bio-aceites.

Combustibles gaseosos poseen ventajas sobre los otros tipos de combustibles mencionados como su facilidad de encender con rapidez, no formar residuos en la cámara de combustión y no disolver el aceite de lubricación.

Al igual que en el caso anterior, se tiene los derivados de la industria petrolera como es el caso del gas natural, el gas sintético (descomposición de combustibles líquidos fósiles o del gas natural en sus componentes básicos como son CO, CO2 e hidrógeno) y los no derivados de la industria del petróleo:

- Biogás: Gas rico en metano (entre un 40 y 70%), obtenido como producto de la fermentación anaeróbica[6] de material orgánico húmedo.

- Gas de destilación: gas formado principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono y metano, el nitrógeno y dióxido de carbono se encuentran en menor proporción. Este gas se obtiene por varios métodos, uno de ellos es la destilación anaeróbica seca a alta temperatura.

- Gas de gasificación: gas producido por gasificación termoquímica de un combustible sólido, como residuos vegetales (llamados biomasa). El gas de gasificación es un gas compuesto principalmente de CO, H_2 y CH_4 diluido o no en nitrógeno dependiendo de si el proceso de gasificación se realiza con aire o con oxígeno puro [8]. En la tabla 2 se muestran combustibles gaseosos comunes y su poder calorífico inferior.

1.3.2. Composición y poder calorífico del gas de gasificación

La composición del gas de gasificación, syngas o gas pobre, presenta variantes respecto al agente gasificante que se ha empleado, al proceso de gasificación y, también, al tipo de gasificador utilizado. En la tabla 3 se muestran los principales componentes del syngas producido, así como el agente de gasificación del proceso.

[6] Que se realiza en ausencia de oxígeno.

Tabla 2. Composición y poder calorífico inferior (PCI) de algunos combustibles gaseosos.

Combustible Gaseoso	Composición en % por Volumen									PCI ($^{MJ}/_{m^3}$)
	CO	H_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_3H_{10}	O_2	CO_2	N_2	
Gas natural	-	-	83.4	15.8	-	-	-	-	0.8	35.588
GLP	-	-	-	-	90	10	-	-	-	93.5
Biogás		3	60	-	-	-	-	32	5	21.980
Gas de destilación	14.1	50.2	23	-	-	-	0.4	3.1	9.2	15.49
Gas de gasificación	14	8	4.1	1.5	-	-	-	16	56.4	5.018

Fuente: Ciemat, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (2013)

Tabla 3. Composición del syngas producido en relación al agente de fluidización.

Componentes	Unidad	Agente de gasificación	
		Aire	Vapor/O2
H2	%Vol	6 – 19 (12.5)	26 – 55 (38.1)
CO	%Vol	9 – 21 (16.3)	20 – 40 (28.1)
CO2	%Vol	11 – 19 (13.5)	15 – 30 (21.2)
CH4	%Vol	3 – 7 (4.4)	4 – 14 (8.6)

Fuente: Gasificación de Biomasa: Un Análisis Teórico y Experimental, Vieira Andrade (2017)

El poder calorífico promedio que se obtiene del gas de gasificación, el cual depende directamente del agente de gasificación, se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación del gas de gasificación según el agente de gasificación.

Agente de gasificación	Poder calorífico	Clasificación
Hidrógeno	40 MJ/m3	Alto poder calorífico
Vapor de agua	12-18 MJ/m3	Medio poder calorífico
Aire	4-6 MJ/m3	Bajo poder calorífico

Elaboración propia

El gas de gasificación, que suele ser usado para motores de combustión interna (MCI), es el gas de bajo poder calorífico, el cual nos referiremos en el transcurso de la investigación como gas de gasificación, syngas o gas pobre. El gas de gasificación de medio poder calorífico se utiliza para instalaciones que utilizan turbinas a gas para la generación de energía y el de alto poder calorífico se emplea en algunos casos en la industria química [9].

1.3.3. Requisitos de la calidad del gas de gasificación para trabajar en motores

Cuando se emplea un sistema de gasificación y se acopla un motor de combustión interna, un requisito importante es que la alimentación con gas esté suficientemente libre de polvo, alquitranes[7] y ácidos.

[7] Sustancia densa y pegajosa, de color oscuro y olor fuerte, formada dentro del proceso de gasificación, clasificada como impureza.

Las cantidades tolerables de estas sustancias variarán dependiendo del tipo de motor. Las cantidades medias tolerables [10] se pueden tomar en consideración los siguientes datos:

- Polvo: menor a 50 mg/m^3 de gas, preferentemente 5 mg/m^3 de gas.
- Alquitranes: menos de 500 mg/m^3 de gas.
- Ácidos: menos de 50 mg/m^3 de gas (medido como ácido acético)

1.3.4. Tratamiento del gas de gasificación

El gas a la salida después del proceso de gasificación contiene impurezas, principalmente, cenizas, partículas y alquitranes de medio y alto peso molecular mayores a las máximas permitidas para el uso del syngas en el motor, además la temperatura del gas (de 300 y 500°C) no es la apropiada para su uso en motores. Razón por la cual se hace necesario someter al gas a un proceso de depuración y enfriamiento hasta llevarlo a las condiciones apropiadas para su uso en los motores de combustión interna.

- Depuración del Gas

Mediante ciclones correctamente diseñados es posible retener las partículas con tamaño medio superior a 10 micras, pero las partículas más pequeñas requieren otros medios de eliminación como filtros cerámicos, de tela o metálicos. Actualmente, se prefieren filtros que permitan depurar el gas a temperaturas por encima de los 500°C, para evitar la condensación no solo de la humedad sino de los alquitranes.

- Enfriamiento del gas

El enfriamiento del gas de gasificación es necesario por varios motivos:

Previene la autoinflamación o autoencendido de gases o combustibles, pues las altas temperaturas de compresión pueden alcanzar fácilmente la temperatura de autoinflamación de la mezcla con lo cual se puede presentar el preencendido o la detonación.

Aumenta la densidad del gas y con ello de la mezcla, aumentando así la eficiencia volumétrica y así permitir que entre el máximo de gas combustible en el cilindro del motor durante la carrera de admisión.

Contribuye a la depuración del syngas, evitando la condensación de la humedad contenida en el gas producido al momento de mezclarse con el aire y antes de entrar en el motor.

Comúnmente se emplean intercambiadores de calor que suelen ser tubos de refrigeración con alta superficie de transferencia de calor, el fluido a emplearse puede ser aire empleando conceptos de convección forzada o agua [8].

1.4. Clasificación de motores a combustible gaseoso

Se procederá a describir este tipo de motor debido a que permite informarnos sobre el funcionamiento de estos motores de manera general para luego analizar su factibilidad

empleando gas resultante del proceso de gasificación para la transformación de energía mecánica a energía eléctrica mediante un generador.

Los motores a gas pueden clasificarse en cuatro clases, las cuales pertenecen a los tipos de motores presentados en la tabla 1: Motor de gas encendido por chispa, Motores duales o mixtos, motores diésel de gas y motores a gas de gran compresión y encendido por chispa.

- Motor de gas encendido por chispa

  La mezcla admitida es cercana a la estequiométrica[8] propagando la llama rápidamente en la mezcla.

  Posee relaciones volumétricas de compresión bajas, las cuales evitan autoencendido de la mezcla.

  El gas natural presenta elevadas temperaturas de autoinflamación, por lo tanto, soporta relaciones volumétricas de compresión mayores.

- Motores duales o mixtos

  La mezcla de gas y aire se comprime hasta una presión propia de los motores Diesel y el autoencendido se evita empleando mezclas pobres.

  Para asegurar la continuidad de la propagación de la llama, se hace necesario encender la mezcla en varias regiones a la vez.

  Se suele inyectar una pequeña cantidad piloto de aceite combustible sobre la mezcla pobre a alta presión y temperatura para generar puntos de encendido.

  Se diferencian de los motores Diesel convencionales en los siguientes sistemas: regulación de la mezcla en el sistema de regulación de caudal de aire para funcionamiento a carga parcial, sistema de inyección de combustible auxiliar y el sistema de gobierno.

- Motores Diesel de gas

  Similar al motor Diesel convencional, solo participa aire en la compresión y el combustible se inyecta a presión.

  El combustible gaseoso no se inflama al contacto con el aire a alta temperatura.

  Se inyecta un combustible líquido auxiliar junto con el gaseoso para iniciar el encendido de la mezcla.

  El combustible líquido auxiliar será, aproximadamente, el 5% del combustible requerido a plena carga.

[8] Proporción ideal de aire combustible en un motor de combustión interna.

- Motores a gas de gran compresión y encendido por chispa

  Para el encendido de la mezcla pobre gas-aire, se reemplaza la inyección piloto del combustible auxiliar por una chispa eléctrica.

  Se hace necesario usar un sistema eléctrico de alta tensión (de 25000 a 30000 voltios) con bujías blindadas, dotadas de resistencias para impedir la combustión de los electrodos y refrigeradas para evitar el preencendido.

  Son sobrealimentados y necesariamente tiene un sistema de regulación automático de caudal de aire para el funcionamiento a carga reducida [8].

1.5. Viabilidad del uso de gas de gasificación en motores

Es posible el funcionamiento de los motores de encendido por chispa, normalmente, utilizados con gasolina, empleando gas pobre únicamente. En la figura 4 se da a conocer el proceso completo de gasificación y obtención de energía eléctrica.

Los motores Diesel se pueden adaptar para funcionar con gas pobre disminuyendo el índice de compresión e instalando un sistema de encendido por chispa. Otra posibilidad es hacer funcionar un motor Diesel normal, sin modificar, con el sistema de "doble combustible", este sistema permitirá generar del 0 al 90% por ciento de potencia, a base de gas pobre, siendo necesario el resto de diesel para el encendido de la mezcla combustible gas/aire. La ventaja de este último sistema está en su flexibilidad: ante la falta de combustible de biomasa o mal funcionamiento del gasificador, generalmente, es posible un cambio inmediato, operando totalmente con diesel.

No obstante, no todos los tipos de motores Diesel pueden adaptarse al sistema funcionamiento expuesto. Los índices de compresión de los motores Diesel con antecámara[9] y cámara de turbulencia, son demasiado elevados para un funcionamiento adecuado con doble combustible y el empleo del gas pobre en tales motores origina detonaciones, ocasionadas por presiones demasiado altas y el retraso del encendido. Los motores Diesel de inyección directa tienen menores índices de compresión y pueden, generalmente, transformarse con éxito [10].

1.5.1. Potencia de un motor empleando gas de gasificación

La potencia de un motor que funciona con gas pobre vendrá determinada por los mismos factores que en el caso de los motores que funcionan con combustibles líquidos, es decir:

- El poder calorífico de la mezcla, gas pobre y aire, que entra en el motor en cada ciclo de combustión.

- La cantidad de mezcla de combustible que ingresa en el motor durante cada ciclo de combustión.

[9] Hendidura realizada en la parte posterior de la cámara de compresión donde entrará el aire a gran presión y seguidamente se le inyectará el gasóleo.

- La eficiencia con que el motor transforma la energía térmica de la mezcla combustible en energía mecánica (potencia en el eje).

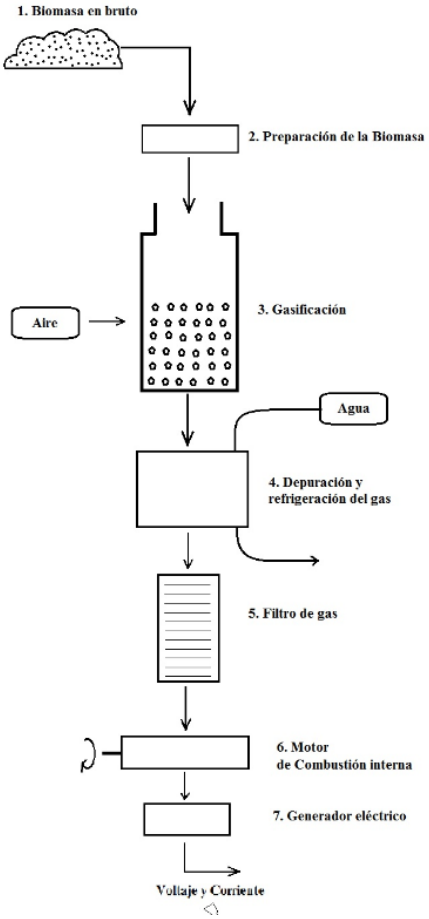


Figura 4. Proceso completo gasificación-obtención de energía eléctrica.
Fuente: Elaboración propia

La adaptación de un motor para funcionar con gas pobre o con doble combustible lleva, generalmente, a una reducción de la potencia. A continuación se analizan las razones:

- Poder calorífico de la mezcla.

Depende de las cantidades relativas de los distintos componentes de los combustibles (monóxido de carbono, hidrógeno y metano), y es necesario que existan las cantidades de oxígeno necesarias para una combustión completa.

El poder calorífico del gas pobre y de las mezclas con aire son alrededor de 2 500 kJ/m³. Cuando se compara este valor con el valor calorífico de una mezcla estequiométrica de gasolina y aire (alrededor de 3 800 kJ/m³), resulta evidente la diferencia de potencia de salida entre un motor determinado alimentado con gasolina y con gas pobre.

- Cantidad de mezcla combustible suministrada al cilindro.

La cantidad de mezcla combustible que entra realmente en el cilindro de un motor viene determinada por el volumen del cilindro y la presión del gas en éste al momento del cierre de la válvula de entrada.

La presión del gas en la tubuladura de admisión de aire depende de la caída de presión en todo el sistema de gasificación, es decir, gasificador, refrigerador/depurador y carburador gas/aire.

Esta caída reduce de nuevo la presión de entrada con un factor de 0,9. En resumen, hay que llegar a la conclusión de que la cantidad real de gas combustible disponible en el cilindro será sólo del 0,65 al 0,80 del valor máximo teórico, debido a las pérdidas de presión en el recorrido hasta el cilindro. Esto reducirá lógicamente la potencia máxima de salida del motor.

Las mezclas de gas pobre y aire presentan unos números de octanos[10] superiores a los de las mezclas de gasolina y aire. Por lo tanto, es posible emplear unos índices de compresión superiores (hasta 1:11) con el gas pobre. La figura 5 muestra la influencia del índice de compresión frente a la eficiencia térmica del motor.

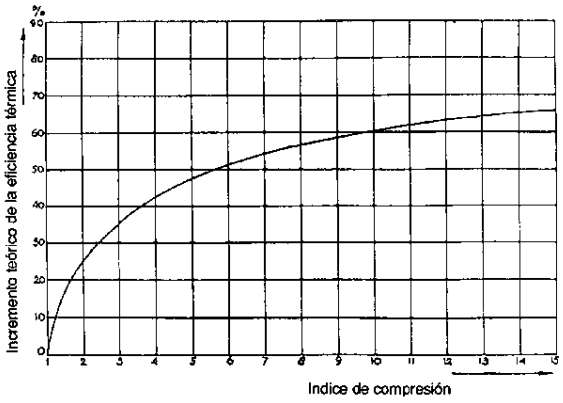


Figura 5. Relación entre el índice de compresión y la eficiencia térmica de un motor.
Fuente: "El gas de madera como combustible para motores", FAO 1993

- Velocidad del motor.

La velocidad máxima de los motores alimentados con gas pobre viene limitada por la velocidad de combustión de la mezcla combustible de gas pobre y aire. Como esta velocidad es baja, en comparación con las mezclas combustibles de gasolina y aire, la eficiencia del motor puede reducirse demasiado si la velocidad de combustión de la mezcla y la velocidad media del pistón se hacen del mismo orden de magnitud.

En los tipos de motores que se producen actualmente en serie, cabe esperar que este fenómeno se produzca a velocidades del motor de alrededor de 2 500 rpm. Los motores alimentados con gas pobre suelen funcionar, generalmente, por debajo de esta velocidad [10].

[10] Escala que mide la capacidad antidetonante del carburante cuando se comprime dentro del cilindro de un motor.

1.5.2. Eficiencia de un motor empleando gas de gasificación

Para una misma relación volumétrica de compresión, es más eficiente un motor de encendido por chispa que un motor de encendido por compresión y por lo tanto un motor dual o mixto teóricamente es más eficiente mientras mayor sea la relación de combustible gaseoso a combustible líquido auxiliar utilizado.

En la práctica, hay otro aspecto que influye de forma importante en el valor de eficiencia del motor y es el de la eficiencia de la combustión, pues si la combustión es incompleta o se presenta autoinflamación, la eficiencia se reduce significativamente. Para garantizar la buena combustión, además de fijar una relación aire /combustible apropiada para la relación volumétrica de compresión y la velocidad del motor, es muy importante controlar el mecanismo de formación de la mezcla, pues si la mezcla no es homogénea, las zonas extremadamente pobres no entrarán en combustión (saliendo combustible sin reaccionar) y las zonas ricas se auto inflamarán (causando pérdidas térmicas importantes), y por lo tanto la eficiencia real del motor disminuye considerablemente.

La eficiencia real de los motores de encendido por chispa trabajando con gas de gasificación es menor del 30%, por las bajas relaciones volumétricas de compresión utilizadas, a diferencia de los motores duales donde la eficiencia alcanza el 35%.

Para lograr un mejor aprovechamiento del gas pobre, una alternativa es usar motores de cogeneración, donde además de la potencia mecánica o potencia eléctrica generada, se pueda extraer energía térmica. A continuación las figuras 6 y 7 se muestran un balance de energía para el caso de los motores duales o mixtos y para los motores de encendido por chispa trabajando con gas pobre [8].

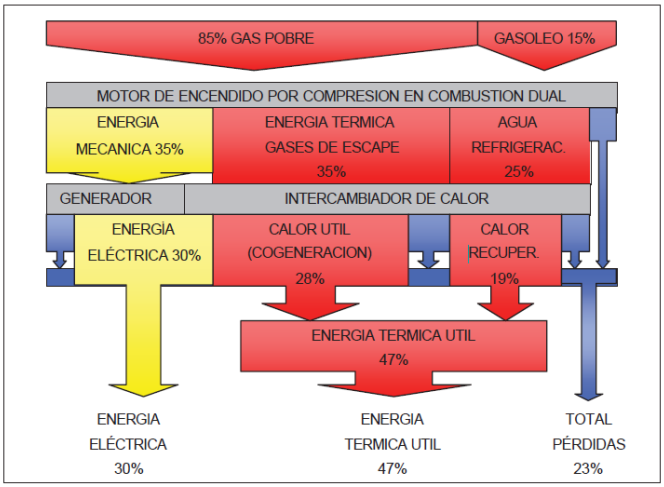


Figura 6. Balance de energía de un motor de gas-Dual trabajando con gas pobre.
Fuente: Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas-CIEMAT.

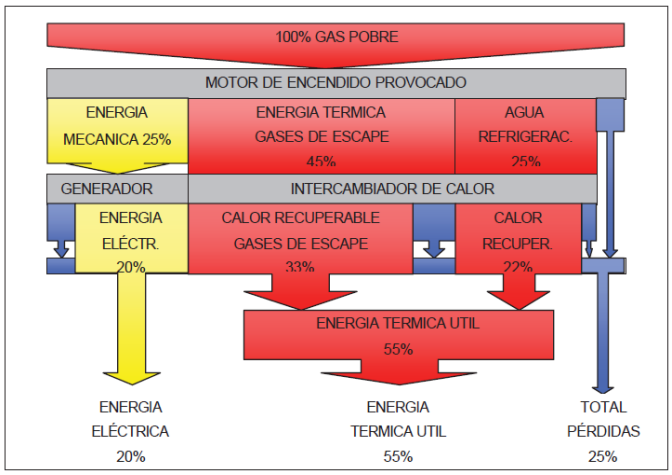


Figura 7. Balance de energía de un motor de encendido por chispa trabajando con gas pobre.
Fuente: Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas-CIEMAT.

1.6. Investigaciones sobre uso del gas de gasificación en moto-generadores

1.6.1. Investigación casa Deutz

Una investigación empírica realizada sobre motores de encendido provocado de baja compresión empleando gas de gasificación fue realizada en los años 1828 y 1830 por el Dr.Ing. Adolf Schnürle [11].

La investigación empleó un motor horizontal Klöckner-Humboldt-Deutz de encendido por chispa a baja tensión, el cual contaba con un cilindro de 410 mm de diámetro y 600 mm de desplazamiento, 215 rpm de velocidad constante, una relación volumétrica de compresión de 7:1.

El GG empleado tenía una composición de 19.8% CO, 18.7% H2, 1.3% CH4, 1.2% O2, 9.6% CO2 y 49.4% N2 y un poder calorífico de 5024 kJ/m3. La cantidad de aire requerida para la combustión estequiométrica fue de 0,98 m^3/m^3 de GG.

1.6.1.1. Influencia de la composición de la mezcla

Durante la investigación se ensayaron mezclas y llenados no sólo en la zona de trabajo normal, sino fuera de ella, forzando el motor hasta sus límites de funcionamiento, tanto en la zona de mezclas ricas como en la de mezclas pobres.

La potencia máxima obtenida corresponde a una presión media efectiva de 5,6 kg/cm^2 y se alcanzó para el máximo rendimiento volumétrico posible, η_v= 0,8, y para una mezcla un poco pobre (Exceso de aire, λ=1,11), no se alcanzó con mezcla estequiométrica, debido a que no todo el gas alcanza a reaccionar.

Se obtuvo también que con un gran exceso de aire, el consumo de gas para esta potencia es el más favorable. La causa reside en que la temperatura de combustión

disminuye por el exceso de aire, haciendo que las pérdidas de calor por transmisión decrezcan igualmente.

1.6.1.2. Influencia de la relación volumétrica de compresión

Se logró demostrar que el rendimiento del motor aumenta con la relación volumétrica de compresión, pero se determinó empíricamente que la relación volumétrica de compresión máxima posible para trabajar con seguridad el motor con syngas era de 7:1, correspondiente a una presión final de compresión de 12 kg/cm^2, aunque se lograron realizar pruebas hasta una relación de compresión de 10:1. Las más altas relaciones volumétricas de compresión presentaron problemas de autoencendido de la mezcla y un funcionamiento inestable.

1.6.1.3. Influencia del poder calorífico del gas de gasificación

La composición y la potencia calorífica del syngas dependen del tipo de agente de gasificación, del combustible empleado y gasificador. Se ensayaron tres gases pobres con diferentes poderes caloríficos desde 2847 kJ/m^3 hasta 5024 kJ/m^3, obteniendo los siguientes resultados:

- Mientras menor sea el poder calorífico del gas, es necesario aumentar el avance del encendido, porque la velocidad de combustión disminuye. Al realizar esto presión máxima de combustión disminuye.

- Cuando un motor funciona con gas de poco poder calorífico, la potencia del motor se puede aumentar elevando su relación volumétrica de compresión.

1.6.1.4. Influencia de la composición del gas de gasificación

Se demostró que los compuestos que más influencia tienen en el gas de gasificación son el hidrógeno y el metano:

- Cuando se aumenta el contenido de hidrógeno del syngas se observa un aumento de la presión máxima de combustión y una tendencia mayor a la autoinflamación. Esto se debe, principalmente, al aumento de la velocidad de combustión de la mezcla.

- Cuando se aumenta el contenido de metano, la tendencia a la autoinflamación es menor debido a que el metano tiene una mayor temperatura de inflamación y menor velocidad de combustión

Además, se observó que la temperatura de encendido, no disminuye al aumentar el contenido de hidrógeno ni al disminuir el coeficiente de exceso de aire. Entonces, se concluyó que para contrarrestar el aumento de la velocidad de encendido al aumentar el contenido de hidrógeno en el gas de gasificación es necesario disminuir el avance al encendido.

1.6.2. Investigación en BEELab-Italia

El laboratorio The Bio-Energy Efficiency Laboratory –BEELab (Italia) realizó un ensayo experimental, en el cual se empleó un motor Diesel Fiat Power Train (FPT) de 4,5

litros, los ensayos experimentales se realizaron en una instalación de gasificador de lecho fijo utilizando madera como biomasa.

