

**ESTUDIO EXERGÉTICO - AMBIENTAL DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE  
GENERACIÓN CON BASE EN UN GASIFICADOR DE BIOMASA INTEGRADO  
A UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

**LEIDY BOCANEGRA GALEANO  
LAURA MOJICA CASTELLANOS**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA INGENIERÍA EN ENERGÍA  
BUCARAMANGA**

**2019**

**ESTUDIO EXERGÉTICO - AMBIENTAL DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA DE  
GENERACIÓN CON BASE EN UN GASIFICADOR DE BIOMASA INTEGRADO  
A UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

**LEIDY BOCANEGRA GALEANO  
LAURA MOJICA CASTELLANOS**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de  
INGENIERA EN ENERGÍA**

**Director: M. Sc. Carlos A. Díaz González**

**BUCARAMANGA  
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA INGENIERIA EN ENERGIA**

**2019**

**Nota de aceptación**

Aprobado por el Comité Curricular en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Bucaramanga para optar el título de Ingeniero en energía

---

**M. Sc. Carlos Alirio Díaz González**  
Director

---

Evaluador **pendiente**

Bucaramanga, 18 de mayo de 2019

## DEDICATORIA

*A Dios,*

*Por permitirme llegar a este momento tan importante de mi formación profesional. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a mejorar como ser humano.*

*A mi Madre,*

*Fanny Yolanda, por su amor, trabajo y sacrificio durante estos años los cuales me han permitido culminar este sueño. Gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.*

*A mi Padre,*

*Mario Jorge, a pesar de nuestra distancia física, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí.*

***Leidy Bocanegra Galeano***

*A mis padres,*

*Nely y Oscar, por su trabajo, sacrificio y esfuerzo de darme todo lo necesario para así formarme y crecer como persona. Quienes a través de su cariño, apoyo, amor incondicional me han dado la fuerza de seguir adelante, sobre todo en esos momentos donde sentía que no podría más. Por ser ejemplo de entrega, dedicación y disciplina. Por enseñarme lo que es tener carácter y nunca dejar de soñar.*

*A mi hermano,*

*Kevin, quien se convirtió en mi pilar vida. Por ser esa fuente de inspiración para seguir luchando cada día. Por qué a pesar de la distancia, la gran diferencia de edad y el poco el tiempo que compartimos siempre me ha demostrado el amor y el cariño incondicional de un hermano.*

***Laura Mojica Castellanos***

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darnos la salud y la oportunidad de culminar este proceso de formación.

A nuestros padres, que a pesar de la distancia siempre nos apoyaron y dieron la fuerza de seguir adelante.

A nuestro director de proyecto, M. Sc Carlos Alirio Díaz quien transmitió parte de su conocimiento, le agradecemos por el tiempo y ayuda dedicado, por cada llamado de atención porque de alguna manera nos ha hecho progresar en nuestro proceso de aprendizaje.

A nuestras compañeras y compañeros que estuvieron presentes en cada una de las etapas.

## CONTENIDO

PÁG.

DEDICATORIA .....	4
CONTENIDO .....	6
INTRODUCCIÓN.....	14
1. MARCO REFERENCIAL .....	16
1.1. BIOMASA .....	16
1.2. GASIFICACIÓN.....	17
1.3. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA .....	20
1.4. ANÁLISIS EXERGÉTICO .....	28
1.5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	28
1.6. ASPEN PLUS .....	29
2. OBJETIVOS .....	30
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	30
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
3. METODOLOGÍA.....	31
4. DESARROLLO .....	32
4.1. FASE 1: DESCRIPCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO .....	32
4.2. FASE 2: PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO PARA LOS PRINCIPALES EQUIPOS DEL SISTEMA.....	35
4.3. FASE 3: SIMULACIÓN DEL SISTEMA.....	42
4.4. FASE 4: ANÁLISIS EXERGÉTICO E INDICADORES DE DESEMPEÑO .....	53
5. RESULTADOS .....	58
5.1. SIMULACIÓN ASPEN .....	58
5.2. ANÁLISIS DE IRREVERSIBILIDADES .....	61
5.3. EFICIENCIAS EXERGÉTICA Y ENERGÉTICA .....	63
5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS EN SIMAPRO .....	63
6. CONCLUSIONES.....	66
7. BIBLIOGRAFIA.....	68
8. ANEXOS .....	70