El objetivo de ese estudio fue comparar los resultados de un modelo matemático de un motor Diesel convertido con los resultados obtenidos en un ensayo experimental.

El modelo calcula la potencia máxima de salida del motor a diferentes rpm a partir de la composición de gas de síntesis, la temperatura de la mezcla y la potencia nominal del Diesel.

Los métodos de evaluación que utilizaron permitieron alcanzar un buen nivel de caracterización de la planta.

Se llegó a validar su modelo comparando las medidas calculadas con el ensayo, las cuales llegaron a ser similares confirmando la validez del modelo. Se afirma también que la conversión a syngas reduce la potencia máxima del motor y la potencia eléctrica del generador.

De 49,7 kW pasaron a aproximadamente 22 kW como resultado del menor poder calorífico y densidad de la mezcla aire-gas de síntesis comparado con la mezcla Diesel-aire. Sin embargo, observaron que la eficiencia mecánica del motor es comparable utilizando gas de síntesis o Diesel (alrededor del 30%) y las emisiones de contaminantes son mucho más bajas con gas de síntesis [12].

1.6.3. Investigación de un motor Diesel dual

En Italia se realizó una investigación experimental acerca de un motor Diesel parcialmente alimentado por syngas, el objetivo planteado en su trabajo fue explorar el potencial automotor de un motor Diesel funcionando con combustible diesel y gas de síntesis, mediante una exhaustiva investigación experimental centrado en el proceso de combustión.

Según los parámetros establecidos y considerando tres cargas diferentes (50-100-300 N-m / 16-31-94 kW) concluyeron que, para cada condición de funcionamiento, la tasa de Syngas progresivamente aumentó, mientras que contemporáneamente se redujo la cantidad de gasóleo.

El syngas lo obtuvieron continuamente de un gasificador, el cual estuvo conectado al motor.

Una tasa de sustitución de combustible Diesel del 60% se alcanza a 50 Nm. Además se prestó especial atención a los parámetros de control del motor (presión de refuerzo, la inyección del combustible, etcétera), para poder garantizar una combustión en óptimas condiciones, incluso con altas tasas de gas de síntesis.

Observaron que las trazas de presión en el cilindro no presentan variaciones significativas, incluso cuando se reduce drásticamente la cantidad de diesel. Esto fue un resultado muy alentador, porque demostraron que no hay necesidad de modificar radicalmente el diseño del motor estándar.

Otro resultado que obtuvieron es la ligera, pero consistente mejora del rendimiento del freno del motor (hasta + 5%, con 27% de tasa de sustitución). El cual se explica por una combustión más rápida del gasóleo sintético en comparación con el combustible diesel normal.

Lograron concluir que el uso de gas de síntesis no sólo reduce el consumo de gasóleo, si no también mejora la calidad de la combustión y se requiere una mayor investigación para cubrir todas las aplicaciones a nivel industrial de este concepto de combustión de gas de síntesis, en particular el impacto sobre las emisiones contaminantes y sobre durabilidad [13]. Los resultados generales del estudio se muestran en las figuras 8 y 9.

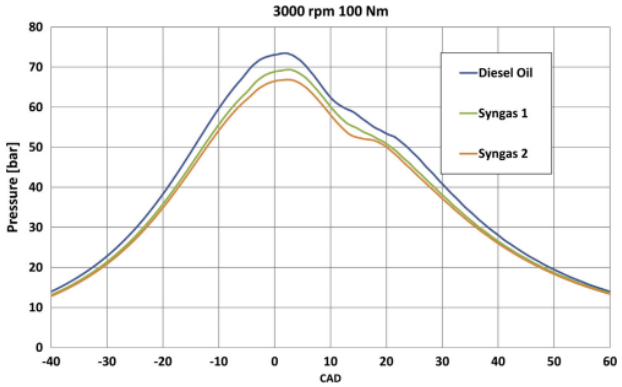


Figura 8. Presión en los cilindros(bar) en función de ángulos del cigueñal a 10 Nm.
Fuente: Experimental investigation on a Common Rail Diesel engine partially fuelled by syngas, 2016

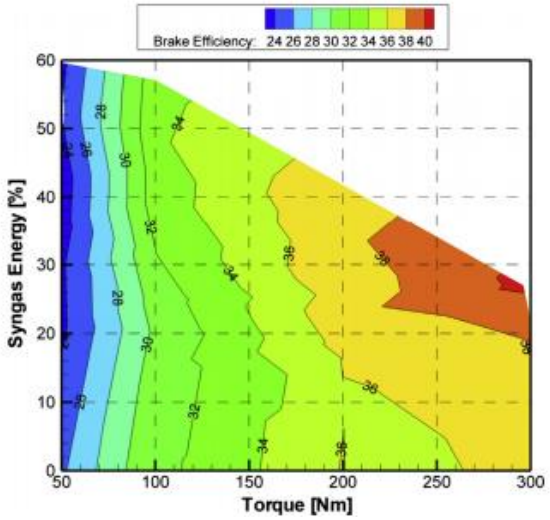


Figura 9. Eficiencia al freno del motor en función de la energía del syngas y la carga del motor.
Fuente: Experimental investigation on a Common Rail Diesel engine partially fuelled by syngas, 2016

Capítulo 2

Cálculos y análisis de moto-generador utilizando Syngas

En el siguiente capítulo se pretende caracterizar el syngas según los componentes que presente y evaluar la producción de potencia empleando un sistema moto-generador que utiliza syngas como combustible.

2.1. Justificación de la tecnología

Como muestra la tabla 5 con lo que respecta a generación de energía eléctrica a partir del gas pobre obtenido de la gasificación, la tecnología más factible económicamente y de fácil accesibilidad en el país son los motores de combustión interna (MCI).

Tabla 5. Indicadores de las tecnologías para la generación de electricidad a partir de la gasificación de la biomasa.

Tecnología	Eficiencia	Costo
	%	USS/kW
Gasificador/ MCI	25-30	900-1500
Gasificador/Motor Stirling	13-16	1120-3000
Gasificador/Microturbinas a gas	25-30	1500-1600
Gasificador/Células de Combustible	40-55	3000-4000

Fuente: "Implementación de combustibles en Brasil" – Electo Eduardo Silva Lora.

En la generación de energía eléctrica a partir del gas de síntesis, los motores a gas presentan ciertas ventajas y desventajas:

Ventajas:
- Son robustos.
- Aceptan gases con un contenido elevado de alquitranes.
- Fácil arranque y parada.

Desventajas:
- Baja eficiencia térmica.
- Altas emisiones.

- El funcionamiento, generalmente, está por debajo de 2500 rpm.

Las aplicaciones comerciales de la tecnología se localizan en un rango de potencia menor de 1 MW. Los motores utilizados pueden ser Otto o Diesel. En los motores Otto el gas pobre puede sustituir el 100% del combustible.

La principal modificación a realizar consiste en el atraso del tiempo de ignición a fin de lograr que la presión máxima de combustión se alcance entre 10 y 12 grados del punto muerto superior y con ello mejores desempeños del motor.

Los motores Diesel operan a mayores relaciones volumétricas de compresión, su operación con gas pobre debe ser dual (sustitución de hasta el 85% del Diesel).

La ventaja radica en su flexibilidad, en caso de un mal funcionamiento del gasificador es posible un cambio inmediato de combustible, operando el motor totalmente con Diesel. Cuando se quiere utilizar un motor Diesel con gas pobre (100%) hay que implementar un mezclador y un sistema de ignición por chispa y modificarse el ángulo de avance de la ignición [14].

2.2 Caracterización del gas de síntesis

2.1.1. Componentes del gas de gasificación

Según datos obtenidos mediante pruebas de laboratorio se obtienen distintos valores en las composiciones dependiendo del tipo de biomasa como se puede verificar en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Análisis elemental de las hojas de caña de azúcar.

Análisis Elemental			
	%	Base seca	Método
Carbono	%	45.8	ASTM D3178
Hidrógeno	%	5.74	ASTM D3178
Azufre	%	0.27	ASTM D3177,met B
Nitrógeno	%	0.22	ASTM D3179
Cenizas	%	6.7	ASTM D3174
Oxigeno por diferencia	%	41.3	----------
Cloro	%	0.29	ASTM D2361

Fuente: Centro de Consultoría y Servicios Integrados de la Pontificia Universidad Católica del Perú (INNOVAPUCP).

Tabla 7. Análisis elemental del bagazo de caña de azúcar.

Análisis Elemental		
	%	Base seca
Carbono	%	43.48
Hidrógeno	%	5.1
Azufre	%	0.1
Nitrógeno	%	0.85
Cenizas	%	5.41
Oxigeno por diferencia	%	29.03
Cloro	%	0.19

Fuente: "Caracterización del Gas de Síntesis" – Colombia.

Los componentes del gas de síntesis empleando la hoja de caña de azúcar se obtuvieron de un estudio realizado en el año 2015 por Jorge Estremadoyro [15] en la Universidad de Piura. El estudio se realizó con ayuda del software CEA (Chemical Equilibrium) por medio del cual se calcularon los productos teóricos aproximados después del proceso termoquímico de gasificación, a partir del análisis elemental (tabla 8).

Tabla 8. Caracterización química del syngas empleando hojas de caña.

Componente	Fórmula	%vol. base seca
Metano	CH_4	1.77
Monóxido de Carbono	CO	15.51
Hidrógeno	H_2	23.45
Dióxido de Carbono	CO_2	14.43
Nitrógeno	N_2	37.71
Otros componentes : $H_2O, C(gr)$		

Fuente: "Análisis de Factibilidad para Producción de Energía Utilizando un Gasificador de Hojas de Caña de Azucar"- Jorge Estremadoyro. Elaboración propia

Los valores de los componentes del gas de síntesis empleando bagazo se obtuvieron de una investigación realizada en Colombia [16].

Tabla 9. Caracterización química del syngas empleando bagazo de caña.

Componente	Fórmula	%vol. base seca
Metano	CH_4	4.62
Monóxido de Carbono	CO	15.31
Hidrógeno	H_2	15.58
Dióxido de Carbono	CO_2	15.33
Nitrógeno	N_2	44.23
Otros componentes : H_2O, SO_2, C_6H_8, O_2		

Fuente: "Caracterización del Gas de Síntesis" – Colombia**.** Elaboración propia

Respecto a los componentes del gas de síntesis se han tomado en cuenta los de mayor influencia en las propiedades de la mezcla y los elementos que se encuentren en mayor proporción, los cuales servirán para los cálculos posteriores.

2.1.2. Relación aire-combustible en la combustión

Se empleará el término "mezcla" para referirse al conjunto de gases que ingresarán a la cámara de combustión del motor, en este caso ingresará el gas de gasificación junto con una proporción de aire.

Se procederá a evaluar y determinar la relación aire-combustible teórica requerida para realizar la combustión. La cual expresa la cantidad, en volumen o en masa, de aire aspirado por un motor de combustión para una cantidad unitaria de combustible.

En la tabla 10 se muestran los componentes del gas de gasificación, así como los valores de aire teórico necesario para la combustión de cada componente

Tabla 10. Relación de aire-combustible para combustión estequiométrica del gas de gasificación empleando bagazo de caña.

Componente	Fórmula	%vol	$O_2(m^3)$ /componente(m^3)	Aire(m^3)/ $O_2(m^3)$	Aire(m^3)/ componente (m^3)
Metano	CH_4	4.62	2	4.76	0.4398
Monóxido de Carbono	CO	15.31	0.5	4.76	0.3644
Hidrógeno	H_2	15.58	0.5	4.76	0.3708
Dióxido de Carbono	CO_2	15.33	-	4.76	-
Nitrógeno	N_2	44.23	-	4.76	-
m^3de aire /m^3gas				$(ra_{/c})_t$	1.175

Fuente: Elaboración propia.

La relación aire-combustible teórica o estequiométrica en este caso se halla de la siguiente forma:

$$(ra_{/c})_t = 4.76 \sum \frac{\%\text{vol}}{100} * \frac{m^3 de\ O_2}{m^3\ de\ componente} \left[\frac{m^3\text{de aire}}{m^3\text{de combustible}}\right] \quad (2.1)$$

La tabla 11 muestra los resultados obtenidos de la relación aire-combustible teórica para los dos tipos de biomasa gasificadas.

Tabla 11. Relación aire-combustible teórica según la biomasa utilizada.

Biomasa Utilizada	Relación aire-combustible teórica (m^3de aire /m^3gas)
Bagazo de caña	1.175
Hoja de caña	1.096

Fuente: Elaboración propia

Es posible calcular la relación aire-combustible en masa (kg de aire/kg de combustible) realizando ecuaciones químicas de combustión.

Suponiendo que la reacción es estequiométrica y se toman en cuenta los componentes presentes en mayor cantidad se reduce a:

$$vol_{CH_4}\, CH_4 + vol_{CO} CO + vol_{H_2} H_2 + vol_{N_2} N_2 + vol_{CO_2} CO_2 + a_t[O_2 + 3.74N_2] \rightarrow xCO_2 + yH_2O + zN_2 \quad (2.2)$$

Donde:

vol_{CH_4}: Contenido volumétrico de metano.
vol_{CO}: Contenido volumétrico de monóxido de carbono.
vol_{H_2}: Contenido volumétrico de hidrógeno.
vol_{N_2}: Contenido volumétrico de nitrógeno.
vol_{CO_2}: Contenido volumétrico de dióxido de carbono.
a_t: Aire teórico.
x, y, z: Variables.

2.1.3. Poder calorífico de la mezcla

El poder calorífico de un combustible se puede definir como la cantidad de calor producida, o generada, por la combustión completa de un kilogramo de combustible en cuestión, suponiendo que los productos de la combustión se enfrían hasta la temperatura inicial de los reactivos [17].

Con respecto al poder calorífico de la mezcla se puede afirmar que depende directamente de las cantidades relativas de los diferentes componentes combustibles como: monóxido de carbono, hidrógeno y metano.

El poder calorífico de la mezcla (gas de síntesis / aire), depende del poder calorífico del gas de síntesis y de la relación aire / combustible empleado [8]. En las tablas 12, 13, 14 y 15 se halla el poder calorífico inferior del gas de gasificación empleando bagazo u hoja de caña de azúcar y de sus mezclas estequiométricas aire-gas.

Tabla 12. Poder calorífico del gas de gasificación empleando bagazo de caña.

Componente	Fórmula	Contenido (%vol)	Poder Calorífico (kJ/m^3)	Poder Calorífico Contenido
Metano	CH_4	4.62	35825	1655.115
Monóxido de Carbono	CO	15.31	12655	1937.481
Hidrógeno	H_2	15.58	10770	1677.966
Dióxido de Carbono	CO_2	15.33	-	-
Nitrógeno	N_2	44.23	-	-
Poder Calorífico Total (kJ/m^3)			PCI_g	5270.562

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Poder calorífico inferior del gas de síntesis según biomasa utilizada.

Biomasa Utilizada	Poder Calorífico Inferior (kJ/m^3)
Bagazo de caña	5270.562
Hoja de caña	5122.458

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Poder calorífico de la mezcla estequiométrica aire-gas de gasificación.

Datos	Nomenclatura	Unidad	Valores
Poder Calorífico del gas	PCI_g	kJ/m^3	5270.560
m^{3}de gas	m_f	m^3	1
m^{3}de aire/m^3 de gas estequiométrica	$ra_{/c}$	m^3/m^3	1.175
m^{3}de mezcla/m^{3}de gas estequiométrica	$1+ra_{/c}$	m^3/m^3	2.175
Poder Calorífico de la mezcla estequiométrica (H_m)		kJ/m^3	2423.246

Fuente: Elaboración propia.

Según Fonseca Gonzales [8], la ecuación empleada para el cálculo del poder calorífico de la mezcla

$$H_m = \frac{H_c}{1 + L_o * \lambda} \quad \left[\frac{kJ}{m^3}\right] \tag{2.3}$$

La variable λ indica el índice de exceso de aire, el cual relaciona la relación aire-combustible real con la teórica.

En este caso se asumirá la mezcla aire-combustible estequiométrica para hallar su poder calorífico.

Tabla 15. Poder calorífico de la mezcla estequiométrica según biomasa utilizada.

Biomasa Utilizada	Poder Calorífico de la Mezcla Estequiométrica (kJ/m^3)
Bagazo de caña	2423.246
Hoja de caña	2443.921

Fuente: Elaboración propia.

Otra manera de calcular el poder calorífico aproximado de la mezcla estequiométrica es tomando en cuenta las recomendaciones de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) [10] . La ecuación se presenta como una forma abreviada del procedimiento anterior, obteniendo resultados similares.

$$H_V = \frac{12655\, V_{co} + 10770\, V_{H_2} + 35825\, V_{CH_4}}{1 + 2.38\, V_{co} + 2.38\, V_{H_2} + 9.52\, V_{CH_4}} \quad \left[\frac{kJ}{m^3}\right] \tag{2.4}$$

Donde:
H_V: Poder calorífico de una mezcla estequiométrica de gas pobre y aire.
V_{co}: Fracción de volumen de monóxido de carbono en el gas antes de mezclarlo con el aire.
V_{H_2}: Fracción de volumen de hidrógeno en el gas antes de mezclarlo con aire.
V_{CH_4}: Fracción de volumen de metano en el gas antes de mezclarlo con aire.

2.1.3. Número de metano

El número de metano es un indicador de los combustibles gaseosos que mide su tendencia a la detonación, mientras mayor sea su valor, menor la tendencia. Existe una escala denominada número de metano (NM) que utiliza como referencia el metano puro (NM = 100) y el hidrógeno (NM = 0) que valora la aplicabilidad del gas en los motores, considerándose un valor entre 75-80 como satisfactorio.

Influencia de los diferentes componentes en el número de metano (para los combustibles gaseosos convencionales) [8]:

- Metano – CH_4: como componente esencial de los gases combustibles usuales para los motores, en especial, en los diversos gases naturales o de petróleo.

- Hidrógeno – H_2: reduce considerablemente el índice de metano de las mezclas gaseosas. Se encuentra ante todo en gases combustibles como gases de coquería, de alto horno, así como en gases de destilación lenta.

- Hidrocarburos mayores – *CnHm* con *n*>1 y *m*>4, es decir, hidrocarburos superiores al metano, los que a veces son muy inestables y, por lo tanto, tienen una fuerte tendencia a detonar.

- Inertes – N_2 y CO_2 – que no participan activamente en la combustión, pero que incrementan el índice de metano en una mezcla de gases. El CO_2 lo hace con un efecto tres veces superior al del N_2.

La bibliografía [18] emplea una fórmula que relaciona el número de octanos al número de metano.

$$MON = 84.9 + 0.37(MN) \qquad (2.5)$$

2.2. Cálculos aproximados

2.2.1. Ecuaciones

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) [10] resume una forma práctica de hallar, aproximadamente, la potencia eléctrica estimada de salida, pero depende directamente de los parámetros del motor a utilizar.

2.2.1.1. Consumo estimado de combustible

Consumo estimado de mezcla.

$$V_{total} = \frac{\pi D^2}{4} * C * z$$

$$\dot{V}_{total} = \frac{n * V_{total}}{\varepsilon} \qquad \left[\frac{m^3}{s}\right] \tag{2.6}$$

Donde:

n: Velocidad de rotación promedio del motor (rev/s)

V_{total}: Cilindrada total del motor (m^3)

ε: Número de ciclos por cada carrera de admisión (2 para motor de 4 tiempos y 1 para motor de 2 tiempos).

- Consumo estimado del gas combustible

$$\dot{V}_{total} = \dot{V}_{aire} + \dot{V}_{combustible}$$

$$\dot{V}_{combustible} = \frac{\dot{V}_{total}}{(1 + (ra_{/c})_t)} \qquad \left[\frac{m^3}{s}\right] \tag{2.7}$$

Donde:

$(ra_{/c})_t$: Relación aire-combustible teórica (m^3aire/m^3combustible)

La FAO considera un coeficiente aire/gas (estequiométrica): 1,1: 1,0

- Consumo real del gas combustible

$$\dot{V}_{cmax} = \dot{V}_{combustible} * \eta_v \qquad \left[\frac{m^3}{s}\right] \tag{2.8}$$

Donde:

η_v : Eficiencia volumétrica del motor.

La eficiencia volumétrica (%) del motor depende de los siguientes parámetros: velocidad de rotación del motor (RPM), diseño del colector múltiple de admisión y

suciedad del filtro de aire del motor. FAO considera que a 1500 rpm, un correcto diseño de la entrada de aire y baja suciedad una eficiencia volumétrica del 80%.

2.2.1.2. Potencia esperada

- Potencia térmica del gas

$$\dot{W}_t = \dot{V}_{cmax} * \ PCI_g \qquad [kW] \tag{2.9}$$

FAO estima que el poder calorífico del gas pobre y de las mezclas con aire son alrededor de 2 500 kJ/m³.

- Potencia mecánica del motor

$$\dot{W}_e = \dot{W}_t * \ \eta_g \qquad [kW] \tag{2.10}$$

Donde:

η_g: Eficiencia útil del motor

La eficiencia del motor depende en parte del índice de compresión del motor. Según consideraciones de la FAO para una relación volumétrica de compresión[11] de 9,5:1 la eficiencia puede estimarse en el 28 por ciento.

- Potencia eléctrica generada

$$\dot{W}_{elec} = \dot{W}_e * \ 0.8 \qquad [kW] \tag{2.11}$$

La máxima producción eléctrica (factor de potencia = 0,8).

2.2.2. Valores teóricos obtenidos

En el presente acápite se efectuarán los cálculos aplicando las ecuaciones[12] tomando en cuenta algunos datos de diseño del gasificador de lecho fluidizado burbujeante.

Según la tesis de Ricardo García [19] algunos parámetros obtenidos del diseño del gasificador de lecho fluidizado burbujeante se muestran en la siguiente tabla 16.

[11] Número que permite medir la proporción en volumen, que se ha comprimido la mezcla dentro de la cámara de combustión de un cilindro.

[12] Se refiere a las ecuaciones planteadas en el acápite 2.2.1

Tabla 16. Resultados del dimensionamiento del gasificador.

RESULTADOS		
Parámetro	Comentario	Valor
Flujo volumétrico del gas combustible $\dot{V}_g \left[\frac{Nm^3}{h}\right]$	Flujo teórico de syngas a la salida del reactor	60
Flujo másico de combustible $\dot{m}_c \left[\frac{kg}{h}\right]$	Es la cantidad de biomasa requerida por el proceso en 1 hora para satisfacer la continuidad y flujo de syngas a la salida del reactor	28.96
Relación del flujo de gas combustible y el flujo másico de biomasa consumido $k_{fg} \left[\frac{m^3}{kg\ comb.}\right]$	Refiere al volumen de syngas que un kilogramo de biomasa puede producir	2.357

Fuente: Tesis "Desarrollo de metodología para validación experimental de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante" –Ricardo García

2.2.2.1. Potencia teórica resultante

Para una primera aproximación se tomarán los datos teóricos de la tabla 16.

$$\dot{V}_g = 60\ \frac{m^3}{h} = 0.0167\ \frac{m^3}{s}$$

El flujo volumétrico del gas combustible se asumirá como el consumo máximo de combustible. Limitando así el consumo de combustible que puede tener el motor.

$$\dot{V}_{combustible} = \dot{V}_g$$

Tomando en cuenta las recomendaciones de la FAO para la ecuación (2.8): considerando que el motor gira a una velocidad de 1500 rpm y una eficiencia volumétrica del 80%. Se obtiene el consumo real del gas combustible.

$$\dot{V}_{cmax} = 0.01336\ \frac{m^3}{s}$$

Para poder hallar la potencia térmica del gas combustible se tomarán los valores de la tabla 13, en donde se indica el poder calorífico del gas combustible. Reemplazando en la ecuación (2.9)

- Empleando bagazo de caña como biomasa

$$\dot{W}_t = 70.41\ kW$$

- Empleando hoja de caña como biomasa

$$\dot{W}_t = 68.44\ kW$$

La potencia mecánica del motor quedará definida como: la potencia térmica disponible ya hallada afectada por la eficiencia útil del motor. En la tabla 17 se puede ver los rangos de eficiencia para grupos móviles según la razón de compresión (r_k).

Tabla 17. Parámetros característicos de motores típicos para diferentes campos de aplicación.

Tipo de motor	$n(rev/s)$	$D(mm)$	r_k	$\eta_g(\%)$
Motocicletas				
Motor Otto de 2 tiempos	120 - 160	45 - 70	10 - 15	20 - 25
Motor Otto de 4 tiempos	100 - 160	50 - 80	9 - 11	25 - 30
Grupos móviles				
Motor Otto de 2 tiempos	100 - 140	40 - 70	8 - 12	20 - 28
Motor Diesel de 4 tiempos	70 - 80	70-90	18 - 21	30 - 35
Automóviles				
Motor Otto de 4 tiempos	90 - 110	70 - 100	9 - 11	28 - 36
Motor Diesel de 4 tiempos	70 - 80	80 - 100	20 - 23	30 - 38

Fuente: parámetros característicos – Saavedra García Zabaleta

FAO recomienda puede estimar en el 28% la eficiencia útil del motor.
Reemplazando en la ecuación (2.10) se obtiene:

- Empleando bagazo de caña como biomasa

$$\dot{W}_e = 19.71\ kW$$

- Empleando hoja de caña como biomasa

$$\dot{W}_e = 19.16\ kW$$

La potencia eléctrica generada está afectada por el factor de potencia en este caso se tomará 0.8. Reemplazando en la ecuación (2.11) se determina:

- Empleando bagazo de caña como biomasa

$$\dot{W}_{elec} = 15.77\ kW$$

- Empleando hoja de caña como biomasa

$$\dot{W}_{elec} = 15.33\ kW$$

2.2.2.2. Cilindrada del motor

Tomando en consideración que el flujo volumétrico del gas combustible a la salida del gasificador ya ha sido establecido por sus parámetros de diseño, es posible calcular la cilindrada total máxima del motor.

Partiendo de la ecuación (2.7), asumiendo el flujo volumétrico del gas combustible a la salida del gasificador como el consumo máximo de combustible y utilizando los datos de la relación-aire combustible teórica de la tabla 11.

$$\dot{V}_{combustible} = \dot{V}_g$$

- Empleando bagazo de caña como biomasa

$$\dot{V}_{total} = 0.036\ m^3/s$$

- Empleando hoja de caña como biomasa

$$\dot{V}_{total} = 0.035\ m^3/s$$

La cilindrada total que puede alimentar este flujo volumétrico de combustible depende de las revoluciones del motor y el número de ciclos por cada carrera de admisión. Tomando las recomendaciones dadas por distintas fuentes bibliográficas como la FAO un motor funcionando con gas de síntesis tiene un promedio de revoluciones por minuto de 1500 a 1800.

Reemplazando en la ecuación (2.6) y asumiendo un motor de cuatro tiempos a 1500 revoluciones por minuto.

- Empleando bagazo de caña como biomasa.

$$V_{total} = 2.9\ L$$

- Empleando hoja de caña como biomasa.

$$V_{total} = 2.8\ L$$

A 1800 revoluciones por minuto:

- Empleando bagazo de caña como biomasa.

$$V_{total} = 2.4\ L$$

- Empleando hoja de caña como biomasa.

$$V_{total} = 2.3\ L$$

2.2.3 Análisis del motor dual

Como ya se dio a conocer, en algunos casos se opta por alimentar al motor con dos combustibles diferentes (diesel-syngas) en concentraciones que dependen, directamente,

del motor empleado. Para los cálculos que se realizarán a continuación se empleará diesel como combustible piloto al 15 % y el 85% restante será syngas.

Partiendo de los resultados obtenidos, los siguientes cálculos se desarrollarán tomando los datos de la caracterización del syngas empleando hoja de caña debido a que representa el valor más crítico (menor capacidad) con respecto al syngas de bagazo de caña.

2.2.3.1. Aumentando 15% de diesel

Al aumentar el 15% de diesel en el flujo total de la mezcla, la capacidad del motor que se puede alimentar aumenta, así como la potencia obtenida.

Partiendo de los resultados anteriores, la capacidad máxima del motor que puede ser alimentado a 1800 rpm es 2.3 L.

Empleando la ecuación (2.6) se obtiene el consumo estimado de la mezcla.

$$\dot{V}_{total} = 0.035\ m^3/s$$

Al aumentar el 15 % de combustible de diesel como combustible piloto se obtiene el consumo total de la mezcla.

$$\dot{V}_{total2} = 0.04118\ m^3/s$$

De los cuales, solo el 15 % pertenecerá a la mezcla aire-diesel.

$$\dot{V}_{aire-diesel} = 6.1765 * 10^{-3}\ m^3/s$$

Tomando la relación estequiométrica de aire-diesel como 14.5 en unidades de masa, una densidad del aire en condiciones normales de 1.2 kg/m^3, la densidad del diesel 832 kg/m^3 y una eficiencia volumétrica del 80% . Se obtiene mediante la ecuación (2.7)

$$\dot{V}_{diesel} = 6.1431 * 10^{-7}\ m^3/s$$

Teniendo en cuenta que el poder calorífico inferior del diesel es $35860 * 10^3\ kJ/m^3$ se procederá a hallar el aumento de potencia al aumentar un 15 % de diesel mediante las ecuaciones[13] ya planteadas.

$$\dot{W}_t = 17.6234\ kW$$

$$\dot{W}_e = 4.9346\ kW$$

$$\dot{W}_{elec} = 3.9476\ kW$$

[13] Se refiere a las ecuaciones (2.8), (2.9), (2.10) y (2.11).

Según el resultado obtenido, la potencia adicional al aumentar 15 % de diesel es de 3.2427 kW, entonces la potencia total eléctrica disponible será:

$$\dot{W}_{elec} = 19.2776\ kW$$

La capacidad del motor que se podría alimentar se obtendrá empleando las ecuaciones (2.6) y (2.7).

$$V_{total} = 2.7\ L$$

2.2.3.2. Reemplazando 15 % de diesel

Al reemplazar el 15 % de diesel en el flujo total de la mezcla, se mantendrá constante la capacidad del motor que se puede alimentar, pero se presentará un pequeño aumento en la potencia obtenida.

Para un motor de 2.3 L, girando a 1800 rpm, se tiene un consumo estimado de la mezcla.

$$\dot{V}_{total} = 0.035\ m^3/s$$

Donde el 15 % pertenecerá a la mezcla aire-diesel mientras que el 85 % será para la mezcla aire-syngas.

$$\dot{V}_{aire-diesel} = 5.25 * 10^{-3}\ m^3/s$$

$$\dot{V}_{aire-syngas} = 0.02975\ m^3/s$$

Tomando la relación estequiométrica de aire-diesel como 14.5 en unidades de masa, una densidad del aire en condiciones normales de 1.2 kg/m^3, la densidad del diesel 832 kg/m^3 y una eficiencia volumétrica del 80% . Se obtiene mediante la ecuación (2.7)

$$\dot{V}_{diesel} = 5.2216 * 10^{-7}\ m^3/s$$

Teniendo en cuenta que el poder calorífico inferior del diesel es $35860 * 10^3\ kJ/m^3$ se calculará el aumento de potencia al reemplazar un 15 % de diesel mediante las ecuaciones[14] ya planteadas.

$$\dot{W}_t = 14.9798\ kW$$

$$\dot{W}_e = 4.1943\ kW$$

$$\dot{W}_{elecdiesel} = 3.3555\ kW$$

[14] El cálculo se realizará mediante a las ecuaciones (2.8), (2.9), (2.10) y (2.11)

Teniendo en cuenta que la potencia eléctrica obtenida por el syngas de hoja de caña será el 85% del resultado antes hallado.

$$\dot{W}_{elecsyngas} = 13.03\ kW$$

La potencia eléctrica disponible reemplazando 15% por diesel es:

$$\dot{W}_{elec} = 16.3855\ kW$$

2.2.3 Código Matlab

Con la finalidad de hacer los cálculos más sencillos, se escribió un programa en MATLAB para calcular los parámetros necesarios. Este se presenta a continuación.

```
'Ingresar Valores';
x=input('Ingrese cantidad de Metano =');
y=input('Ingrese cantidad de Monóxido de Carbono =');
z=input('Ingrese cantidad de Dióxido de Carbono =');
w=input('Ingrese cantidad de Hidrogeno =');
v=input('Ingrese cantidad de Nitrógeno =');
Flujo=input('Ingres el flujo Volumétrico a la salida del gasificador
(m3/s) =');
RPM=input('Ingrese las Revoluciones por Minuto Recomendadas =');
'Para funcionamiento dual';
disp('En el caso de funcionamiento dual ingrese el porcentaje de diesel
adicional ');
disp('de lo contrario ingrese el valor 0');
Die=input('Ingrese el porcentaje de diesel =');

%Ecuaciones Planteadas
'Relación aire combustible m3/m3';
CH=x/100*2;
CO=y/100*0.5;
H=w/100*0.5;
Rac=(CO+H+CH)*4.76;
'Comsumo estimado de combustible';
q=(Flujo*(Rac+1));
'Cilindrada del motor';
d=((j*120000)/RPM);
'Poder Calorífico';
PC=((x/100)*35825)+((y/100)*12655)+((w/100)*10770);
'Poder Calorífico de la mezcla';
PC1=((12655*(y/100)+10770*(w/100)+35825*(x/100))/(1+2.38*(y/100)+2.38*(w
/100)+9.52*(x/100)));
'Poder Calorífico de la mezcla total';
PCT=(PC1*((100-Die)/100))+((35860000/(1+10053.33))*(Die/100));
'Potencia mecánica del motor';
p=(Flujo*0.8*PC*0.28);
'Potencia eléctrica';
e=(p*0.8);
'Cálculos para diesel';
sn=(100-Die);
nn=(sn/100);
j=(q/nn);
k=((j*Die)/100);
```

```
Vcomb=(k/(1+10053.33));
Wdie=(0.8*Vcomb*35860000*0.8*0.28);
%Soluciones
format short;
disp('Soluciones');
disp('Relación aire-syngas m3/m3 =');
disp(Rac);
disp('Poder calorífico inferior del syngas (MJ/m3) =');
disp(PC);
disp('Poder calorífico inferior de la mezcla (MJ/m3) =');
disp(PCT);
disp('Cilindrada Aproximada del Motor =');
disp(d);
disp('Potencia Mecánica Estimada (kW)=');
disp(p);
disp('Potencia Eléctrica Estimada (kW) =');
disp(Wdie+e);
```

Capítulo 3

Selección de moto-generador

En este capítulo se procederá a la selección del sistema motor-generador para la producción de potencia eléctrica. Se analizará el comportamiento de los sistemas frente al syngas, se indicarán criterios de selección basados en los resultados obtenidos en el capítulo anterior y recomendaciones de estudios experimentales realizados en otros países.

3.1. Sistema motor-generador

Actualmente, en el mercado, se cuenta con una amplia gama de moto-generadores, los cuales funcionan con distintos tipos de combustible y producen distintas potencias eléctricas, pero para el caso de estudio es necesario tener un sistema, en el cual el motor pueda funcionar empleando gas de síntesis como combustible. Para cumplir este requisito existen opciones, las cuales serán desarrolladas a continuación.

3.1.1. Sistemas moto-generadores sin adaptar

Los sistemas moto-generadores que se pueden emplear para el funcionamiento con gas de gasificación pueden partir de un motor tipo Otto o Diesel, los cuales deben estar sujetos a distintas modificaciones, de tal forma que queden aptos para trabajar con gas de gasificación.

En el caso de un motor tipo Otto se requiere hacer modificaciones en la inyección del combustible. Se requieren una serie de ajustes en el sistema de entrada de aire mezclando simplemente el gas de síntesis con el aire, realizando la mezcla en su camino al colector de admisión. La mezcla correcta de gas de síntesis y aire es de alrededor 1:1 y su tolerancia es grande, es decir, con cantidades aproximadas los resultados son igual de buenos [20].

En algunos casos es necesario adelantar de 10 a 15° el punto de encendido, lo que lleva a avances del encendido de 35 a 40° antes del punto muerto superior[15].

[15] Posición que alcanza el pistón al final de una carrera, en el cual no existe fuerza que actúe sobre él y sólo se encuentra moviéndose gracias a su inercia.

En el caso de un motor Diesel es necesario realizar una adaptación, la cual permita un funcionamiento con la mezcla de dos combustibles: gas de síntesis y diesel, como combustible piloto, para el encendido de la mezcla combustible gas/aire.

En los motores de doble combustible es conveniente adelantar el punto de inyección del combustible auxiliar, alrededor de 10°. El valor exacto del avance dependerá del régimen de operación del motor.

Otra alternativa es disminuir el índice de compresión e instalando un sistema de encendido por chispa [8].

3.1.2. Sistemas moto-generadores adaptados

Con el propósito de evitar realizar las distintas modificaciones en los sistemas se puede recurrir a grupos generadores ya adaptados para el funcionamiento con gas de síntesis.

Las modificaciones realizadas al motor son similares a las antes mencionadas. La diferencia radica en que los motores adaptados han sido modificados y probados de tal forma que solo se necesita elegir el motor según los requerimientos, realizar la instalación y poner en marcha.

Una desventaja presente en la elección de un sistema adaptado es la falta de proveedores a nivel nacional. Sin embargo, existen empresas extrajeras, que se mencionarán más adelante, las cuales ofrecen grupos generadores con un motor modificado y acondicionado para el trabajo con gas pobre como combustible.

3.2. Adaptación de motores de combustión interna

Las investigaciones empíricas que se resumirán a continuación, para motores tipo Otto y Diesel, brindarán una idea general acerca del sistema más factible a emplear, además ofrecerán información y recomendaciones acerca de las modificaciones más comunes realizadas en los motores.

3.2.1. Motores de ciclo Otto

Se deben llevar a cabo una serie de modificaciones en los motores de ciclo Otto para que puedan ser operativos con syngas. Este, debido a su bajo contenido energético (aproximadamente la mitad del gas natural) es de difícil detonación mediante bujía, por lo que se suele poner una cámara de precombustión en la cual la mezcla de aire-syngas sea enriquecida. Dicha cámara requiere de una alimentación de syngas a alta presión.

La conversión requiere una completa transformación del carburador para abastecer un flujo volumétrico que dé la potencia requerida. El consumo de combustible previsto para un motor de syngas será un parámetro dado por el fabricante que dependerá de las revoluciones por minuto y la relación de aire-combustible [21].

3.2.1.1. Ensayo con motor GM 366

El proyecto realizado [22] tuvo como objetivo desarrollar un sistema de cogeneración de baja potencia accionado mediante un gasificador de cascarilla de arroz, técnica y económicamente flexible para su implementación en sectores rurales y agroindustriales.

Los componentes empleados en el sistema de cogeneración fueron:

- Motor de combustión interna GM 366 de encendido por chispa (figura 10).
- Generador eléctrico monofásico de 10 kW.
- Intercambiadores de calor para aprovechar la energía térmica residual en los gases de escape y agua de refrigeración de las camisas del motor.
- Instrumentación y sistema de control.

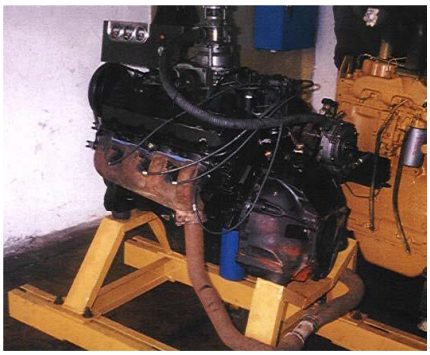


Figura 10. Motor de combustión interna GM 366.
Fuente: "Sistemas de Cogeneración de Baja Potencia Accionados con Gasificadores de Biomasa"

Se asumió que al adaptar un motor comercial de gasolina a gas manufacturado se obtiene una pérdida de potencia de 30 a 50%, dependiendo de las propiedades del gas y las modificaciones realizadas en el motor.

Las modificaciones más importantes realizadas en el motor fueron:

- Cambio en la regulación de la mezcla aire-gas.
- Incremento de la relación volumétrica de compresión.
- Aumento de la eficiencia volumétrica del motor.
- Incremento de la presión de la mezcla en la admisión.
- Adelanto del punto de encendido.
- Ceramización[16] de culatas.

Se lograron realizar las modificaciones del motor y se estimó la reducción de potencia en el motor en 26 %. Sin embargo, no se lograron realizar pruebas empleando syngas.

3.2.2. Motores duales

Al hablar de motor dual se hace referencia a un motor funcionando con dos tipos de combustibles. Para este caso, el gas de gasificación debe ser rociado en el cilindro con el

[16] Reacción en la cual las partículas de cerámica se unen a las moléculas de metal formando una capa protectora que permite reducir las fricciones.

flujo de aire a través de los inyectores localizados inmediatamente sobre la válvula de apertura (figura 11).

Es necesaria una cantidad de diesel, para encender la combinación de gas de gasificación y diesel. El diesel se inyecta, normalmente, y se enciende por la compresión en el cilindro, junto con el gas de gasificación.

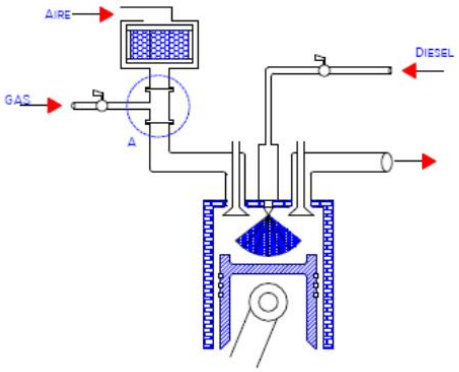


Figura 11. Sistema diesel-syngas en motores duales.
Fuente: "Análisis y Adaptación de Motores Ciclo Otto y Diesel Operando con Biogás"- Rodríguez, R.

Es necesario mantener un control en la proporción de gas de gasificación y diesel mediante un sistema de control logrando variar la concentración de syngas si fuese necesario. La más alta concentración de gas se alcanza durante un manejo suave, estable con pocas rápidas aceleraciones [21].

3.2.2.1. Ensayo motor Ford 4000-1981

En el ensayo realizado [23] se utilizó un motor FORD 4000 de 3 cilindros de diámetro y carrera de 112 mm (tipo cuadrado), cilindrada total 3294 cc y una relación de compresión de 16,5:1, con potencia nominal a 1900 rpm de 34 kW (par motor 170 N.m) en funcionamiento con diesel.

Se utilizó un carburador de gas marca IMPCO (figura 12) para dosificar la mezcla de syngas y aire, diseñado para biogás pero desmontando la membrana de depresión funcionaba como cámara de mezcla para el syngas. Se adelantó el punto de inyección de 19° a 23° antes del punto muerto superior (PMS), debido a la menor velocidad de reacción del syngas o gas de gasificación.

Figura 12. Carburador IMPCO
Fuente: EQUIGAS, C.A.

Para la operación del motor en forma dual, se determinó experimentalmente que mínimo entre un 10 y un 25% del poder calorífico total suministrado debía corresponder a la inyección de diesel pues al hacer una inyección insuficiente, no se alcanzaba a realizar un encendido correcto, produciéndose detonaciones y una marcha irregular del motor.

En operación dual, el motor se trabajó en un rango de relaciones aire/combustible que va desde mezcla estequiométrica, hasta mezclas medianamente pobre.

3.2.2.2. Ensayo motor Diesel dual

En el Instituto Nacional Sueco de Ensayos de Maquinaria Agrícola [24] se realizaron ensayos de funcionamiento empleando doble combustible de un motor Diesel con antecámara y cámara de turbulencia. Los ensayos indicaron que estos motores no son adecuados para funcionar con doble combustible porque se produce un encendido demasiado avanzado de la mezcla de gas y aire, lo que origina el golpeteo[17] en el motor, a menos que la carga sea bastante reducida o que la mezcla de syngas y aire esté limpia, lo que lleva a una sustitución moderada del diesel.

También se realizaron estudios sobre el rendimiento de motores Diesel de inyección directa, funcionando con el sistema de doble combustible con una inyección mínima de diesel.

La experiencia indica que las modificaciones necesarias suelen ser sencillas, y se limitan a:

- La instalación de una palanca de maniobra para obtener cantidades de inyección reducidas y mantener la posibilidad de inyección normal funcionando sólo con diesel.

- Modificación de la bomba de inyección para obtener unas características adecuadas de inyección.

- Avance del punto de inyección de combustible.

Los motores de inyección directa funcionan normalmente bien con el sistema de doble combustible, con un índice de compresión de 1:16 a 1:16,5. En algunos casos puede producirse el golpeteo, sin embargo, el índice de compresión deberá reducirse en este caso, utilizando empaquetaduras[18] dobles en las tapas de los cilindros.

Los estudios de los efectos del punto de inyección sobre la potencia de salida, indican que el punto de inyección no es muy importante para velocidades del motor inferiores a 1 200 rpm, y que el avance del punto de inyección es más importante al aumentar la velocidad.

Se observó para un avance de la inyección superior a 35-40°, se producen fluctuaciones de presión, por ello puede ser necesario conseguir un equilibrio entre una

[17] Ruido y vibración anormal en el motor causada por la explosión anticipada durante el periodo de compresión.

[18] Material adaptable que sirve para sellar la unión de elementos evitando fugas de fluidos.

potencia máxima para altas revoluciones por minuto y una combustión sin perturbaciones para bajas rpm.

Se recomienda que el establecimiento del punto de inyección para operar con doble combustible se determine mediante ensayos en banco de prueba para cada tipo de motor.

3.2.2.3. Ensayo moto-generador Leyland P76

El ensayo se llevó a cabo en la instalación de gasificación para generar electricidad a partir de los residuos de la elaboración de la madera de la Empresa Forestal Integral Gran Piedra Baconao de Santiago de Cuba.

La unidad generadora de electricidad estuvo formada por un motor y un generador eléctrico. El generador, directamente acoplado al motor, es trifásico, gira a 1800 rpm de 220 V y 60 Hz. Las características del motor empleado se dan a conocer en la tabla 18.

Tabla 18. Características técnicas del motor Ashok Leyland

Modelo	Ashok Leyland
Revoluciones	1800
Numero de Cilindros	6
Cilindrada	2623 cm^3
Diámetro del pistón	76.2 mm
Carrera	95.7 mm
Potencia Nominal	90.2 kW (Diesel)
Relación de compresión	9:1

Fuente: "Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna".

El motor Diesel modelo Leyland (figura 13) fue modificado para trabajar con gas pobre mediante la implementación de un mezclador tipo Venturi [19]y un sistema de encendido por chispa eléctrica.

Figura 13. Motor-generador Diesel modelo Leyland.
Fuente: "Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna".

La reducción de potencia que se obtuvo usando el motor Leyland P76, fue de 42% (40 kW) con respecto al Diesel (90,2 kW).

Se obtuvo que al trabajar con gas pobre producto de la gasificación de residuos de la industria forestal, el motor Leyland P76 posee una eficiencia térmica de 25,7 % y una eficiencia global de 14,2 % en su punto de operación (40 kW) [25].

[19] Tubo en donde ingresan dos fluidos, está basado en el efecto Venturi es decir en una parte el tubo disminuye su sección perdiendo presión pero ganando velocidad.