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Clasificación gas de síntesis según agente gasificante. ....	19
Tabla 2. Demanda total diaria caso de estudio. ....	32
Tabla 3. Análisis Próximo Arundo Donax. ....	33
Tabla 4. Análisis ultimo Arundo Donax ....	34
Tabla 5. Especificaciones técnicas del gasificador ....	35
Tabla 6. Balance teórico estequiométrico de la biomasa ....	36
Tabla 7. Balance real estequiométrico de la biomasa ....	37
Tabla 8. Especificaciones del Motor-Generador ....	38
Tabla 9. Condiciones Entrada Biomasa ....	42
Tabla 10. Condiciones entrada Agente Gasificante ....	43
Tabla 11. Condiciones de Operación Proceso de Descomposición ....	44
Tabla 12. Condiciones de Operación Proceso de Pirolisis ....	45
Tabla 13. Condiciones de Operación Proceso de Descomposición CHAR. ....	46
Tabla 14. Condiciones de entrada al Motor-Generador ....	48
Tabla 15. Composición Syngas obtenido de Aspen Plus ....	58
Tabla 16. Condiciones de obtención del gas de síntesis.....	58
Tabla 17. Flujos para Abastecimiento de la demanda de la localidad .....	60

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1. Curva de carga total horaria diaria de la localidad. ....	33
Gráfica 2. Comportamiento del Motor en Términos de presión. ....	59
Gráfica 3. Flujos de Syngas en los diferentes equipos a diferentes cargas.....	60
Gráfica 4. Irreversibilidades totales, Sistema plena carga.....	61
Gráfica 5. Irreversibilidades del motor y del sistema de almacenamiento, diferentes cargas.....	62



## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
Figura 1. Mapa de la zona interconectada y no interconectada de Colombia .....	14
Figura 2. Tipos de Biomasa .....	16
Figura 3. Tipos de Gasificadores .....	20
Figura 4. Diagrama de bloques, entradas y salidas de un motor de combustión interna .....	21
Figura 5. Esquema de un motor de combustión interna alternativo.....	22
Figura 6. Procesos presentes en el ciclo Otto.....	23
Figura 7. Ciclo de proceso de un motor de dos tiempos .....	25
Figura 8. Diagrama P-V ciclo Otto, estado teórico .....	26
Figura 9. Desglose de perdidas mecánicas en un motor .....	27
Figura 10. Diagrama P-V del ciclo Otto, estado teórico y real .....	27
Figura 11. Diagrama simulación en Aspen Plus .....	29
Figura 12. Esquema del sistema de generación gasificador-motor .....	35
Figura 13. Esquema del sistema de gasificación en Aspen Plus .....	43
Figura 14. Proceso de Descomposición.....	44
Figura 15. Proceso de Pirolisis .....	44
Figura 16. Separador de Solidos .....	45
Figura 17. Proceso de Oxidación.....	46
Figura 18. Proceso de Descomposición de CHAR.....	46
Figura 19. Proceso de Descomposición de CHAR.....	47
Figura 20. Sistema Motor-Generador.....	48
Figura 21. Proceso de compresión de la mezcla de gases .....	49
Figura 22. Proceso de Combustión de la mezcla de gases.....	49
Figura 23. Proceso de expansión de los gases quemados .....	50
Figura 24. Proceso de acondicionamiento de los humos para salir al medio .....	50
Figura 25. Sistema de almacenamiento de syngas no usado .....	51
Figura 26. Volumen de control del sistema .....	51
Figura 27. Volumen de control de exergías del gasificador.....	53
Figura 28. Volumen de control de exergías del motor.....	55
Figura 29. Volumen de control de exergías del sistema de almacenamiento.....	55

## NOMENCLATURA

$\#Cilindros$ : Numero de cilindro motor.

$\dot{V}_{Aire\ Gasificador22[kW]}$ : Flujo volumétrico salida gasificador,  $m^3$ .

$\dot{V}_{Syngas22[kW]}$ : Flujo volumétrico entrada motor,  $m^3/h$ .

$\dot{Q}_{Gasificador}$ : Flujo calor del gasificador,  $kW$ .

$S_{EstadoMuerto\ flujoEntrada}$ : Entropía estado muerto,  $kJ/kg$ .

$T_{gasificador\ prom}$ : Temperatura promedio gasificador,  $K$ .

$V_{Aire\ Gasificador1[kW]}$ : Volumen entrada de aire al gasificador,  $m^3$ .

$V_{Aire\ Motor1[kW]}$ : Volumen entrada de aire al motor,  $m^3$ .

$V_{Syngas1[kW]}$ : Volumen syngas entrada al motor,  $m^3$ .

$\dot{m}_{Biomasa}$ : Flujo másico biomasa entrada al gasificador,  $kg/s$ .