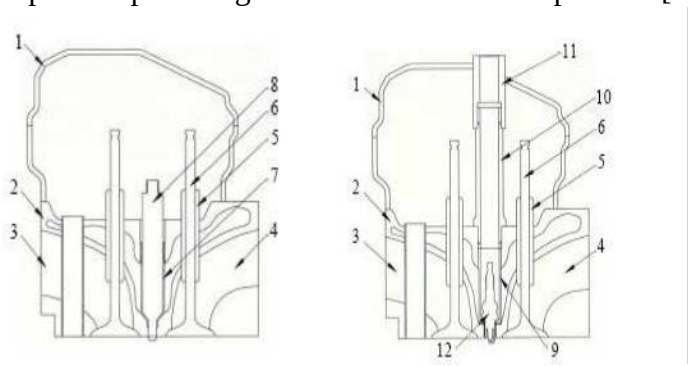
3.2.3. Motores de ciclo Diesel

En el caso de adaptar un motor Diesel mediante un encendido por chispa para su funcionamiento con syngas, las modificaciones necesarias son mayores que para los motores duales. La figura 14 muestra un antes y después de la adaptación de un motor Diesel.

En efecto, si se trabaja con un motor Diesel con un grado de compresión determinado, los pasos a seguir para adaptarlo a biogás serían los siguientes:

- Sustitución del sistema de inyección por un sistema de chispa, en algunos casos se debe añadir un carburador que mezcle aire-gas.

- Al sustituir los inyectores por un sistema de chispa se reducirá la relación volumétrica de compresión para biogás usando un cabezal separador [21].



En la figura se muestra la modificación de la culata: 1-Cubierta. 2- Cabeza del cilindro. 3- Lumbrera de admisión. 4- Lumbrera de escape. 5- Guía de la válvula. 6- Válvula gases escape. 7- Guía del inyector. 8- Inyector. 9- Guía de la bujía. 10- Conducto de conexión de la bujía. 11- Parte superior del conducto de conexión de la bujía. 12- Bujía.

Figura 14. Sistema Diesel antes y después de la adaptación.
Fuente: "Análisis y Adaptación de Motores Ciclo Otto y Diesel Operando con Biogás"- Rodríguez, R.

3.1.1 Ensayo motor Diesel

En el Instituto Nacional Sueco de Ensayos de Maquinaria Agrícola [24] se realizaron estudios detallados sobre la adaptación de dos motores diesel de fabricantes suecos: Volvo y Bolinder-Munktell, a encendido por chispa, a fin de funcionar sólo con gas pobre.

En resumen, las modificaciones incluyeron: la sustitución de la culata de los cilindros para poder acoplar las bujías, la sustitución de la bomba de inyección por un distribuidor[20], y el uso de pistones especiales para gas pobre que dan un índice menor de compresión. En uno de los motores se ensayaron distintas formas de la cámara de combustión.

[20] Elemento que envía una corriente eléctrica de manera sincronizada para generar la chispa en las bujías.

3.3. Criterios de selección

3.3.1. Tipo de motor

Según las experiencias de investigaciones empíricas presentadas en los acápites anteriores se recomienda, como punto de partida, el uso de motores Diesel para su adaptación. Por ello, los modelos de sistema que se propondrán serán motores Diesel, los cuales pueden estar sujetos a las modificaciones, o ya han sido modificados.

3.3.2. Potencia y frecuencia

Para este caso se evalúa la mayor potencia eléctrica que se podría llegar a generar partiendo de los datos teóricos del diseño del gasificador y la energía térmica disponible por el gas combustible.

La energía térmica del combustible dependerá del tipo de biomasa disponible. El gasificador se ha diseñado para trabajar con hojas de caña de azúcar y bagazo de caña de azúcar, los cuales han sido caracterizados en el capítulo anterior. Además para estos datos se estimó una potencia eléctrica de 15 kW.

En el caso de la frecuencia de trabajo, se seleccionará un generador que se encuentre en una frecuencia aproximada a los 60 Hz, lo cual dependerá del número revoluciones por minuto del motor y de un número determinado de polos del generador.

Mediante estudios experimentales se ha logrado demostrar que los motores alimentados con gas pobre funcionan, generalmente, a velocidades menores a 2500 RPM [10]

Con respecto al voltaje se prefiere una generación trifásica 380/220 dependiendo del dispositivo o máquina eléctrica que se vaya a poner en funcionamiento.

3.3.3. Disponibilidad de biomasa

Se debe tomar en cuenta la materia prima (biomasa), que se pueda tener a disposición para su posterior gasificación (figura 15).

Normalmente, se cuenta con biomasa necesaria para una hora de gasificación, tomando en cuenta el dato de consumo de biomasa del gasificador en la tabla 16, se encuentran disponibles cerca de 29 kg de biomasa.

Figura 15. Almacenamiento de biomasa.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Capacidad del gasificador

Es decir, el máximo flujo volumétrico de gas combustible que puede generar el gasificador tras el proceso de gasificación.

En la figura 16 se muestra el prototipo de gasificador de lecho fluidizado burbujeante, según los datos de diseño es capaz de producir un flujo volumétrico de syngas de 0.0167 m^3/s con ello fue posible obtener la capacidad del motor que puede ser alimentado solamente con este flujo (2.8 L a 1500 rpm y 2.3 L a 1800 rpm). Se tomarán de referencia los valores obtenidos empleando syngas de hoja de caña debido a que son menores con respecto a los de bagazo de caña.

Figura 16. Prototipo de gasificador de lecho fluidizado burbujeante.
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de emplear dos combustibles, syngas y un combustible piloto, la capacidad máxima del motor puede aumentar debido a que un porcentaje de esta será completada por el combustible piloto.

Según los resultados del capítulo anterior para motor dual con aumento de diesel al 15% se obtuvo que se puede llegar a alimentar un motor con una cilindrada máxima de 2.7 L para 1800 rpm y 3.2 L a 1500 rpm.

3.3.5. El espacio disponible para la instalación

El espacio disponible, influye en las dimensiones del sistema moto-generador a elegir, es necesario dejar un espacio no menor a 0.5 metros alrededor del sistema para poder efectuar las tareas de mantenimiento que sean necesarias.

Actualmente se cuenta con una plataforma de concreto (ver anexo A) de 4 x 5 m en donde se ubicará el sistema para la generación de energía eléctrica.

3.2. Sistemas moto-generadores propuestos

A continuación se propondrán algunos modelos de sistemas moto-generadores comerciales, los cuales cumplen con los criterios de selección y valores estimados hallados en el capítulo anterior.

3.2.1. Sistemas sin adaptar

La empresa peruana Motores Diesel Andinos S.A. (MODASA) ofrece distintos sistemas moto-generadores en un rango de potencia que va desde los 8 kW hasta los 2050 kW, empleando motores como Perkins, Mitsubishi, Doosan, entre otros.

Los siguientes modelos se proponen como alternativas posibles a seleccionarse, pero deben estar sujetos a modificaciones posteriores para un correcto funcionamiento con gas de síntesis. Las tablas de la 19 a la 22 corresponden a los datos técnicos del motor y las figuras 17 a la 19 las fotos reales del grupo electrógeno. Las fichas técnicas completas se encuentran en el anexo B.

Tabla 19. Ficha Técnica Grupo Electrógeno MP-14.

Motor –Grupo electrógeno MP-14	
Marca	Perkins
Numero de cilindros	3 en linea
Ciclo	4 tiempos
Combustible	Diesel
Diámetro pistón	84 mm
Desplazamiento pistón	90 mm
Capacidad	1496 cc
Velocidad	1800 rpm -60 Hz; 1500 rpm- 50 Hz
Relación de compresión	22.5:1
Aspiración	Natural

Fuente: Elaboración propia a partir de ficha técnica Motores Diesel Andinos S.A.

Figura 17. Grupo Electrógeno MP-14 Motor Perkins.
Fuente: Motores Diesel Andinos S.A.

Tabla 20. Ficha Técnica Grupo Electrógeno MM-16.

Motor –Grupo electrógeno MM-16	
Marca	Mitsubishi
Numero de cilindros	4 en linea
Ciclo	4 tiempos
Combustible	Diesel
Diámetro pistón	78 mm
Desplazamiento pistón	92 mm
Capacidad	1758 cc
Velocidad	1800 rpm -60 Hz; 1500 rpm- 50 Hz
Relación de compresión	22:1
Aspiración	Natural

Fuente: Elaboración propia a partir de ficha técnica Motores Diesel Andinos S.A.

Figura 18. Grupo Electrógeno MM-16 Motor Mitsubishi.
Fuente: Motores Diesel Andinos S.A.

Tabla 21. Ficha Técnica Grupo Electrógeno MM-24.

Motor –Grupo electrógeno MM-24	
Marca	Mitsubishi
Numero de cilindros	4 en linea
Ciclo	4 tiempos
Combustible	Diesel
Diámetro pistón	88 mm
Desplazamiento pistón	103 mm
Capacidad	2505 cc
Velocidad	1800 rpm -60 Hz; 1500 rpm- 50 Hz
Relación de compresión	22:1
Aspiración	Natural

Fuente: Elaboración propia a partir de ficha técnica Motores Diesel Andinos S.A.

Figura 19. Grupo Electrógeno MM-24 Motor Mitsubishi.
Fuente: Motores Diesel Andinos S.A.

3.2.2. Sistemas adaptados

La empresa China WEIFANG RONSUN POWER MACHINERY CO.,LTD. Ofrece a la venta distintos tipos de sistemas moto-generadores capaces de funcionar con distintos tipos de combustible como: el gas natural, gas licuado, biogás, gas de síntesis, biomasa, entre otros, y el rango de potencia es de 10kW a 100kW.

El modelo propuesto a continuación (figura 20) ha sido modificado, de tal manera que es capaz de funcionar con gas de síntesis brindando una potencia de 10 kW eléctricos (según e indica en la ficha técnica en el anexo B). Las características principales del grupo electrógeno se encuentran en la tabla 22.

Tabla 22. Ficha Técnica Grupo Electrógeno MP-24.

Motor a gas- Sistema LH-10GFT	
Modelo	LS26-25G
Potencia estimada	15 kW
Numero de cilindros	4
Diámetro cilindro	90 mm
Desplazamiento	105 mm
Capacidad	2.5 L
Velocidad aproximada	1500 rpm
Capacidad Aceite lubricante	12 L
Aspiración	Natural
Alternador DC	24 v

Fuente: Elaboración propia a partir de ficha técnica Ronsun Power Machinery.

Figura 20. Grupo Electrógeno Ronsun LH-10GFT.
Fuente: Weifang Ronsun Power Machinery CO.,LTD.

3.3. Análisis de los modelos

A continuación, se realizará un análisis de los sistemas moto-generadores propuestos. Los datos de referencia se obtendrán de las especificaciones técnicas del proveedor, las cuales se encuentran en el anexo B.

Se debe tener en cuenta que en el caso de que solamente se emplee syngas como combustible, el gasificador puede alimentar a un motor de capacidad máxima de 2.3 L a 1800 rpm, sin embargo trabajando con un motor dual al 15% de diesel puede alimentar a un motor de capacidad máxima de 2.7 litros.

Los resultados se obtendrán utilizando un programa realizado en el software MATLAB, el cual se indicará al final del capítulo. El programa emplea como base las ecuaciones planteadas en el capítulo 2.

3.3.1. Sistema moto-generador MP-14

El sistema presenta dos condiciones de funcionamiento 1500 y 1800 rpm, en las cuales se produce una frecuencia de 50 y 60 Hz, respectivamente.

Es necesario que el motor funcione a 1800 rpm para obtener una frecuencia de 60 Hz, la cual es la frecuencia de trabajo normada.

Según las especificaciones técnicas, el sistema moto-generador presenta una capacidad de 1.496 L, por lo cual es posible adaptarlo tanto para un funcionamiento empleando solo syngas o para un funcionamiento de doble combustible empleando 15% de diesel en reemplazo.

3.3.1.1. Potencia esperada

- Empleando solo syngas

  Potencia mecánica estimada:

$$\dot{W}_e = 12.2860\ kW$$

  Potencia eléctrica disponible:

$$\dot{W}_{elec} = 9.8288\ kW$$

  Flujo volumétrico de syngas requerido:

$$\dot{V}_{syngas} = 0.0107\ {}^{m^3}/_{s}$$

- Empleando 15% de diesel en reemplazo.

  Potencia mecánica estimada:

$$\dot{W}_e = 13.1322\ kW$$

  Potencia eléctrica disponible:

$$\dot{W}_{elec} = 10.5058\ kW$$

  Flujo volumétrico de diesel requerido:

$$\dot{V}_{diesel} = 3.3478 * 10^{-7}\ {}^{m^3}/_{s}$$

  Flujo volumétrico de syngas requerido:

$$\dot{V}_{syngas} = 0.0091\ {}^{m^3}/_{s}$$

3.3.2. Sistema moto-generador MM-16

El sistema presenta dos condiciones de funcionamiento 1500 y 1800 rpm en las cuales se produce una frecuencia de 50 y 60 Hz, respectivamente.

Es necesario que el motor funcione a 1800 rpm para obtener una frecuencia de 60 Hz la cual es la frecuencia de trabajo común.

Según las especificaciones técnicas el sistema moto-generador presenta una capacidad de 1.758 L, por lo cual es posible adaptarlo tanto para un funcionamiento empleando solo

syngas o para un funcionamiento de doble combustible empleando 15% de diesel en reemplazo.

3.3.2.1. Potencia esperada

- Empleando solo syngas

  Potencia mecánica estimada:

$$\dot{W}_e = 14.4377\ kW$$

  Potencia eléctrica disponible:

$$\dot{W}_{elec} = 11.5501\ kW$$

  Flujo volumétrico de syngas requerido:

$$\dot{V}_{syngas} = 0.0126\ {}^{m^3}/_{s}$$

- Empleando 15% de diesel en reemplazo.

  Potencia mecánica estimada:

$$\dot{W}_e = 15.4321\ kW$$

  Potencia eléctrica disponible:

$$\dot{W}_{elec} = 12.3457\ kW$$

  Flujo volumétrico de diesel requerido:

$$\dot{V}_{diesel} = 3.9341 * 10^{-7}\ {}^{m^3}/_{s}$$

  Flujo volumétrico de syngas requerido:

$$\dot{V}_{syngas} = 0.0107\ {}^{m^3}/_{s}$$

3.3.3. Sistema moto-generador MM-24

El sistema presenta dos condiciones de funcionamiento 1500 y 1800 rpm en las cuales se produce una frecuencia de 50 y 60 Hz, respectivamente.

Es necesario que el motor funcione a 1800 rpm para obtener una frecuencia de 60 Hz la cual es la frecuencia de trabajo común.

Según las especificaciones técnicas el sistema moto-generador presenta una capacidad de 2.505 L, por lo cual es posible adaptarlo para un funcionamiento de doble combustible empleando 15% de diesel en reemplazo.

3.3.3.1. Potencia esperada

- Empleando 15% de diesel en reemplazo.

  Potencia mecánica estimada:

$$\dot{W}_e = 21.9895\ kW$$

  Potencia eléctrica disponible:

$$\dot{W}_{elec} = 17.5916\ kW$$

  Flujo volumétrico de diesel requerido:

$$\dot{V}_{diesel} = 5.6058 * 10^{-7}\ {}^{m^3}/_{s}$$

  Flujo volumétrico de syngas requerido:

$$\dot{V}_{syngas} = 0.0152\ {}^{m^3}/_{s}$$

3.3.4. Sistema moto-generador LH-10GFT

El sistema opera a 1500 rpm y tiene una capacidad de 2.5 L según las especificaciones del fabricante, según los resultados obtenidos a esta velocidad si es posible empelar solo syngas como combustible, pero se operaria a una frecuencia de 50 Hz, además el voltaje obtenido rodea los 230 voltios.

3.3.4.1. Potencia esperada

- Empleando solo syngas

  Potencia mecánica estimada:

$$\dot{W}_e = 17.1095 kW$$

  Potencia eléctrica disponible:

$$\dot{W}_{elec} = 13.6876\ kW$$

  Flujo volumétrico de syngas requerido:

$$\dot{V}_{syngas} = 0.0126\ {}^{m^3}/_{s}$$

3.4. Código Matlab

Como se mencionó anteriormente para realizar los cálculos, se escribió un programa en MATLAB. Este se presenta a continuación.

```
'Ingresar Valores';
x=input('Ingrese cantidad de Metano =');
y=input('Ingrese cantidad de Monóxido de Carbono =');
z=input('Ingrese cantidad de Dióxido de Carbono =');
w=input('Ingrese cantidad de Hidrogeno =');
v=input('Ingrese cantidad de Nitrógeno =');
RPM=input('Ingrese las Revoluciones por Minuto Recomendadas =');
CC=input('Ingrese la capacidad del motor (L)=');
'Para funcionamiento dual';
disp('En el caso de funcionamiento dual ingrese el porcentaje de diesel
adicional ');
disp('de lo contrario ingrese el valor 0');
Die=input('Ingrese el porcentaje de diesel =');
if Die>0
    disp('Si desea el porcentaje de diesel en remplazo ingrese 1,si lo
desea en aumento ingrese 0')
    Factor=input('Ingrese Factor =');
else Die=0;
    Factor=0;
end

%Ecuaciones Planteadas
'Aumento o Reemplazo';
AUR=(CC-(CC*Die/100*Factor));
'Consumo estimado de la mezcla';
Flujo=((AUR*RPM)/120000);
'Relación aire combustible m3/m3';
CH=x/100*2;
CO=y/100*0.5;
H=w/100*0.5;
Rac=(CO+H+CH)*4.76;
'Comsumo estimado de combustible';
q=(Flujo/(Rac+1));
'Poder Calorífico';
PC=((x/100)*35825)+((y/100)*12655)+((w/100)*10770);
'Potencia mecánica del motor';
p=(q*0.8*PC*0.28);
'Potencia eléctrica';
e=(p*0.8);
'Cálculos para diesel';
j=(Flujo/((100-Die)/100));
k=(j*Die/100);
Vcomb=(k/(1+10053.33));
Wdiem=(0.8*Vcomb*35860000*0.28);
Wdie=(0.8*Vcomb*35860000*0.8*0.28);

%Soluciones
disp('Flujo necesario de syngas (m3/s) =');
disp(q);
if Die>0
    disp('Flujo necesario de diesel (m3/s)=');
```

```
    disp(Vcomb);
end
disp('Potencia Mecánica Estimada (kW)=');
disp(p+Wdiem);
disp('Potencia Eléctrica Estimada (kW) =');
disp(Wdie+e);
```

Capítulo 4

Pruebas y resultados

El objetivo de este capítulo es citar los resultados obtenidos al emplear la metodología utilizada en los capítulos anteriores para la selección del sistema moto-generador, el cual funcionará con syngas obtenido mediante un gasificador de lecho fluidizado burbujeante para hoja de caña de azúcar o bagazo de caña de azúcar.

Además, se dará a conocer el procedimiento experimental empleado para la gasificación de biomasa y los datos obtenidos durante el proceso.

4.1. Funcionamiento con Syngas

4.1.1. Poder calorífico del syngas

En la figura 21 se indicará el porcentaje en base seca de los componentes presentes en el syngas obtenido de la gasificación de hoja de caña y bagazo de caña.

El componente de mayor influencia en el poder calorífico inferior del syngas es el metano, le sigue el monóxido de carbono y por último el hidrógeno.

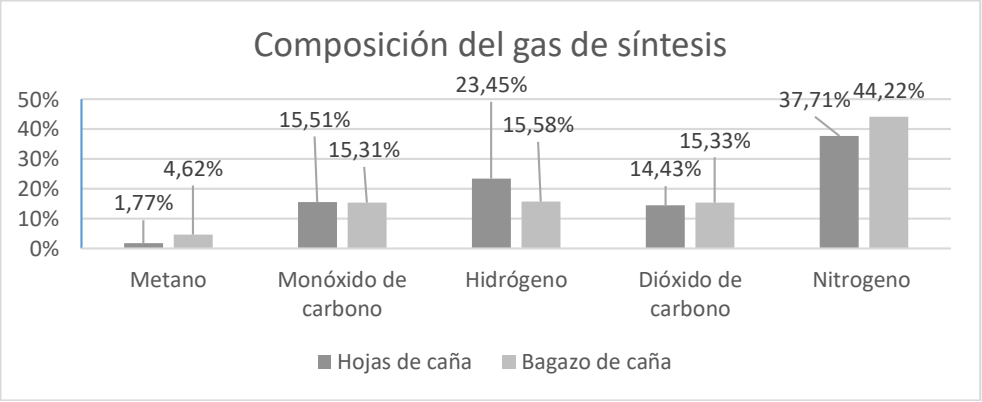


Figura 21. Composición del gas de síntesis.
Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la gráfica (figura 22), el metano está presente en mayores proporciones en el syngas de bagazo de caña (4.62%), el monóxido de carbono se encuentra en proporciones similares, y la cantidad de hidrogeno es mayor en el syngas de hoja de caña (23.45%), por lo cual el poder calorífico inferior del syngas de bagazo de caña resultará ser 2.9% mayor que en el caso del syngas de hoja de caña.

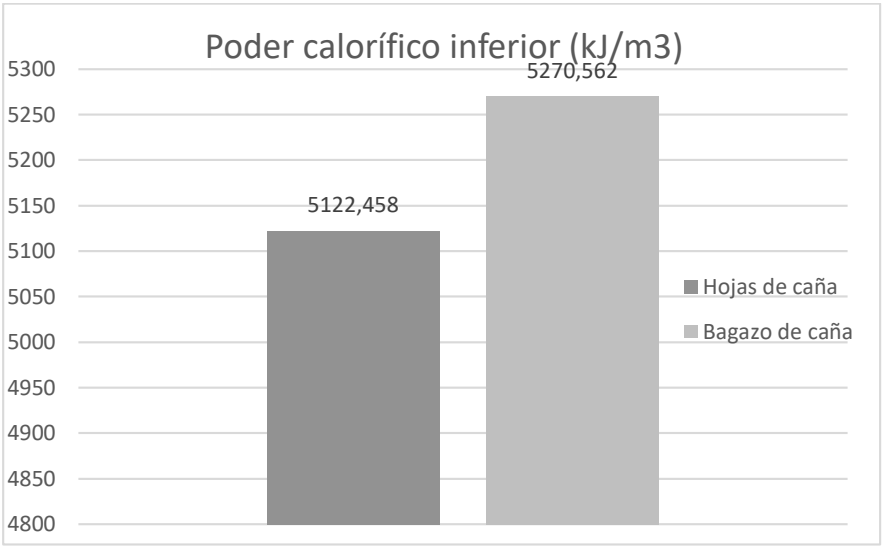


Figura 22. Poder calorífico inferior del syngas.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Potencia teórica obtenida

Las potencias teóricas se calculan siguiendo una serie de ecuaciones[21] (desarrolladas en el capítulo 2) y tomando como referencia valores recomendados por estudios ya realizados.

A continuación, en la figura 23, se indican las potencias mecánicas y eléctricas obtenidas empleando solo syngas como combustible, tanto para el caso del bagazo de caña como para la hoja de caña.

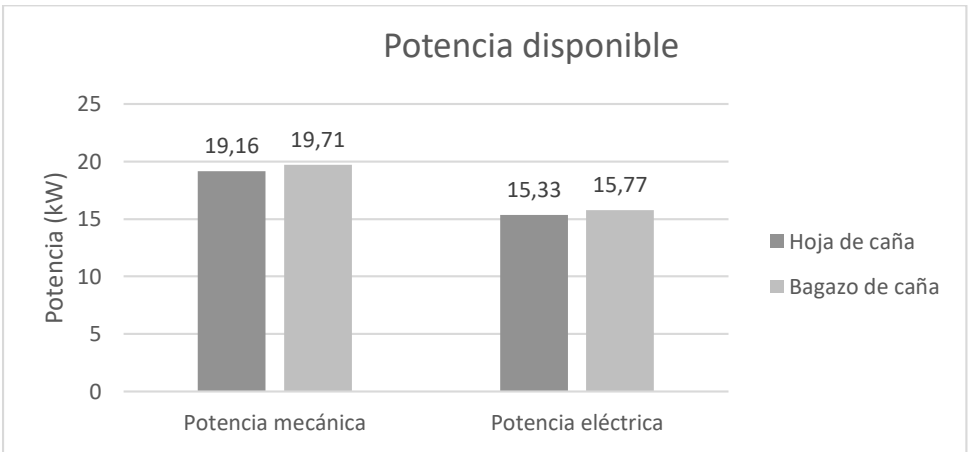


Figura 23. Potencia disponible según el tipo de biomasa.
Fuente: Elaboración propia.

[21] Se refiere a las ecuaciones (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), (2.10), (2.11)

4.1.3. Capacidad máxima del motor

La cilindrada o capacidad máxima del motor que puede ser alimentada se ve limitada por la capacidad del gasificador (en este caso el flujo máximo de syngas proveniente de la gasificación es de 0.0167 m^3/s) y por las revoluciones por minuto que puede tener el motor.

En la figura 24 se indica la capacidad que debe tener el motor tanto para 1500 rpm y para 1800 rpm manteniendo el flujo de syngas constante.

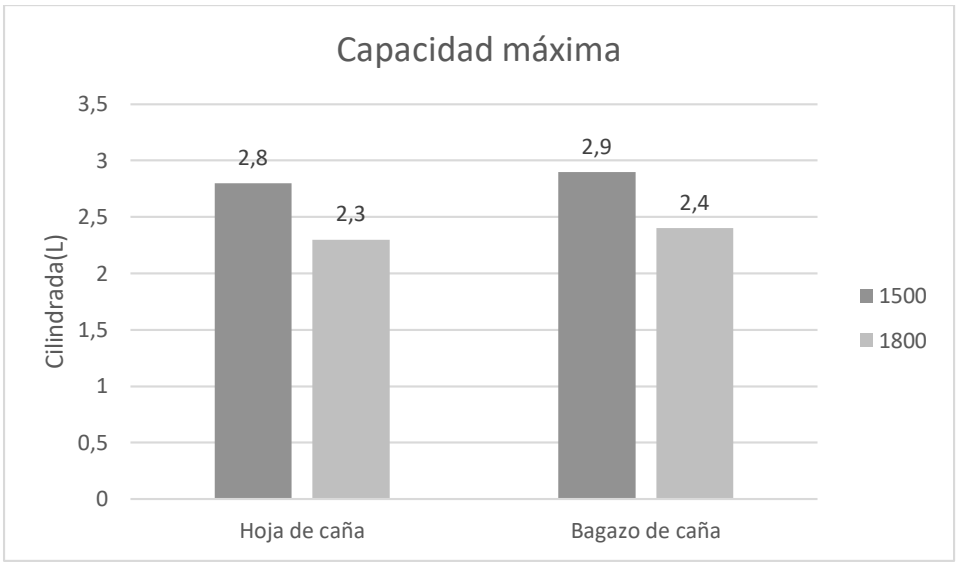


Figura 24. Capacidad máxima del motor según el tipo de biomasa y las RPM.
Fuente: Elaboración propia.

Como la gráfica indica, también se presentan variaciones en la capacidad máxima del motor dependiendo del tipo de biomasa empleado.

4.2. Funcionamiento con doble combustible

4.2.1. Potencia obtenida con doble combustible

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores existe la posibilidad de emplear un motor de doble combustible agregando un porcentaje de diesel (como combustible piloto) a la mezcla aire-syngas para generar el encendido de la misma.

El adicional de combustible aumentará el poder calorífico de la mezcla brindando así más energía térmica y por ende mayor energía mecánica y eléctrica.

En la figura 25 se indica el aumento de la potencia eléctrica disponible para un motor de 2.3 L de capacidad a 1800 rpm desde 0% diesel (solo syngas) hasta un porcentaje de 50% de diesel en reemplazo.

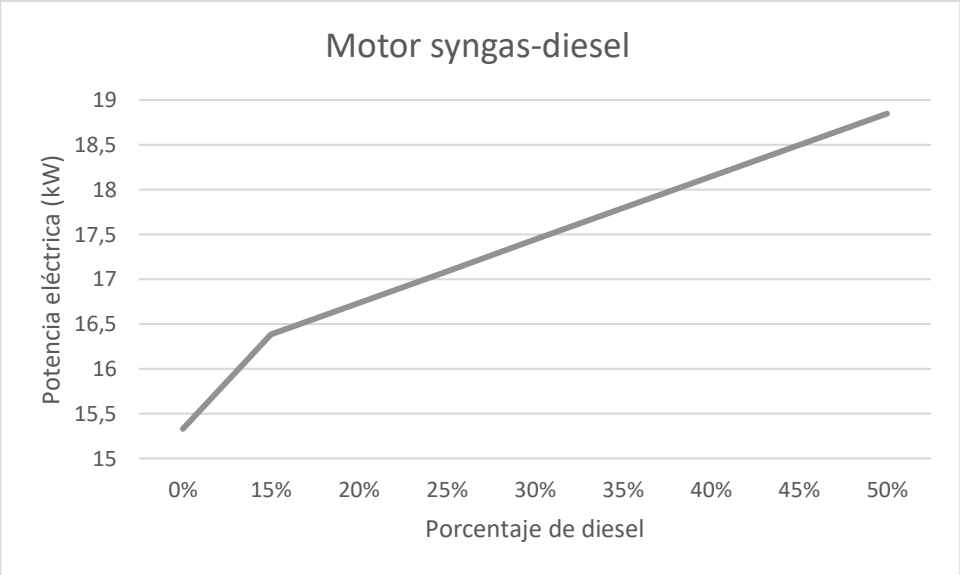


Figura 25. Potencia eléctrica de motor funcionando con doble combustible.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Capacidad obtenida con doble combustible

La capacidad máxima del motor que puede ser alimentada depende, directamente, del flujo máximo de syngas y del porcentaje de diesel adicional. Se tomó en cuenta que la capacidad máxima que puede alimentar el flujo de syngas (0% diesel) es 2.3 L y 2.8 L a 1800 rpm y 1500 rpm, respectivamente.

En la figura 26 se muestra el porcentaje de diesel adicional que va del intervalo de 15% a 50% y con ello aumenta también la capacidad del motor.

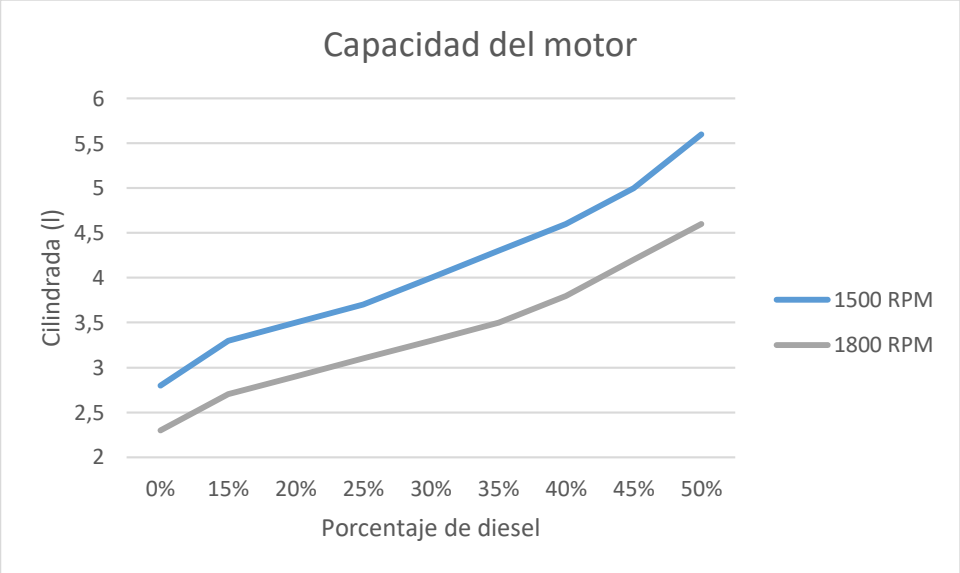


Figura 26. Cilindrada del motor según RPM y porcentaje de diesel.
Fuente: Elaboración propia.

4.3. Pruebas

4.3.1. Preparación del sistema

Antes de efectuar las pruebas se realizaron diversas modificaciones en el gasificador.

4.3.1.1. Modificación del sistema de calentamiento

El sistema de calentamiento estaba formado por un quemador, el cual tenía la función de mezclar aire y gas propano en diferentes proporciones para obtener distintos tipos de llama y temperatura.

El quemador solo lograba calentar las primeras capas de bauxita[22] y el calentamiento no era uniforme, para su funcionamiento se requería aproximadamente de 53 kW eléctricos, la cual era una potencia muy alta respecto a la potencia teórica que se podría generar empleando un sistema motor-generador (15kW), por lo cual los gastos energéticos del sistema de gasificación eran mayores que los de generación.

Retirar el quemador y tapar el agujero que ocupaba mediante una plancha circular de metal AISI 1020, resultó ser una solución eficaz. Procedimiento que se representa en la figura 27.

Figura 27. Reemplazo y sellado del orificio del quemador.
Fuente: Elaboración propia.

El sistema de calentamiento que se implementó aprovecha el flujo de aire proveniente del soplador[23] para realizar una mezcla con gas propano. Se realizó un orificio en la tubería de impulsión del soplador para permitir el ingreso de gas propano mediante un tubo (como se muestra en la figura 28). Realizada esta modificación se esperó un calentamiento uniforme en la bauxita.

[22] Partículas sólidas de roca formadas, principalmente, por hidróxido de aluminio que tiene la característica de ser refractaria y abrasiva.
[23] Aparato empleado para aumentar la presión y el flujo volumétrico de aire a la entrada.

Figura 28. Instalación del ducto de ingreso del gas propano.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.2. Modificación en el sistema de fluidización

Se realizaron distintas pruebas de fluidización con el soplador que se contaba, sin embargo, no se obtuvieron los resultados deseados. El soplador no contaba con la suficiente presión para llevar a cabo la fluidización de la bauxita.

También se realizó una prueba de encendido, pero no se logró encender la mezcla, evidentemente la mezcla aire-gas propano no tenía un flujo constante a través de las partículas de bauxita por la falta de presión del soplador.

En este caso se optó por cambiar el sistema de fluidización reemplazando el soplador por uno de mayor presión (30 kPa), como se muestra en la figura 29.

Figura 29. Reemplazo del soplador.
Fuente: Elaboración propia.

Con el nuevo soplador se logró fluidizar todas las partículas de bauxita para distintas alturas de cama [24](desde 14 a 50 cm).

4.3.2. Pruebas de equipos

Prueba del sistema de fluidización: Con ayuda del variador de frecuencia se pudo controlar la velocidad del motor en el soplador y con ello el flujo de aire y la presión. Se realizaron pruebas con 14, 35 ,50 cm de altura de lecho de bauxita logrando fluidización en cada una de ellas.

[24] Altura de lecho o cantidad total de material que será fluidizado dentro del gasificador.

Se eligió trabajar con una altura de lecho de 35 cm de bauxita, la cual no cubría el orificio de alimentación de biomasa.

Para frecuencias menores a 20 Hz se presentó un estado de lecho fijo[25], en el intervalo de 20 a 25 Hz la bauxita se encontraba en estado vibratorio[26], de 25 a 28 Hz en estado de mínima fluidización [27]y para frecuencias mayores a 28 Hz un estado de fluidización uniforme.[28]

Prueba del sistema de calentamiento: Se procedió al encendido de la mezcla aire – gas propano, el cual ingresa directamente al gasificador (figura 30).

El procedimiento de encendido consiste:

- Controlar la entrada de aire y presión mediante el variador de frecuencia, las partículas de bauxita debían estar en un estado de vibración, el cual se obtuvo a 20 Hz.

- Desde la parte superior del gasificador se retira la tapa del visor, y se deja caer un algodón encendido, enseguida se coloca la tapa y se enciende el gas propano, logrando encender la mezcla.

- Se debe aumentar la frecuencia lentamente hasta alcanzar un estado de mínima fluidización para lograr un calentamiento uniforme de toda la bauxita.

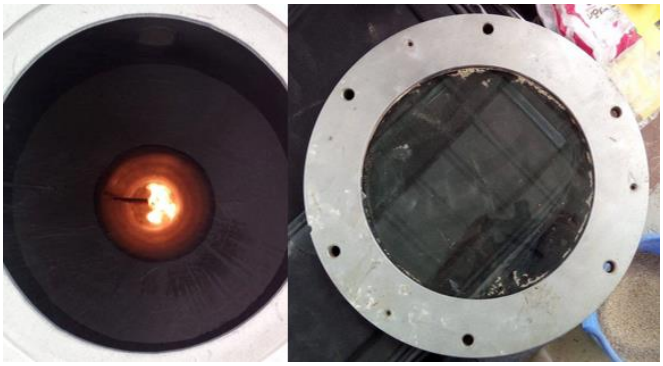


Figura 30. Encendido de la mezcla y tapa superior (visor).
Fuente: Elaboración propia.

Al emplear bauxita se logró encender la mezcla de aire-gas propano a 20 Hz, pero al aumentar la frecuencia al estado de mínima fluidización, el movimiento de partículas y el exceso de aire apagaban la llama.

Se llegó a concluir que el tamaño de las partículas de bauxita era muy grande para poder llegar a un calentamiento uniforme.

[25] La cantidad total de partículas sólidas dentro del gasificador permanecen estáticas.
[26] La capa superficial de partículas sólidas presentan un mínimo movimiento.
[27] La capa superficial de partículas sólidas presentan mayor agitación.
[28] La mayor parte de partículas sólidas permanece en un considerable y constante movimiento.

Se lograron hacer pruebas juntando una altura de lecho de 10 cm bauxita de menor tamaño y una cama de arena de 25 cm de arena en este caso el estado de vibración se alcanzaba en el intervalo de 8 a 10 Hz, resultando una combustión incompleta [29]a los 8 Hz. Por este motivo, se trabajó a 10 Hz logrando encender la mezcla aire-gas propano. Para este caso la frecuencia se aumentó hasta 14 Hz sin extinguirse el fuego. Sin embargo, se empleó una frecuencia de 12 Hz, los cuales permitieron un estado de mínima fluidización y un calentamiento uniforme de la arena y bauxita.

4.3.3. Adquisición de datos

Datos de temperatura: El sistema de adquisición de datos para la temperatura está conformado por nueve sensores de temperatura 3 RTD's tipo PT 100 y 6 termopares tipo K (como se muestra en la figura 31) los cuales están ubicados a lo largo de toda la extensión del gasificador.

Figura 31. Distribución de sensores de temperatura en el gasificador.
Fuente: Elaboración propia

Para registrar las temperaturas se empleó una interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada en el software MATLAB, la cual brinda lecturas de temperatura en tiempo real y las almacena cada 2 segundos.

Durante las pruebas se tomó en cuenta la temperatura en el sensor 2 debido a que indica la temperatura a que se encuentra la arena con bauxita, es importante que hayan superado los $600°C$ para iniciar el ingreso de biomasa.

Composición del syngas: Para realizar las mediciones correspondientes se empleó un analizador de gases de combustión profesional marca MADUR GA40 T-Plus (figura 32), el cual almacenó las mediciones cada 3 segundos.

[29] Cuando el oxígeno presente en el aire ha sido insuficiente para oxidar completamente los componentes.

Los datos brindados por este analizador son temperaturas de salida del syngas, porcentaje de metano, hidrogeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono.

Figura 32. Sistema completo para la adquisición de datos.
Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Resultados experimentales

De los dos tipos de biomasa analizados en este estudio sólo se lograron realizar pruebas con un solo tipo de biomasa, la cual fue la hoja de caña, debido a la problemática que aún presenta el prototipo de gasificador:

- Fugas de syngas por el tornillo sinfín por donde ingresa la biomasa, ocasionando el encendido de la biomasa que aún no ha ingresado al gasificador (figura 33).

- La dilatación térmica ocasiona ligeras fugas de arena por la brida que une el gasificador con el sistema de ingreso de biomasa.

El procedimiento seguido para realizar la prueba se describe a continuación:

- Se retira la tapa superior del gasificador (visor), por ella se verterá la arena con bauxita en una proporción en volumen de 2.5:1 hasta completar los 35 milímetros de cama dentro del reactor.

- Se enciende el soplador a 10 Hz, seguidamente se empapa un algodón en alcohol y se enciende, inmediatamente se deja caer por la parte superior y se apertura el ingreso de gas propano.

- La mezcla aire-gas propano se enciende elevando, inmediatamente, las temperaturas dentro del reactor.

- Al cabo de unos minutos se debe aumentar la frecuencia del soplador de 10 a 12 Hz con el objetivo de tener una mínima fluidización y un calentamiento uniforme en la arena con bauxita.

- Se debe esperar un tiempo prudente para lograr que todas las temperaturas en los sensores 2, 3, 4, 5, 6, 7,8 pasen los 600 °C (es deseable que se llegue a 800 °C).

- Llegando a las temperaturas óptimas se colocará la tapa superior del gasificador y se empernará.

- Se encenderá el tornillo sinfín a 200 rpm para el ingreso de biomasa, se cortará el ingreso de gas propano al reactor y se elevará la frecuencia del soplador a 40 Hz iniciando la gasificación.

- Con ayuda de una GUI antes descrita se registrarán datos de temperatura y el analizador de gases registrará la composiciòn del syngas.

Figura 33. Salida de syngas por la manguera y por el orificio de ingreso de biomasa.
Fuente: Elaboración propia

4.3.4.1. Datos de temperatura

La prueba realizada tuvo un tiempo aproximado de 1 hora a partir del encendido de la mezcla aire-gas propano (a 10 Hz). El calentamiento duró 50 minutos para que la arena y bauxita lleguen a una temperatura de 700 °C, el ingreso de biomasa se realizó constantemente durante 12 minutos (a 40 Hz), pasado este tiempo se produjo la problemática antes mencionada y se optó por apagar el gasificador.

El dato de mayor importancia es el mostrado por el sensor 2 que indica la temperatura de la arena y bauxita, las cuales estarán en un estado de fluidización y contacto con la biomasa realizando la gasificación. La figura 34 muestra la gráfica obtenida durante las pruebas realizadas.

4.3.4.2. Datos de composición del syngas

Empleando el analizador de gases antes mencionado se obtuvieron un conjunto extenso de resultados (ver anexo D), de los cuales se tomarán intervalos en donde el flujo de syngas fue el mayor.

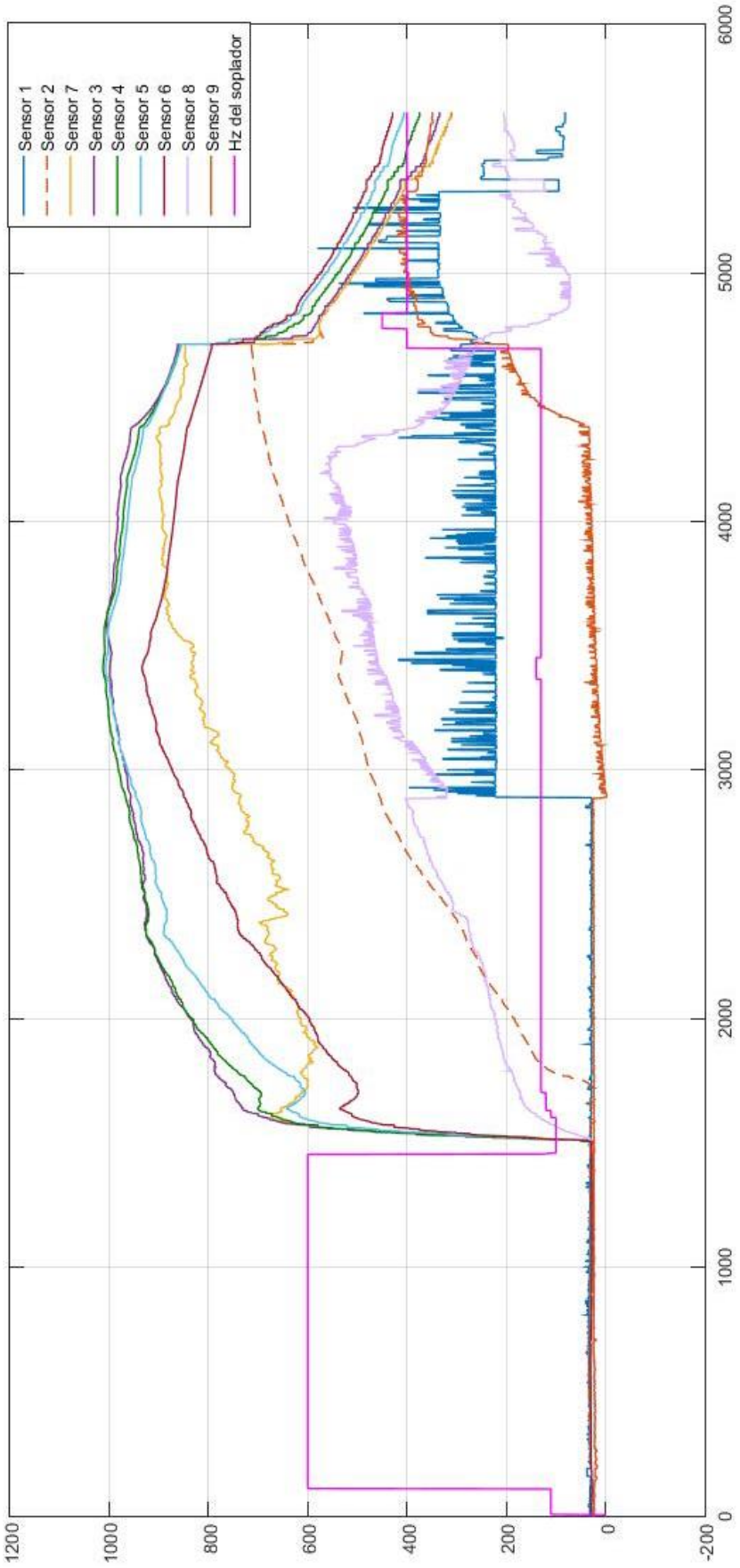


Figura 34. Gráficas de temperatura durante las pruebas.
Fuente: Elaboración propia

Las mediciones del syngas se comenzaron a realizar en la manguera de salida, sin embargo al cabo de 3 minutos fue necesario cambiar de lugar el sensor del analizador de gases debido a la fuga existente por el orifico de entrada de biomasa.

De todos los datos obtenidos se tomarán en consideración los valores de los componentes que permitirán hallar las características principales del syngas. Entre estos se registraron valores máximos de 25000 ppm de metano, un porcentaje máximo de 19.98% de monóxido de carbono y 6.23 por ciento de hidrogeno.

4.3.4.3. Análisis teórico-experimental

A continuación, se realizará un contraste y comparación respecto a los resultados teóricos y experimentales empleando hoja de caña.

La tabla 23 muestra los resultados del análisis experimental del syngas y los datos teóricos en porcentaje de volumen.

Tabla 23. Resultados de la composición del syngas de hoja de caña.

Componente	Fórmula	Datos experimentales %vol.	Datos teóricos %vol.
Metano	CH_4	2.5	1.77
Monóxido de Carbono	CO	19.98	15.51
Hidrógeno	H_2	6.23	23.45
Dióxido de Carbono	CO_2	20.45	14.43

Fuente: Elaboración propia

Según los datos obtenidos se puede concluir que la medición del porcentaje de metano y monóxido de carbono presentan un aumento de 29.2% y 22.4% respectivamente, sin embargo, el contenido del hidrógeno tiene una reducción del 73.4%. Por lo tanto, se espera una disminución en el poder calorífico del syngas.

- **Caracterización del syngas**

Con ayuda del software MATLAB y los programas que facilitaron el cálculo en los capítulos 2 y 3 se obtendrán los resultados de acuerdo a las mediciones realizadas al syngas. La tabla 24 compara los datos experimentales y teóricos para el syngas de hoja de caña.

Las fugas de syngas presentes en el gasificador dificultaron la medición del flujo volumétrico de syngas en la salida, por lo tanto se continuará trabajando con un flujo volumétrico de 0.0167 m^3/s.

Tabla 24. Características del syngas de hoja de caña.

Parámetro	Con datos experimentales	Con datos teóricos
Relación aire-syngas teórica (m^3/m^3)	0.8618	1.096
Poder calorífico inferior del syngas (kJ/m^3)	4095.1	5122.5
Poder calorífico inferior de la mezcla aire-syngas (kJ/m^3)	2199.5	2443.9

Fuente: Elaboración propia.

Las potencias máximas que se pueden obtener en un motor de combustión interna trabajando solo con syngas se presentan en la tabla 25.

Tabla 25. Potencias disponibles empleando hoja de caña como biomasa.

Parámetro	Con datos experimentales	Con datos teóricos
Potencia mecánica disponible (kW)	15.32	19.16
Potencia eléctrica disponible (kW)	12.26	15.33

Fuente: Elaboración propia.

Dependiendo de la velocidad del motor a emplear y el flujo volumétrico de syngas se obtienen la capacidad máxima que puede tener el motor de combustión interna (tabla 26).

Tabla 26. Capacidad de motor a distintas revoluciones empleando hoja de caña como biomasa.

Parámetro	Con datos experimentales	Con datos teóricos
Capacidad a 1500 rpm (L)	2.48	2.8
Capacidad a 1800 rpm (L)	2	2.3

Fuente: Elaboración propia.

- **Funcionamiento con doble combustible**

La tabla 27 muestra los resultados teóricos empleando los datos (experimentales y teóricos) de la composición del syngas y un 15% diesel en reemplazo.

Tabla 27. Valores empleando 15% de diesel en reemplazo.

Parámetro	Con datos experimentales	Con datos teóricos
Flujo volumétrico de diesel (m^3/s)	$4.6323 * 10^{-7}$	$5.2216 * 10^{-7}$
Flujo volumétrico de syngas (m^3/s)	0.0142	0.0142
Potencia mecánica (kW)	16.7244	20.4819
Potencia eléctrica (kW)	13.3795	16.3855

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 28 muestra los resultados teóricos empleando los datos (experimentales y teóricos) de la composición del syngas y un 15% diesel en aumento.

Tabla 28. Valores empleando 15% de diesel en aumento.

Parámetro	Con datos experimentales	Con datos teóricos
Flujo volumétrico de diesel ($^{m^3}/_{s}$)	$5.4572 * 10^{-7}$	$6.1431 * 10^{-7}$
Flujo volumétrico de syngas ($^{m^3}/_{s}$)	0.0167	0.0167
Potencia mecánica (kW)	19.7024	24.097
Potencia eléctrica (kW)	15.7619	19.2776
Nueva Capacidad a 1500 rpm	2.9	3.3
Nueva Capacidad a 1800 rpm	2.44	2.7

Fuente: Elaboración propia.

- **Modelos seleccionados**

Los datos obtenidos en el transcurso de las pruebas evidencian una considerable variación en los componentes del syngas de hoja de caña, por lo cual en la tabla 29 se indicaran los parámetros básicos que debe tener el sistema moto-generador para el funcionamiento con syngas o con doble combustible. También se tendrán en cuenta los criterios de selección presentes en el capítulo 3.

Tabla 29. Parámetros básicos del sistema moto-generador.

Parámetros	
a) Motor	Diesel
b) Rango de velocidades	1500-1800 rpm
c) Voltaje	380/220
d) Frecuencia	60 Hz
e) Número de fases	3
f) Número de cilindros	3-4
g) Aspiración	Natural
h) Capacidad a 1500 rpm	1. Solo syngas (≤ 2.48L)
	2. Doble combustible (2.48L - 2.9L)
i) Capacidad a 1800 rpm	1. Solo syngas (≤ 2L)
	2. Doble combustible (2.3-2.44L)

Fuente: Elaboración propia.

Basados en los parámetros básicos de la tabla 29, obtenidos con los datos experimentales, se puede llevar a cabo una selección más específica dentro de los modelos en el capítulo 3.

Tabla 30. Evaluación de motores propuestos según parámetros básicos.

Motor	a	b	c	d	e	f	g	h		i	
								1	2	1	2
MP-14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MM-16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MM-24	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x
LH-10GFT	x	✓	x	x	✓	✓	✓	x	✓	x	x

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla 30 los únicos modelos de sistemas moto-generadores que cumplen con los parámetros básicos son el MP-14 y el MM-16, para ellos se espera, aproximadamente, los siguientes resultados detallados en la tabla 31.

Tabla 31. Resultados de los sistemas moto-generadores seleccionados.

MP-14			MM-16		
Solo syngas	Flujo volumétrico de syngas (m^3/s)	0.0121	Solo syngas	Flujo volumétrico de syngas (m^3/s)	0.0142
	Potencia Mecánica (kW)	11.0560		Potencia Mecánica (kW)	13
	Potencia eléctrica (kW)	8.84		Potencia eléctrica (kW)	10.39
Diesel al 15 % y Syngas	Flujo volumétrico de diesel (m^3/s)	$3.35 * 10^{-7}$	Diesel al 15 % y Syngas	Flujo volumétrico de diesel (m^3/s)	$3.93 * 10^{-7}$
	Flujo volumétrico de syngas (m^3/s)	0.0102		Flujo volumétrico de syngas (m^3/s)	0.0120
	Potencia Mecánica (kW)	12.09		Potencia Mecánica (kW)	14.20
	Potencia eléctrica (kW)	9.67		Potencia eléctrica (kW)	11.36

Fuente: Elaboración propia.

- **Reducción de potencia en el motor**

La potencia eléctrica de los motores seleccionados depende del porcentaje de combustible piloto, como se indica en la gráfica para un funcionamiento con solo syngas (0% diesel) se obtiene la potencia menor y va aumentando conforme aumenta el porcentaje de combustible piloto como se muestra en la figura 35.

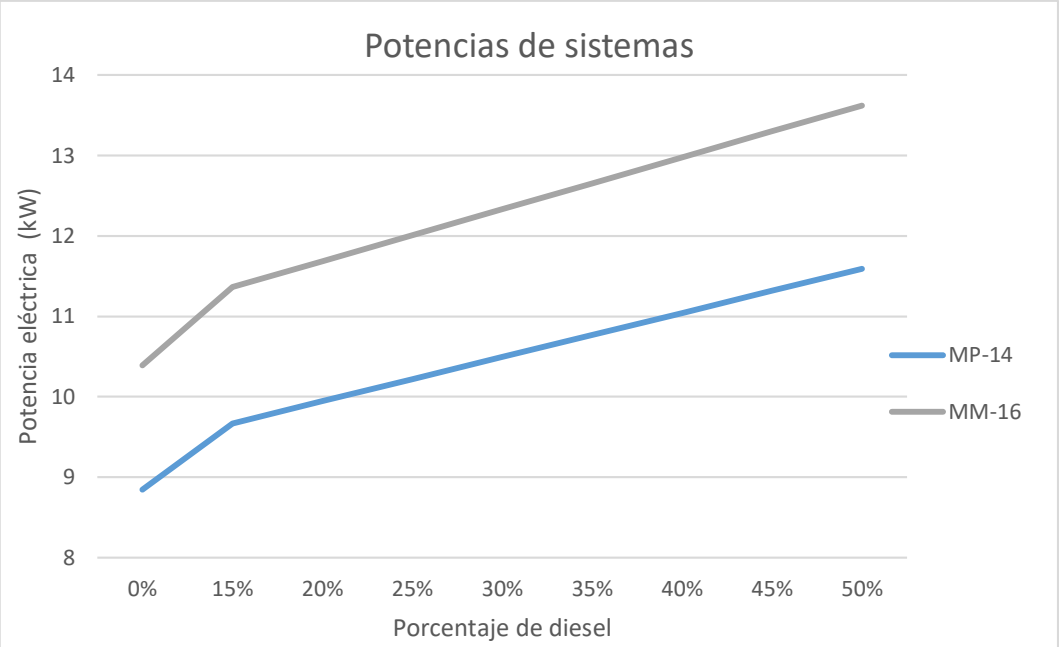


Figura 35. Potencia eléctrica de motor seleccionado.
Fuente: Elaboración propia.

Al emplear syngas como combustible en su totalidad o en un porcentaje para el funcionamiento de un motor es de esperar una reducción de la potencia en comparación con la potencia obtenida al emplear diesel en su totalidad.

En la figura 36 se indica el porcentaje de reducción de potencia para los motores que han sido seleccionados. Se ha considerado un intervalo de que va desde 0% de diesel (solo syngas) hasta 50% de diesel en reemplazo.

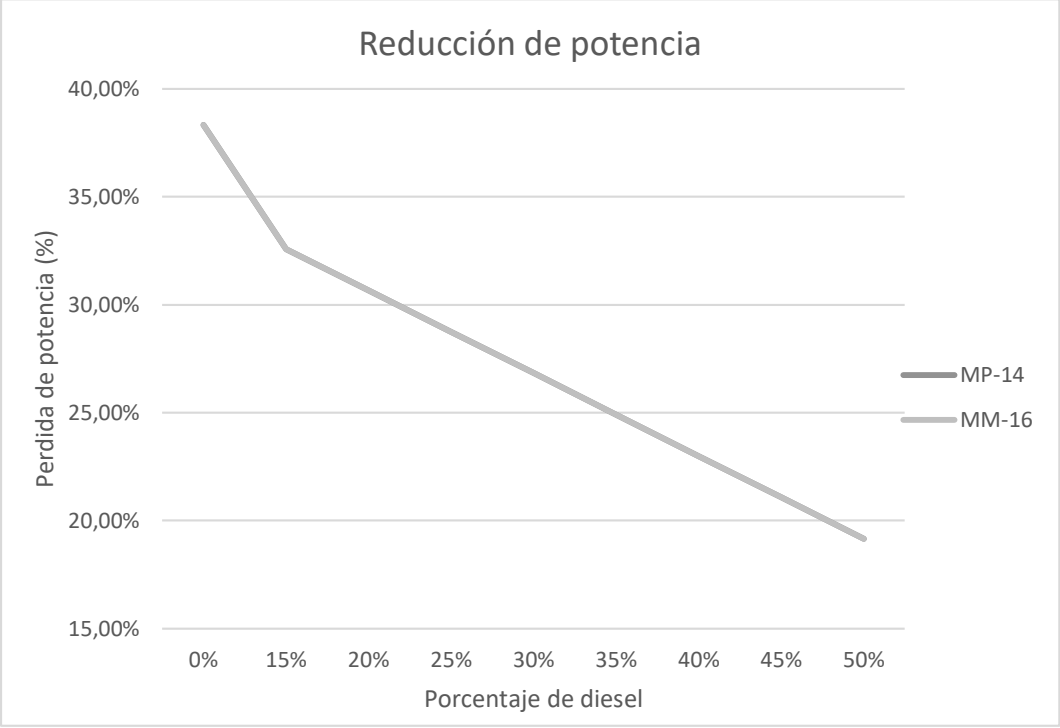


Figura 36. Reducción de potencia según motor seleccionado.
Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Después de realizar el análisis y la selección del sistema moto-generador a emplear para el funcionamiento con syngas para el aprovechamiento energético de las hojas de caña de azúcar y el bagazo de caña de azúcar, se obtienen diversas conclusiones:

Respecto a la implementación del sistema

- El uso de syngas para la producción de potencia mecánica en una tecnología probada ya hace varios años, pero su uso actual es limitado debido a su dificultad en la implementación y la existencia de combustibles convencionales, los cuales presentan una alternativa más sencilla y eficiente.

- La implementación de esta tecnología es viable si se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y si se tiene a disposición gran cantidad de recursos gasificables. Se puede aplicar sin inconvenientes en zonas de abundantes residuos agrícolas que no cuentan con un suministro de energía.

Respecto al syngas

- La gasificación realizada con aire produce syngas con poderes caloríficos que van en el intervalo de 4 a 6 MJ/m^3 y está compuesto, principalmente de CO(15-32%),H_2(4-22%) y CH_4(0-4%), el resto son gases inertes.

- El poder calorífico del syngas depende, directamente, del agente gasificante utilizado durante el proceso de gasificación, la temperatura de gasificación y del tipo de biomasa empleado.

- Los componentes de mayor influencia en el poder calorífico del syngas son el metano, el monóxido de carbono y por último el hidrógeno, los cuales causan un aumento considerable en el poder calorífico del syngas.

- Cuando se trabaja con mezcla estequiométrica es deseable que el syngas tenga bajo contenido de hidrógeno y alto contenido de monóxido de carbono o metano para que la temperatura de autoinflamación de la mezcla sea lo más alta posible y la relación volumétrica de compresión no esté tan limitada.

- Es de gran importancia depurar y enfriar el syngas que ingresará al motor de combustión interna para evitar el autoencendido del syngas, antes del ingreso a la cámara de combustión, y el deterioro anticipado en el motor.

Respecto a motores de combustión interna.

- Los motores de combustión interna son la tecnología que presenta una mejor relación costo-eficiencia, además son de fácil accesibilidad en el país, por ende son los más aptos para trabajar con syngas.

- La potencia de un motor funcionando con gas de síntesis depende: del poder calorífico del gas, la cantidad de mezcla que ingresa al motor y la eficiencia con que el motor transforma la energía térmica en mecánica.

- La velocidad máxima de los motores alimentados con gas pobre viene limitada por la velocidad de combustión de la mezcla combustible de gas pobre y aire. Como esta velocidad es baja, en comparación con las mezclas combustibles de gasolina y aire los motores alimentados con gas pobre suelen funcionar, generalmente, por debajo de 2500 rpm.

- Los motores utilizados para trabajar con syngas pueden ser Otto o Diesel, pero existen diversas modificaciones que se habrían que realizar en el motor para su funcionamiento con syngas, sin embargo dependen de los parámetros del motor y de ensayos experimentales, los cuales no se pudieron dar durante el estudio debido a que no se contó con un motor.

- En los motores de encendido por chispa, el gas pobre puede sustituir el 100% del combustible, en algunos casos se puede utilizar un motor Diesel con syngas al 100% pero habría que implementar un mezclador y un sistema de ignición por chispa.

- Las modificaciones realizadas en un motor Otto requieren una serie de ajustes en el sistema de entrada de aire mezclando, simplemente, el gas de síntesis con el aire, realizando la mezcla en su camino al colector de admisión, es necesario adelantar el punto de encendido (10° o 15°).

- Las modificaciones realizadas en un motor Diesel es una adaptación, la cual permita un funcionamiento con la mezcla de dos combustibles: gas de síntesis y diesel, como combustible piloto, para el encendido de la mezcla, además es necesario adelantar el punto de inyección , aproximadamente, 10 ° y controlar la cantidad de combustible piloto que se inyectará.

- Al modificar un motor Diesel para un funcionamiento con 100% de syngas las modificaciones se complican y los costos aumentan debido a que, principalmente, se tendría que implementar un sistema de encendido por chispa.

- Al operar los motores Diesel con mayores relaciones volumétricas de compresión, su funcionamiento con syngas debe ser de doble combustible (sustitución de hasta el 85% del Diesel), el combustible auxiliar permitirá iniciar

el encendido de la mezcla. Al emplear el sistema de doble combustible y en caso de un mal funcionamiento del gasificador es posible un cambio inmediato de combustible, operando el motor totalmente con Diesel.

- Para motores que funcionan con doble combustible (syngas-diesel) es posible trabajar con relaciones de compresión de hasta 16,5:1. En cambio, para motores de encendido por chispa se tienen relaciones de compresión entre 6:1 y 8:1 por problemas de autoencendido. Por lo tanto los motores modificados para funcionar con doble combustible son los mejores para trabajar con syngas, pues mejora el rendimiento porque permite trabajar con mayores relaciones volumétricas de compresión y porque garantiza una transformación (térmica-mecánica) más completa del combustible.

- Los motores Diesel al trabajar con doble combustible permiten flexibilidad en cuanto a la calidad de mezcla suministrada y cantidad de syngas suministrado. Además permiten trabajar con mezclas más pobres (con exceso de aire)

- El poder calorífico del gas fija la máxima potencia que se puede generar con un determinado motor, por lo tanto, para generar igual potencia, al funcionar con syngas es necesario usar motores de mayor tamaño que los usados con los combustibles convencionales.

- En el caso de convertir motores convencionales en motores para trabajar con syngas, es necesario estudiar muy bien cómo hacer la regulación de la mezcla, pues hay alternativas sencillas hasta sofisticadas y complejas.

- Para generar la máxima potencia con syngas en un determinado motor, es necesario aumentar al máximo el poder calorífico del syngas, reducir al mínimo las pérdidas en la tubuladura de admisión, lograr una máxima relación volumetrica de compresión e incluso sobrealimentar el motor.

Respecto a los resultados obtenidos con datos teóricos

- Los resultados teóricos indican que el poder calorífico del syngas empleando bagazo de caña es mayor en 2.9% que el syngas obtenido de la hoja de caña debido a la diferencia del contenido de metano en el syngas, por ello se observa una pequeña diferencia en las potencias disponibles siendo más favorable para el syngas de bagazo de caña.

- La cilindrada o capacidad máxima del motor que puede ser alimentada se ve limitada por la capacidad del gasificador, por las revoluciones por minuto que puede tener el motor y la relación aire-syngas, la cual depende de la biomasa empleada. Para las revoluciones por minuto se tomó 1500 y 1800, la capacidad del gasificador se definió como el flujo máximo de syngas que puede generar ($0.0167\ m^3/s$) y la relación aire-combustible volumétrica fue mayor para el bagazo de caña, por lo cual si se emplea este tipo de biomasa se obtendrá una capacidad mayor para el motor en comparación con la biomasa obtenida a partir de hoja de caña.

- Para funcionamiento con doble combustible (syngas-diesel) es necesario seguir las siguientes opciones dependiendo de la capacidad del motor a emplear: que el porcentaje de diesel se de en aumento o que se de en reemplazo, para la primera se logra aumentar la capacidad y potencia del motor dependiendo del porcentaje de diesel, y para la segunda la capacidad es constante pero la potencia aumenta dependiendo también del porcentaje de diesel.

Respecto a los resultados obtenidos con datos experimentales

- Las temperaturas permaneciendo el soplador a 10 Hz llegaron a ser las deseadas (mayores a 600 °C) en la bauxita y arena, sin embargo la tasa de transferencia de calor se incrementa al momento de aumentar la frecuencia del soplador y cerrar la entrada de gas propano aumentó ocasionando descenso en la temperaturas en un corto tiempo.

- El resultado del poder calorífico del syngas de hoja de caña, empleando los resultados registrados por el analizador de gases, se ve reducido en 20 % en comparación con el poder calorífico obtenido mediante datos teóricos. Lo que se traduce en una reducción considerable de la potencia disponible y una reducción de la capacidad del motor a alimentar.

- Empleando los modelos de sistemas moto-generadores MP-14 y MM-16 se espera una reducción de potencia de 38% (solo empleando syngas) y una reducción de 32% (empelando syngas-diesel al 15%), sin embargo se deberán realizar pruebas en un banco de ensayo de motores para poder verificar los resultados obtenidos.

Recomendaciones

- Con la solución de la problemática presente en el gasificador como: fugas y encendido de la biomasa antes de ingresar se podría llegar a mejorar la calidad del syngas a la salida del gasificador y lograr tomar medidas del flujo volumétrico de syngas a la salida.

- Es recomendable conseguir el diámetro aproximado de partículas sólidas a fluidizar según el diseño del gasificador (0.379 mm) debido a que la arena que fue empleada es de un diámetro menor y comienza a fluidizar con baja frecuencia, mientras que a 60 Hz fluidiza excesivamente y un porcentaje de arena se va por el ciclón.

- El sensor de hidrocarburos con el que cuenta internamente el analizador de gases marca MADUR tiene una capacidad máxima de 2,5%, por lo cual presenta una variable limitante en la medición de un componente principal en el syngas (con el cual varían resultados de la caracterización del syngas) debido a que la cantidad de metano para este caso podría llegar a 4%.

- Es necesario buscar otras alternativas de encendido de la mezcla aire y gas propano dentro del gasificador, de preferencia la mezcla debe encender a una frecuencia mínima de 40 Hz para evitar el descenso de temperaturas causadas por la convección forzada del flujo de aire que ingresa al gasificador cuando se

aumenta la frecuencia del soplador, con ello se espera tener temperaturas más constantes, mayor autonomía en el gasificador y mejor calidad del syngas.

- Las posibles modificaciones a realizar en los motores seleccionados se basan en la implementación de un sistema de doble combustible, en el cual se puede regular la inyección de diesel y syngas, además se debe retrasar al inyección del combustible y reducir la relación volumétrica de compresión ya sea colocando una doble empaquetadura o bien rectificando cilindros, sin embargo estas modificaciones están sujetas a pruebas experimentales .Si no se tiene a disposición los motores seleccionados, se puede recurrir a algún otro que cumpla con los parámetros básicos descritos en el capítulo 4.

Bibliografía

[1] R. Saavedra Garcia Zabaleta, «Clasificación y campo de aplicación de los motores alternativos de combustión interna (MACI),» Perú, 2016.

[2] J. González Velasco, Energías renovables, Barcelona, España: Reverté, 2009.

[3] A. Creus Sole, Energías renovables, España: Ceysa, 2004.

[4] «Energías renovables 2016 informe de la situación mundial,» España, 2016.

[5] D. Garcia Galindo, A. Rezeau y F. Sebastián Nógues, Energía de la biomasa (Volumen 1), Zaragoza: Prensas universitarias, 2010.

[6] R. Rauch, J. Hrbek y H. Hofbauer, «Biomass gasification for synthesis gas production and applications of the syngas,» John Wiley & Son s, Ltd., United States, 2014.

[7] F. Esparza, «Combustibles sólidos,líquidos y gaseosos,» España, 2012.

[8] N. E. Fonseca Gonzales, «Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa (GG) en motores de combustión interna alternativos,» Publicación Ciemat, Colombia, 2013.

[9] P. McKendry, «Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies,» *Bioresource Technology 83*, pp. 55-63, 2002.

[10] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), «El gas de madera como combustible para motores,» Roma, 1993.

[11] H. List y A. Schnurle, «Fascículo V : Motores de gas,» de *Motores de combustión interna.*, Barcelona, España, Labor, 1944, p. 130.

[12] S. Pedrazzi, G. Allesina, N. Morselli, M. Puglia, C. Leonardi, C. Rinaldini, T. Savioli y E. Mattarelli, «Modified Diesel engiene fueled by syngs: modeling and validation,» Italia, 2016.

[13] C. A. Rinaldini, G. Allesina, S. Pedrazzi, E. Mattarelli, T. Savioli, N. Morselli, M. Puglia y P. Tartarini, «Experimental investigation on a Common Rail Diesel engine partially,» ELSVIER, Italia, 2016.

[14] Universidade de Oriente, Centro de Estudios de Eficiencia Energética, Cuba, «Uso del gas pobre en motores de combustión interna para la generación de electricidad en Cuba» Florianópolis, Cuba, 2014.

[15] J. Estremadoyro-Ruiz, «Análisis de Factibilidad para Producción de Energía Utilizando un Gasificador de Hojas de Caña de Azucar» Repositorio institucional Pirhua, Perú, 2015.

[16] G. Cabrera, S. Madriñan y D. Muñoz, «Caracterización del Gas de Síntesis obtenido a partir de algarrobo y bagazo de caña», Biotecnología en el sector agropecuario y agroindistrial, vol. 10, pp. 166-172, 2012.

[17] Universidad de Santiago de Chile, «Poder Calorífico,» Chile, 2013.

[18] T. Callan, T. Ryan y S. King, «Engine Knock Rating of Natural Gases-Methane Number,» Estados Unidos, 1993.

[19] R. Garcia Valladolid, «Desarrollo de Metodología para validación Experimental de un Gasificador de Lecho Fluidizado Burbujeante,» Piura, 2017.

[20] D. Martín Pérez, «Diseño de un Gasificador de Pequeña Potencia Eléctrica,» Barcelonatech, Barcelona, España, 2014.

[21] R. Rodriguez Cussó, «Análisis y Adaptación de Motores Ciclo Otto y Diesel Operando con Biogás,» UPC, Cataluña, España, 2011.

[22] Lesmes Corredor y D. H. Pino, «Sistemas de Cogeneración de Baja Potencia Accionados con Gasificadores de Biomasa,» Barranquilla-Colombia, 2006.

[23] O.-C. J., «Aplicación del gasógeno y del Biogás al accionamiento de combustión interna,» ETSIng, Madrid, España, 1980.

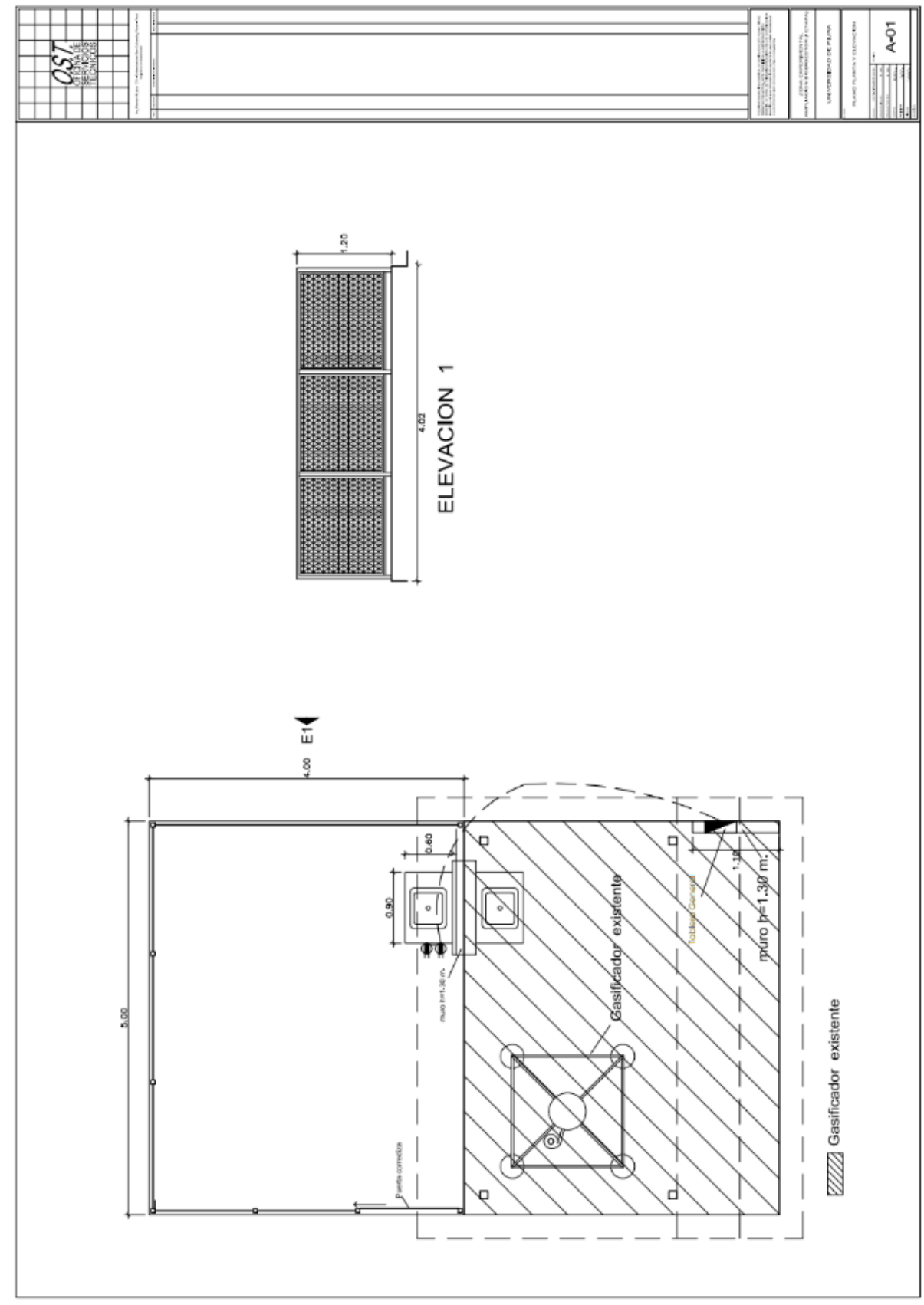
[24] O. Nordström, «Account of research and testing activities in the producer gas field at the National Swedish Testing Institute for Agricultural Machinery during 1951-1962,» Statens Maskinprovningar, Sweden, 1963.

[25] R. Lesme-Jaén, L. Garcia-Faure, L. Oliva-Ruiz, J. Pajarín-Rodríguez y D. Revilla-Suarez, «Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del proceso.» TecnologíaQuímica, Cuba, 2016.

[26] C. Ji, X. Dai, S. Wang, C. Liang, B. Ju y X. Liu, «Experimental study on combustion and emissions,» ELSEVIER, China, 2013.

Anexos

Anexo A: Plano de planta piloto de gasificación



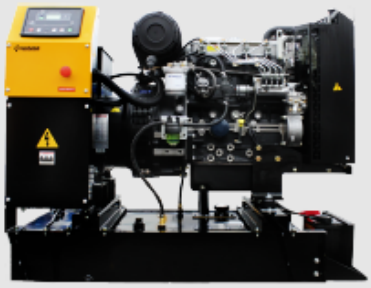
Anexo B: Fichas técnicas de modelos de sistemas moto-generadores.

Grupo Electrógeno MP-14

modasa

MODELO	POTENCIA PRIME	POTENCIA STAND BY	VOLTAJE	FRECUENCIA	FACTOR DE POTENCIA	AMPERAJE
MP-14	12 Kw/15 KVA	13 Kw/16.3 KVA	220V	60Hz	0.8	43 A
MP-14	10.2 Kw/12.7 KVA	11.2 Kw/14 KVA	380V	60Hz	0.8	22 A
MP-14Q	10 Kw/12.5 KVA	10.9 Kw/13.6 KVA	380V	50Hz	0.8	21 A

GRUPO ELECTRÓGENO INSONORO



GRUPO ELECTRÓGENO ABIERTO

* Nota: Imágenes referenciales, pueden variar dependiendo de los accesorios

Datos Técnicos

Grupo Electrógeno

Modelo	MP-14	
Motor	Perkins 403D-15G	
Alternador	STAMFORD PI 044F	
Módulo de control	Electrónico	
Fases	Trifásico	
Tanque combust. abierto/insonoro	11 Galones / 22 Galones	
Sistema Eléctrico	12V.	
Frecuencia	60Hz	50Hz
Radiador flujo aire	35 m3/min	25 m3/min
Combustión flujo aire	1.23 m3/min	1.10 m3/min
Gases de escape flujo	3.36 m3/min	2.90 m3/min
Temperatura gases escape	505°C	490°C

Nivel de Ruido G.E.	Máximo	Ambiente
Insonoro @ 7m	70 +/- 2 dBA	54 dBA

Motor

Número de cilindros	3 En Linea
Sistema de Gobernación	Mecánica
Ciclo	4 Tiempos
Aspiración	Natural
Combustible	Diesel
Sist. Combustión	Inyección Indirecta
Sist. Enfriamiento	Agua
Diámetro pistón	84.00 mm
Desplazamiento pistón	90.00 mm
Capacidad	1496cc
Relación compresión	22.5:1
Cap. Sist. Lubricación	6.00 litros
Cap. Sist. Refrigeración	6.00 litros

Consumo de Combustible		
Velocidad del motor	1800 RPM l/h	1500 RPM l/h
Potencia Stand by (2)	4.90	4.10
Potencia Prime (1)	4.40	3.70
75% Potencia Prime (1)	3.40	2.80
50% Potencia Prime (1)	2.50	2.00

Alternador

Aislamiento	Clase "H"
Sistema de excitación	Propia
Tarjeta reguladora voltaje	AS480 ± 1.0%
Grado de Protección	IP 23

Normas Técnicas

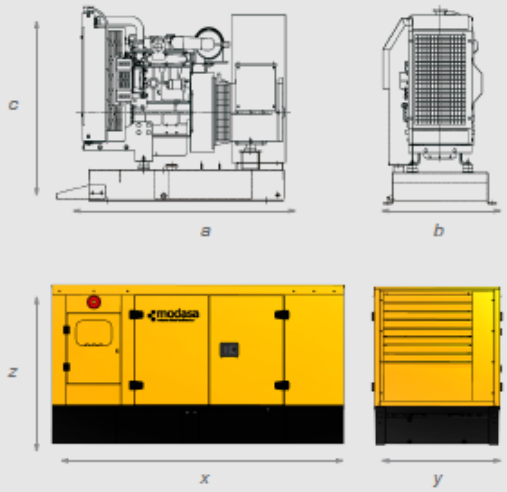
Motor :	ISO 3046, ISO 8525-5
Alternador :	UTF NFC 51-111-105-110 IEC 34-1,BS 5000 4999 NEMA MG 21, VDE 0530
Grupo Electrógeno :	ISO 8528

(1) Potencia Prime: Potencia disponible con carga variable durante un número ilimitado de horas al año (ISO8528-1). Acepta sobrecargas de 10% más d e la potencia por una hora cada 12 horas.
(2) Potencia Stand By: Potencia disponible con carga variable para el caso en que la red comercial falle. No acepta sobrecargas (ISO8528-3); tiene un límite de uso de 500 horas anuales o 300 horas continuas.

SGS

Dimensiones

Dimensiones y Pesos	a	b	c	Peso	Ø Esc.
	1295 mm	748 mm	991 mm	450 Kg	2"
	x	y	z	Peso	Ø Esc.
	1810 mm	939 mm	1027 mm	690 Kg	2"



Tablero de Control

Equipado con módulo de control digital electrónico de última generación, permite el arranque, control, protección y parada del grupo electrógeno en los modos manual y automático.

Mediciones con caracteres alfa numéricos a visualizar en la pantalla digital:

- *Nivel de combustible en porcentaje*
- *Temperatura de refrigerante.*
- *Presión de aceite.*
- *Horas de operación.*
- *Voltaje de batería.*
- *Velocidad de giro.*
- *Frecuencia.*
- *Corriente de las tres fases L1, L2, L3.*
- *Voltaje de las tres fases L - L y L - N.*

Opcionales

- *EBS.*
- *Potenciometro remoto de velocidad o voltaje.*
- *Diversos voltajes.*
- *Cargador de batería.*
- *Tablero secuencial.*
- *Resistencia deshumedecedora del alternador.*
- *Calentador de agua de monoblock.*
- *Silenciador Residencial, crítico. (incluido en GE insonoro)*

Protecciones:

- *Diagnóstico CAN.*
- *Falla por sobrecarga.*
- *Falla para alcanzar frecuencia de carga.*
- *Falla para alcanzar voltaje de carga.*
- *Parada de emergencia.*
- *Bajo / Alto voltaje de batería.*
- *Bajo/Alto voltaje del generador.*
- *Baja/Alta velocidad.*
- *Alta temperatura del motor.*
- *Baja presión de aceite.*
- *Falla de paro.*
- *Falla de arranque.*

M: Modasa / P: Motor Perkins / 14 : Potencia referencial del G.E. / G: 50 Hz 1500 RPM / I: Insonoro / M: Monofásico

Grupo Electrógeno MM-16

MODELO	POTENCIA		VOLTAJE	FRECUENCIA	FACTOR DE POTENCIA	AMPERAJE
	PRIME	STAND BY				
MM-16	13.7 Kw/17.1 KVA	15.1 Kw/18.9 KVA	220V	60Hz	0.8	50 A
MM-16Q	11.1 Kw/13.9 KVA	12.2 Kw/15.2 KVA	380V	50Hz	0.8	24 A

GRUPO ELECTRÓGENO INSONORO

GRUPO ELECTRÓGENO ABIERTO

* Nota: Imágenes referenciales, pueden variar dependiendo de los accesorios

Datos Técnicos

Grupo Electrógeno

Modelo	MM-16	
Motor	MITSUBISHI S4L2	
Alternador	STAMFORD PI 044G	
Módulo de control	Electrónico	
Fases	Trifásico	
Tanque combust. abierto/insonoro	11 Galones / 40 Galones	
Sistema Eléctrico	12V.	
Frecuencia	60Hz	50Hz
Radiador flujo aire	54 m3/min	46 m3/min
Combustión flujo aire	1.30 m3/min	1.20 m3/min
Gases de escape flujo	3.50 m3/min	3.20 m3/min
Temperatura gases escape	430°C	430°C

Nivel de Ruido G.E.	Máximo	Ambiente
Insonoro @ 7m	71 +/- 0 dBA	56 dBA

Motor

Número de cilindros	4 En Linea
Sistema de Gobernación	Mecánica
Ciclo	4 Tiempos
Aspiración	Natural
Combustible	Diesel
Sist. Combustión	Inyección directa
Sist. Enfriamiento	Agua
Diámetro pistón	78.00 mm
Desplazamiento pistón	92.00 mm
Capacidad	1758cc
Relación compresión	22:1
Cap. Sist. Lubricación	6.00 litros
Cap. Sist. Refrigeración	4.90 litros

Consumo de Combustible		
Velocidad del motor	1800 RPM l/h	1500 RPM l/h
Potencia Stand by (2)	5.10	5.10
Potencia Prime (1)	4.60	4.60
75% Potencia Prime (1)	3.50	3.50
50% Potencia Prime (1)	2.30	2.30

Alternador

Aislamiento	Clase "H"
Sistema de excitación	Propia
Tarjeta reguladora voltaje	AS480 ± 1.0%
Grado de Protección	IP 23

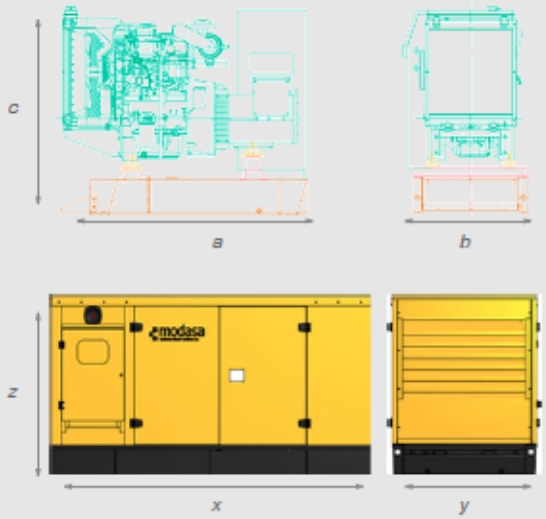
Normas Técnicas

Motor :	ISO 3046, BS 5514, DIN 6271
Alternador :	UTF NFC 51-111-105-110 IEC 34-1,BS 5000 4999 NEMA MG 21, VDE 0530
Grupo Electrógeno :	ISO 8528

(1) Potencia Prime: Potencia disponible con carga variable durante un número ilimitado de horas al año (ISO8528-1). Acepta sobrecargas de 10% más d e la potencia por una hora cada 12 horas.
(2) Potencia Stand By: Potencia disponible con carga variable para el caso en que la red comercial falle. No acepta sobrecargas (ISO8528-3); tiene un límite de uso de 500 horas anuales o 300 horas continuas.

Dimensiones

Dimensiones y Pesos	a	b	c	Peso	Ø Esc.
	1295 mm	706 mm	947 mm	490 Kg	2"
	x	y	z	Peso	Ø Esc.
	1957 mm	939 mm	1077 mm	780 Kg	3"



Tablero de Control

Equipado con módulo de control digital electrónico de última generación, permite el arranque, control, protección y parada del grupo electrógeno en los modos manual y automático.

Mediciones con caracteres alfa numéricos a visualizar en la pantalla digital:

- Nivel de combustible en porcentaje
- Temperatura de refrigerante.
- Presión de aceite.
- Horas de operación.
- Voltaje de batería.
- Velocidad de giro.
- Frecuencia.
- Corriente de las tres fases L1, L2, L3.
- Voltaje de las tres fases L - L y L - N.

Opcionales

- EBS.
- Potenciometro remoto de velocidad o voltaje.
- Diversos voltajes.
- Cargador de batería.
- Tablero secuencial.
- Tablero de transferencia automática.
- Sonda térmica de protección de estator.
- Resistencia deshumedecedora del alternador.
- Calentador de agua de monoblock.
- Tubo flexible de acero inoxidable (incluido en el GE insonoro)
- Silenciador Residencial, crítico. (incluido en GE insonoro)

Protecciones:

- Diagnóstico CAN.
- Falla por sobrecarga.
- Falla para alcanzar frecuencia de carga.
- Falla para alcanzar voltaje de carga.
- Parada de emergencia.
- Bajo / Alto voltaje de batería.
- Bajo/Alto voltaje del generador.
- Baja/Alta velocidad.
- Alta temperatura del motor.
- Baja presión de aceite.
- Falla de paro.
- Falla de arranque.

M: Modasa / M: Motor MITSUBISHI / 16 : Potencia referencial del G.E. / G: 50 Hz 1500 RPM / I: Insonoro / M: Monofásico

Grupo Electrógeno MM-24

MODELO	POTENCIA PRIME	POTENCIA STAND BY	VOLTAJE	FRECUENCIA	FACTOR DE POTENCIA	AMPERAJE
MM-24	20 Kw/28 KVA	22 Kw/28 KVA	220V	60Hz	0.8	74 A
MM-24Q	17 Kw/22 KVA	18.4 Kw/23 KVA	380V	50Hz	0.8	35 A

GRUPO ELECTRÓGENO INSONORO

GRUPO ELECTRÓGENO ABIERTO

* Nota: Imágenes referenciales, pueden variar dependiendo de los accesorios

Datos Técnicos

Grupo Electrógeno

Modelo	MM-24	
Motor	MITSUBISHI S4Q2	
Alternador	STAMFORD PI 144E	
Módulo de control	Electrónico	
Fases	Trifásico	
Tanque combust. abierto/insonoro	34 Galones / 39 Galones	
Sistema Eléctrico	12V.	
Frecuencia	60Hz	50Hz
Radiador flujo aire	60 m3/min	48 m3/min
Combustión flujo aire	2.10 m3/min	1.70 m3/min
Gases de escape flujo	5.30 m3/min	4.50 m3/min
Temperatura gases escape	600°C	600°C

Nivel de Ruido G.E.	Máximo	Ambiente
Insonoro @ 7m	71 +/- 2 dBA	56 dBA

Motor

Número de cilindros	4 En Linea
Sistema de Gobernación	Mecánica
Ciclo	4 Tiempos
Aspiración	Natural
Combustible	Diesel
Sist. Combustión	Inyección directa
Sist. Enfriamiento	Agua
Diámetro pistón	88.00 mm
Desplazamiento pistón	103.00 mm
Capacidad	2505cc
Relación compresión	22:1
Cap. Sist. Lubricación	6.50 litros
Cap. Sist. Refrigeración	5.80 litros

Consumo de Combustible		
Velocidad del motor	1800 RPM l/h	1500 RPM l/h
Potencia Stand by (2)	7.30	7.30
Potencia Prime (1)	6.60	6.60
75% Potencia Prime (1)	5.00	5.00
50% Potencia Prime (1)	3.30	3.30

Alternador

Aislamiento	Clase "H"
Sistema de excitación	Propia
Tarjeta reguladora voltaje	AS480 ± 1.0%
Grado de Protección	IP 23

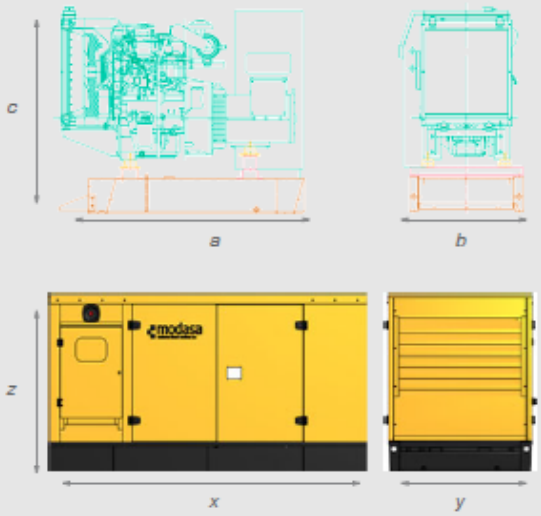
Normas Técnicas

Motor :	ISO 3046, BS 5514, DIN 6271
Alternador :	UTF NFC 51-111-105-110 IEC 34-1,BS 5000 4999 NEMA MG 21, VDE 0530
Grupo Electrógeno :	ISO 8528

(1) Potencia Prime: Potencia disponible con carga variable durante un número ilimitado de horas al año (ISO8528-1). Acepta sobrecargas de 10% más d e la potencia por una hora cada 12 horas.
(2) Potencia Stand By: Potencia disponible con carga variable para el caso en que la red comercial falle. No acepta sobrecargas (ISO8528-3); tiene un límite de uso de 500 horas anuales o 300 horas continuas.

Dimensiones

Dimensiones y Pesos	a	b	c	Peso	Ø Esc.
	1492 mm	788 mm	1099 mm	530 Kg	2"
	x	y	z	Peso	Ø Esc.
	2150 mm	939 mm	1077 mm	800 Kg	3"



Tablero de Control

Equipado con módulo de control digital electrónico de última generación, permite el arranque, control, protección y parada del grupo electrógeno en los modos manual y automático.

Mediciones con caracteres alfa numéricos a visualizar en la pantalla digital:

- *Nivel de combustible en porcentaje*
- *Temperatura de refrigerante.*
- *Presión de aceite.*
- *Horas de operación.*
- *Voltaje de batería.*
- *Velocidad de giro.*
- *Frecuencia.*
- *Corriente de las tres fases L1, L2, L3.*
- *Voltaje de las tres fases L - L y L - N.*

Opcionales

- *EBS.*
- *Potenciometro remoto de velocidad o voltaje.*
- *Diversos voltajes.*
- *Cargador de batería.*
- *Tablero secuencial.*
- *Tablero de transferencia automática.*
- *Sonda térmica de protección de estator.*
- *Resistencia deshumedecedora del alternador.*
- *Calentador de agua de monoblock.*
- *Tubo flexible de acero inoxidable (incluido en el GE insonoro)*
- *Silenciador Residencial, crítico. (incluido en GE insonoro)*

Protecciones:

- *Diagnóstico CAN.*
- *Falla por sobrecarga.*
- *Falla para alcanzar frecuencia de carga.*
- *Falla para alcanzar voltaje de carga.*
- *Parada de emergencia.*
- *Bajo / Alto voltaje de batería.*
- *Bajo/Alto voltaje del generador.*
- *Baja/Alta velocidad.*
- *Alta temperatura del motor.*
- *Baja presión de aceite.*
- *Falla de paro.*
- *Falla de arranque.*

M: Modasa / M: Motor MITSUBISHI / 24 : Potencia referencial del G.E. / G: 50 Hz 1500 RPM / I: Insonoro / M: Monofásico

RONSUN POWER | **Gas Genset Manufacturer**

QUOTATION & DATA SHEET

LH-10GFT 10KW biomass gas Generator

隆盛动力 RONSUN

Quotation

Product Description		Quantity	Unit Price	CIF PERU Total Prices
10KW biomass gas genset		**1**	**$6,480**	**$6,480**
Options	Auto-Grid controller	1	$1,500	$1,500
	Soundproof canopy	1	$1,020	$1,020
Total : SAY US DOLLAR EIGHT THOUSAND FIVE HUNDRED ONLY				$8,500.00

1). Trade terms :CIF PERU

2). Lead time : 15 working days(open type) / 20 working days (soundproof type genset)

3).Payment terms : 30% deposit,the 70% balance payment shall be paid before shipping

4) Warranty : 12 months after delivery or 3,000 running hours

Basic Characteristic

RONSUN 10GFT is professional designed products ,adopted and developed new technology for combustion chamber and ignition control system .

- ✓ **RONSUN** integration technology and many control systems for safe operation
- ✓ **Smartgen** automatic genset controller
- ✓ **SUNVIM** single bearing, self-excited and self regulated brushless alternator at 0.8 power factor

Supplying Scope (Optional items are highlighted with yellow color)

✓ 10KW biomass gas genset	✓ Soundproof canopy	✓ Batteries	
✓ Spare parts	✓ Pressure regulator	✓ Battery charger	
✓ Operation manual.	✓ Auto-Grid controller	✓ Tool kit	

RONSUN POWER Gas Genset Manufacturer

DATA SHEET

Complete Genset

Genset Model	LH-10GFT
Rated electrical output	10KW
Rated frequency	50Hz
Rated voltage	400V/230V
Power factor	0.8
Insulation class	H
Protection grade	IP23

Weight & Sizes

Sizes(soundproof type)	2100*1100*1400mm
weight(soundproof type)	970kg
Sizes(open type)	1650*720*1250mm
weight(open type)	650kg

Fuel Gas Supply

Fuel Type	biomass gas
Required Heat Value	≥1,100kcal/Nm³
Gas Pressure	3-50kPa
Max. Fuel Gas Temperature	40 °C
Vapour Component	≤40g/Nm³
Mixer Brand	RONSUN
Pressure Regulator Brand	MADAS(Italy)

Color Design

Gas engine&Alternator	Blue
Soundproof canopy color	Green
Base frame	Black

Gas Engine

Brand	RONSUN
Engine Model	LS26-25G
Engine rated power	15kW
Number of cylinders	4
Ignition/control system	RONSUN
Cylinder layout	In-Line
Bore*Stroke	90X105mm
Displacement	2.5L
Compression ratio	11.5:1
Rated speed	1500 rpm
Lube oil class	15W40CF
Lube oil capacity	12L
Coolant capacity	16L
DC alternator	24V
DC starter	DC24V
Air intake method	Natural Aspirated

Alternator

Brand	SUNVIM
Model type	SV164C
Rated power	12.5kVA/10KW
Power factor	0.8
Voltage	400/230V
Frequency	50Hz
Enclosure protection	IP 23
Insulation class	H

Noise parameters

@1m(with soundproof canopy)	≤75dB
@1m(open type)	≤95dB

RONSUN POWER Gas Genset Manufacturer

Genset Control Cabinet

Cabinet Model	10KZY
Control model	Smartgen

✓	High temperature warning	✓	Fail to start alarm
✓	High temperature shutdown	✓	Fail to stop alarm
✓	Low oil pressure warning	✓	Speed display
✓	Low oil pressure shutdown	✓	Voltage display
✓	Over speed shutdown	✓	Load power display
✓	Load over current shutdown	✓	Running hours display
✓	Reverse power	✓	Remote control
✓	ECU communication fail	✓	RS485 communication

Photos&Views

	LEFT VIEW	FRONT VIEW	RIGHT VIEW
GENSET			
SLIENT CANOPY			

Anexo C: Datos de temperatura en el gasificador (Solo se muestran algunos)

#	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9	RPM del tornillo	Hz del soplador
1	28.90	30.70	37.10	50.70	50.90	32.40	36.60	22.80	23.60	0	10
2	29.00	30.70	69.00	105.20	74.90	87.20	90.30	28.10	23.50	0	10
3	28.40	30.70	97.60	139.00	135.60	115.10	113.30	30.40	22.50	0	10
4	29.10	30.60	126.30	167.70	163.10	139.50	134.50	33.10	23.20	0	10
5	29.10	30.60	126.30	167.70	163.10	139.50	134.50	33.10	23.20	0	10
6	29.20	30.60	450.70	462.20	450.30	396.40	328.60	72.10	23.20	0	10
7	31.10	450.80	739.40	957.10	963.50	939.30	841.20	399.90	24.90	0	13
8	31.10	450.80	739.40	957.10	963.50	939.30	841.20	399.90	24.90	0	13
9	27.70	451.10	739.40	957.10	964.20	940.10	842.90	399.40	24.70	0	13
10	27.90	451.40	739.10	957.80	964.20	940.90	843.60	400.80	24.20	0	13
11	27.90	451.40	739.10	957.80	964.20	940.90	843.60	400.80	24.20	0	13
12	28.10	451.90	737.80	957.40	965.20	942.10	844.70	399.80	24.80	0	13
13	311.00	712.80	846.80	863.00	857.90	858.70	794.30	264.70	195.50	0	13
14	311.00	712.80	846.80	863.00	857.90	858.70	794.30	264.70	195.50	0	13
15	311.00	712.80	846.80	863.00	857.90	858.70	794.30	264.70	195.50	0	13
16	311.00	712.80	846.80	863.00	857.90	858.70	794.30	264.70	195.50	0	13
17	311.00	712.80	846.80	863.00	857.90	858.70	794.30	264.70	195.50	0	13
18	291.90	713.10	846.80	862.20	856.90	858.00	793.70	260.00	195.70	299	40

19	291.90	713.10	846.80	862.20	856.90	858.00	793.70	260.00	195.70	299	40
20	291.90	713.10	846.80	862.20	856.90	858.00	793.70	260.00	195.70	299	40
21	291.90	713.10	846.80	862.20	856.90	858.00	793.70	260.00	195.70	299	40
22	291.90	713.10	846.80	862.20	856.90	858.00	793.70	260.00	195.70	299	40
23	291.90	713.10	846.80	862.20	856.90	858.00	793.70	260.00	195.70	299	40
24	291.90	713.10	846.80	862.20	856.90	858.00	793.70	260.00	195.70	299	40
25	291.90	713.10	846.80	862.20	856.90	858.00	793.70	260.00	195.70	299	40
26	291.90	713.10	846.80	862.20	856.90	858.00	793.70	260.00	195.70	299	40
27	233.00	606.60	659.80	740.20	770.80	784.50	746.00	257.40	256.90	299	40
28	233.00	606.60	659.80	740.20	770.80	784.50	746.00	257.40	256.90	299	40
29	233.00	606.60	659.80	740.20	770.80	784.50	746.00	257.40	256.90	299	40
30	269.60	589.30	630.50	706.90	758.70	757.60	730.70	244.90	272.00	300	40
31	269.60	589.30	630.50	706.90	758.70	757.60	730.70	244.90	272.00	300	40
32	269.60	589.30	630.50	706.90	758.70	757.60	730.70	244.90	272.00	300	40
33	269.60	589.30	630.50	706.90	758.70	757.60	730.70	244.90	272.00	300	40
34	269.60	589.30	630.50	706.90	758.70	757.60	730.70	244.90	272.00	300	40
35	269.60	589.30	630.50	706.90	758.70	757.60	730.70	244.90	272.00	300	40
36	269.60	589.30	630.50	706.90	758.70	757.60	730.70	244.90	272.00	300	40
37	256.20	569.80	584.60	631.80	692.70	711.90	704.80	253.60	306.50	299	40
38	258.90	569.40	581.40	631.80	685.20	706.40	701.80	243.60	316.80	299	40
39	258.90	569.40	581.40	631.80	685.20	706.40	701.80	243.60	316.80	299	40
40	258.90	569.40	581.40	631.80	685.20	706.40	701.80	243.60	316.80	299	40
41	258.90	569.40	581.40	631.80	685.20	706.40	701.80	243.60	316.80	299	40
42	258.90	569.40	581.40	631.80	685.20	706.40	701.80	243.60	316.80	299	40
43	266.90	571.70	576.20	601.90	664.30	693.70	696.10	235.30	340.60	299	40
44	266.90	571.70	576.20	601.90	664.30	693.70	696.10	235.30	340.60	299	40
45	267.50	572.60	576.40	599.70	660.80	689.50	695.60	231.20	347.90	300	40
46	267.50	572.60	576.40	599.70	660.80	689.50	695.60	231.20	347.90	300	40
47	267.50	572.60	576.40	599.70	660.80	689.50	695.60	231.20	347.90	300	40
48	81.30	310.30	311.90	334.50	374.60	406.20	429.00	204.60	348.70	299	40
49	81.30	310.30	311.90	334.50	374.60	406.20	429.00	204.60	348.70	299	40
50	81.30	310.30	311.90	334.50	374.60	406.20	429.00	204.60	348.70	299	40
51	81.30	310.30	311.90	334.50	374.60	406.20	429.00	204.60	348.70	299	40
52	81.30	310.30	311.90	334.50	374.60	406.20	429.00	204.60	348.70	299	40

Anexo D: Datos de la composición del syngas empleando hoja de caña

#	Time	Tgas	Tamb	O2	CO2	COu	Lambda	SL	ETA	IL	ETA1	CO	H2%	CHx	PRESS
	[hh:mm:ss]	°C	°C	%	%	%	_	%	%	%	%	%	%	ppm	hPa
1	12:02:17 p.m.	56.2	28.3	0	6.71	29.9	2.8	2.8	97.2	0	97.2	10.68	0	0	0.15
2	12:02:20 p.m.	56.4	28.3	0	6.71	29.88	2.8	2.9	97.1	0	97.1	10.67	5.52	0	0.16
3	12:02:23 p.m.	56.4	28.4	0	6.71	29.88	2.8	2.9	97.1	0	97.1	10.67	5.54	0	0.16
4	12:02:26 p.m.	56.5	28.5	0	6.71	29.93	2.8	2.9	97.1	0	97.1	10.69	5.57	0	0.16
5	12:02:29 p.m.	56.7	28.6	0	6.7	30.07	2.81	2.9	97.1	0	97.1	10.7	5.57	0	0.15
6	12:02:32 p.m.	56.3	28.5	0	6.7	30.1	2.81	2.8	97.2	0	97.2	10.71	5.56	0	0.16
7	12:02:35 p.m.	56.2	28.4	0	6.7	30.1	2.81	2.8	97.2	0	97.2	10.71	5.55	0	0.16
8	12:02:38 p.m.	56.2	28.5	0	6.71	29.93	2.8	2.8	97.2	0	97.2	10.69	5.51	0	0.16
9	12:02:41 p.m.	56.2	28.6	0	6.71	29.9	2.8	2.8	97.2	0	97.2	10.68	5.49	0	0.16
10	12:02:44 p.m.	56.3	28.5	0	6.73	29.77	2.79	2.8	97.2	0	97.2	10.67	5.43	0	0.17
11	12:02:47 p.m.	56.6	28.4	0	6.74	29.69	2.79	2.9	97.1	0	97.1	10.64	5.43	0	0.17
12	12:02:50 p.m.	56.5	28.5	0	6.74	29.66	2.79	2.8	97.2	0	97.2	10.63	5.43	0	0.16
13	12:02:53 p.m.	56.3	28.6	0	6.75	29.6	2.79	2.8	97.2	0	97.2	10.61	5.42	0	0.17
14	12:02:55 p.m.	56	28.6	0	6.77	29.47	2.78	2.8	97.2	0	97.2	10.6	5.39	0	0.18
15	12:02:58 p.m.	56.3	28.5	0	6.78	29.31	2.77	2.8	97.2	0	97.2	10.58	5.38	0	0.17
16	12:03:01 p.m.	55.9	28.4	0	6.78	29.28	2.77	2.8	97.2	0	97.2	10.57	5.37	0	0.16
17	12:03:04 p.m.	56.4	28.5	0	6.79	29.25	2.77	2.8	97.2	0	97.2	10.56	5.37	0	0.17
18	12:03:07 p.m.	57	28.6	0	6.79	29.22	2.77	2.9	97.1	0	97.1	10.55	5.34	0	0.18
19	12:03:10 p.m.	67.6	28.5	0	6.79	29.2	2.77	3.9	96.1	0	96.1	10.54	5.34	0	0.18
20	12:03:13 p.m.	72.5	28.5	0	6.88	28.69	2.73	4.4	95.6	0	95.6	10.51	5.02	0	0.17
21	12:03:16 p.m.	76.8	28.6	0.44	6.88	24.43	2.73	4.8	95.2	0	95.2	8.95	3.58	0	0.19
22	12:03:19 p.m.	77.4	28.6	3	6.25	23.12	3.01	5.3	94.7	0	94.7	7.68	0.27	0	0.19
23	12:03:22 p.m.	76.5	28.5	10.6	5.76	16.46	3.26	5.7	94.3	0	94.3	5.05	0.13	25000	0.18
24	12:03:25 p.m.	76.4	28.5	13.06	5.16	14.12	3.64	6.3	93.7	0	93.7	3.88	0.01	17730	0.17
25	12:13:56 p.m.	75	28.8	14.16	2.46	8.71	7.64	12.8	87.2	0	87.2	1.14	0.06	6490	0.22
26	12:13:59 p.m.	69.9	28.7	9.55	3.73	8.87	5.04	7.5	92.5	0	92.5	1.76	0.04	13090	0.23
27	12:14:02 p.m.	62.6	28.7	7.22	7.7	8.61	2.44	3	97	0	97	3.53	0.15	0	0.21
28	12:14:05 p.m.	59.7	28.7	6.65	12.97	6.55	1.45	1.6	98.4	0	98.4	4.52	0.6	0	0.22
29	12:14:08 p.m.	54.2	28.7	5.64	15.33	8.14	1.23	1.1	98.9	0	98.9	6.62	0.88	0	0.21
30	12:14:11 p.m.	52	28.8	5.25	16.25	8.1	1.16	1	99	0	99	6.98	1.48	0	0.21
31	12:14:14 p.m.	48.4	28.8	4.61	16.49	8.65	1.14	0.8	99.2	0	99.2	7.59	1.84	0	0.2
32	12:14:17 p.m.	47	28.8	4.24	16.86	8.89	1.12	0.7	99.3	0	99.3	7.94	2.54	0	0.21

33	12:14:20 p.m.	44.7	28.8	3.64	16.97	9.55	1.11	0.6	99.4	0	99.4	8.6	2.83	0	0.22
34	12:14:23 p.m.	44	28.8	3.46	17.18	9.73	1.09	0.6	99.4	0	99.4	8.93	3.24	0	0.23
35	12:14:26 p.m.	43.4	28.8	2.94	17.26	10.5	1.09	0.6	99.4	0	99.4	9.63	3.35	0	0.22
36	12:14:29 p.m.	45	28.9	2.73	17.43	10.8	1.08	0.6	99.4	0	99.4	10	3.54	0	0.23
37	12:14:32 p.m.	46.7	28.8	2.3	17.51	11.49	1.07	0.7	99.3	0	99.3	10.74	3.67	0	0.21
38	12:14:35 p.m.	47.3	28.7	2.1	17.6	11.91	1.07	0.7	99.3	0	99.3	11.13	4.02	0	0.22
39	12:14:38 p.m.	50.2	28.8	1.8	17.62	12.7	1.07	0.8	99.2	0	99.2	11.87	4.14	0	0.2
40	12:14:41 p.m.	50	28.9	1.74	17.66	12.97	1.06	0.8	99.2	0	99.2	12.24	4.37	0	0.21
41	12:14:44 p.m.	52.9	28.7	1.53	17.67	13.65	1.06	0.9	99.1	0	99.1	12.88	4.46	0	0.22
42	12:14:47 p.m.	55.2	28.8	1.46	17.7	13.93	1.06	1	99	0	99	13.14	4.56	0	0.23
43	12:14:50 p.m.	60	28.8	1.39	17.73	14.37	1.06	1.2	98.8	0	98.8	13.56	4.64	0	0.24
44	12:14:53 p.m.	60.4	28.8	1.27	17.91	14.44	1.05	1.2	98.8	0	98.8	13.75	4.79	0	0.22
45	12:14:56 p.m.	62	28.8	1.08	18.01	14.64	1.04	1.3	98.7	0	98.7	14.08	4.85	0	0.23
46	12:14:59 p.m.	62.5	28.9	1.03	18.16	14.78	1.04	1.3	98.7	0	98.7	14.21	4.88	0	0.22
47	12:15:02 p.m.	62.5	28.9	1.02	18.26	14.91	1.03	1.3	98.7	0	98.7	14.48	4.88	0	0.23
48	12:15:05 p.m.	62.7	28.9	1.02	18.43	14.89	1.02	1.3	98.7	0	98.7	14.6	4.8	0	0.23
49	12:15:08 p.m.	63.9	28.8	1.03	18.49	15.06	1.02	1.3	98.7	0	98.7	14.76	4.76	0	0.23
50	12:15:11 p.m.	64	28.8	1.03	18.6	14.93	1.01	1.3	98.7	0	98.7	14.78	4.69	0	0.23
51	12:15:14 p.m.	64.9	28.9	1.06	18.66	14.98	1.01	1.3	98.7	0	98.7	14.83	4.67	0	0.23
52	12:15:17 p.m.	65.5	28.8	1.07	18.79	14.83	1	1.3	98.7	0	98.7	14.83	4.66	0	0.22
53	12:15:20 p.m.	66.7	28.8	1.04	18.85	14.86	1	1.4	98.6	0	98.6	14.86	4.64	0	0.21
54	12:15:23 p.m.	66.5	28.8	1.03	18.92	14.75	0.99	1.4	98.6	0	98.6	14.9	4.67	0	0.22
55	12:15:26 p.m.	66.7	28.8	0.97	18.94	14.87	0.99	1.4	98.6	0	98.6	15.02	4.68	0	0.23
56	12:15:29 p.m.	67	28.8	0.96	18.98	14.93	0.99	1.4	98.6	0	98.6	15.08	4.64	0	0.23
57	12:15:32 p.m.	67.2	28.8	0.99	18.98	15.08	0.99	1.4	98.6	0	98.6	15.23	4.65	0	0.24
58	12:15:35 p.m.	67.3	28.8	0.98	18.94	15.16	0.99	1.4	98.6	0	98.6	15.31	4.68	0	0.24
59	12:15:38 p.m.	68.1	28.8	0.98	18.91	15.34	0.99	1.4	98.6	0	98.6	15.49	4.69	0	0.22
60	12:15:41 p.m.	68.5	28.8	1	18.86	15.59	1	1.4	98.6	0	98.6	15.59	4.75	0	0.24
61	12:15:44 p.m.	69.2	28.9	1.01	18.84	15.81	1	1.5	98.5	0	98.5	15.81	4.8	0	0.23
62	12:15:47 p.m.	69.1	28.8	0.98	18.79	15.95	1	1.5	98.5	0	98.5	15.95	4.92	0	0.24
63	12:15:50 p.m.	69.5	28.9	0.96	18.74	16.24	1	1.5	98.5	0	98.5	16.24	4.98	0	0.23
64	12:15:53 p.m.	69.8	28.9	0.98	18.61	16.57	1.01	1.5	98.5	0	98.5	16.41	5.15	0	0.23
65	12:15:56 p.m.	71.7	28.8	1.03	18.53	17	1.01	1.6	98.4	0	98.4	16.83	5.31	0	0.23
66	12:15:59 p.m.	73	28.9	1.04	18.27	17.64	1.03	1.6	98.4	0	98.4	17.13	5.77	0	0.24

67	12:16:02 p.m.	74.7	29	0.99	18.13	18.45	1.04	1.7	98.3	0	98.3	17.74	5.9	0	0.23
68	12:16:05 p.m.	75.4	29	0.95	17.89	18.93	1.05	1.8	98.2	0	98.2	18.03	5.92	0	0.22
69	12:16:08 p.m.	76.9	28.9	0.83	17.77	19.75	1.06	1.8	98.2	0	98.2	18.63	5.9	0	0.23
70	12:16:11 p.m.	78.4	28.8	0.81	17.56	20.2	1.07	1.9	98.1	0	98.1	18.88	5.85	0	0.23
71	12:16:14 p.m.	83	29	0.72	17.5	20.68	1.07	2.1	97.9	0	97.9	19.33	5.98	0	0.24
72	12:16:17 p.m.	85.6	28.9	0.65	17.39	21.09	1.08	2.2	97.8	0	97.8	19.53	6.23	0	0.23
73	12:16:20 p.m.	94.4	29	0.52	17.28	21.76	1.09	2.6	97.4	0	97.4	19.96	6.23	0	0.23
74	12:16:23 p.m.	101.2	29.1	0.49	17.1	21.98	1.1	2.9	97.1	0	97.1	19.98	6.06	0	0.24
75	12:16:26 p.m.	112.5	29	0.49	17.08	21.85	1.1	3.3	96.7	0	96.7	19.86	5.82	0	0.23
76	12:16:29 p.m.	116.6	29	0.45	17.33	21.04	1.08	3.5	96.5	0	96.5	19.48	4.89	0	0.25
77	12:16:32 p.m.	125	29	0.46	17.48	19.71	1.08	3.8	96.2	0	96.2	18.25	4.52	0	0.23
78	12:16:35 p.m.	128.2	29.1	0.5	17.91	18.4	1.05	3.8	96.2	0	96.2	17.52	4.11	0	0.23
79	12:16:38 p.m.	135.1	29	0.55	18.16	16.81	1.04	4	96	0	96	16.16	4.02	0	0.24
80	12:16:41 p.m.	137.9	29	0.58	18.67	15.75	1.01	4	96	0	96	15.59	4.04	0	0.25
81	12:16:45 p.m.	143	29.1	0.56	18.82	14.89	1	4.1	95.9	0	95.9	14.89	4.06	0	0.24
82	12:16:48 p.m.	144.4	29.1	0.53	18.98	14.48	0.99	4.1	95.9	0	95.9	14.63	3.97	0	0.25
83	12:16:51 p.m.	144	29.1	0.54	19.03	14.43	0.99	4.1	95.9	0	95.9	14.58	3.84	0	0.24
84	12:16:54 p.m.	144.1	29.1	0.52	19.11	14.28	0.98	4.1	95.9	0	95.9	14.57	3.86	0	0.24
85	12:16:57 p.m.	144.9	29.1	0.52	19.09	14.3	0.98	4.1	95.9	0	95.9	14.59	3.93	0	0.25
86	12:17:00 p.m.	148	29.1	0.5	18.98	14.43	0.99	4.3	95.7	0	95.7	14.58	3.93	0	0.25
87	12:17:03 p.m.	149.9	29.1	0.49	18.9	14.47	0.99	4.4	95.6	0	95.6	14.62	3.96	0	0.25
88	12:17:06 p.m.	143.8	29.2	0.48	18.68	14.86	1.01	4.2	95.8	0	95.8	14.71	3.98	0	0.24
89	12:17:09 p.m.	125.4	29.1	0.46	18.57	14.86	1.01	3.5	96.5	0	96.5	14.71	3.52	0	0.25
90	12:17:12 p.m.	111.8	29.1	1.92	15.1	14.85	1.25	3.7	96.3	0	96.3	11.88	2.27	0	0.25
91	12:17:15 p.m.	110.8	29.1	8.41	9.28	19.12	2.03	6	94	0	94	9.42	0.39	0	0.24
92	12:17:18 p.m.	101	29.1	18.12	8.47	15.94	2.22	5.8	94.2	0	94.2	7.18	1.48	0	0.25
93	12:17:21 p.m.	101	29.1	14.58	6.83	18.01	2.75	7.2	92.8	0	92.8	6.55	2.76	0	0.27
94	12:17:24 p.m.	105.3	29.1	11.1	6.28	15.31	2.99	8.3	91.7	0	91.7	5.12	2.35	0	0.26
95	12:17:27 p.m.	106.9	29.1	11.79	6.75	13.42	2.79	7.9	92.1	0	92.1	4.81	2.97	0	0.26
96	12:17:30 p.m.	109.9	29.2	9.33	8.7	17.56	2.16	6.3	93.7	0	93.7	8.13	3.96	0	0.26
97	12:17:33 p.m.	111	29.3	5.06	11.87	15.94	1.58	4.7	95.3	0	95.3	10.09	4.97	0	0.27
98	12:17:36 p.m.	107.9	29.4	1.99	12.65	17.16	1.49	4.2	95.8	0	95.8	11.52	4.96	0	0.28
99	12:17:39 p.m.	100	29.3	1.69	15.18	15.96	1.24	3.2	96.8	0	96.8	12.87	4.52	0	0.28
100	12:17:42 p.m.	101.8	29.3	2.23	15.11	16.01	1.24	3.3	96.7	0	96.7	12.91	3.13	0	0.26