$\dot{m}_{SyngasG}$ : Flujo másico del syngas a la salida del gasificador,  $kg/s$ .

$\dot{m}_{aireG}$ : Flujo másico del aire a la entrada del gasificador,  $kg/s$ .

$\dot{m}_{aire\ motor}$ : Flujo másico del aire a la entrada del motor,  $kg/s$ .

$\dot{m}_{entrada}$ : Flujo másico de entrada al sistema,  $kg/s$ .

$\dot{m}_{produccion}$ : Flujo másico de generados por el sistema,  $kg/s$ .

$\dot{m}_{salida}$ : Flujo másico salida del sistema,  $kg/s$ .

$\dot{m}_{sumintro}$ : Flujo másico de generados por el sistema,  $kg/s$ .

$\dot{m}_{syngas}$ : Flujo másico syngas que entra al motor,  $kg/s$ .

$m_{Biomasa1[kW]}$ : Cantidad másica de biomasa,  $kg$ .

$h_{EstadoMuerto\ flujoEntrada}$ : Entalpia flujo de entrada estado muerto,  $kJ/kg$ .

$h_{aire}$ : Entalpia flujo de entrada estado muerto,  $kJ/kg$ .

$h_{flujoEntrada}$ : Entalpia flujo de entrada,  $kJ/kg$ .

$h_{produccion}$ : Entalpias flujos producidos por el sistema,  $kJ/kg$ .

$h_{suministro}$ : Entalpias flujos suministrado al sistema,  $kJ/kg$ .

$\eta_{Ex}$ : Eficiencia exergética del sistema.

$\eta_e$ : Eficiencia energética del sistema.

$\eta_i$ : Eficiencia indicada del motor.

$Ex_f$ : Exergía física,  $kJ_{exer}/kg$ .

$Ex_q$ : Exergía Química,  $kJ_{exer}/kg$ .

$H_2$ : Fracción de hidrogeno contenida en la biomasa.

$MM_{Syngas}$ : Masa molecular syngas,  $Kmol/kg$ .

$M_e$ : Par efectivo,  $N * m$

$N_e$ : Potencia efectiva,  $W$

$N_i$ : Potencia indicada,  $W$

$O_2$ : Fracción de oxígeno contenida en la biomasa.

$P_{3REAL}$ : Presión de combustión real del motor,  $kPa$ .

$P_{4REAL}$ : Presión de expansión real del motor,  $kPa$ .

$P_1$ : Presión de entrada al motor,  $kPa$ .

$P_2$ : Presión teórica del compresor del motor,  $kPa$ .

$P_3$ : Presión de combustión teórica del motor,  $kPa$ .

$P_4$ : Presión de expansión teórica del motor,  $kPa$ .

$Q_{proceso}$ : Flujo de calor de cada proceso,  $kW$ .

$S_{flujEntrada}$ : Entropía de las corrientes de entrada,  $kJ/kg$ .

$T_{2REAL}$ : Temperatura real de compresión,  $K$ .

$T_{3REAL}$ : Temperatura real de combustión,  $K$ .

$T_{4REAL}$ : Temperatura real de expansión,  $K$ .

$T_1$ : Temperatura de entrada teórica al motor,  $K$ .

$T_2$ : Temperatura de entrada teórica al motor,  $K$ .

$T_3$ : Temperatura teórica de combustión,  $K$ .

$T_4$ : Temperatura teórica de expansión,  $K$ .

$T_o$ : Temperatura estado muerto,  $K$

$V_{1esp}$ : Volumen específico del cilindro del motor al finalizar la admisión,  $m^3$ .

$V_{2esp}$ : Volumen específico del cilindro del motor al finalizar la compresión,  $m^3$ .

$V_2$ : Volumen del cilindro del motor al finalizar la compresión,  $m^3$ .

$V_T$ : Volumen total del cilindro del motor,  $m^3$ .

$W_e$ : Trabajo efectivo,  $W$ .

$W_i$ : Trabajo indicado,  $W$

$a_{real}$ : Fracción de aire real gasificador

$m_{adminita}$ : Flujo de Syngas en el motor en un ciclo,  $kg/ciclo$

$y_i$ : Fracción de cada compuesto

$\Delta U$ : Dental de energía del proceso,  $W$

$A/C_{Motor}$ : Relación aire-combustible del motor

$A/C$ : Relación aire-combustible gasificador

$Aire_{Oxi}$ : Flujo de aire para el proceso de oxidación,  $kg/s$ .

$Aire_{Reduc}$ : Flujo de aire para el proceso de reducción,  $kg/s$ .

$Aire_{gasif}$ : Flujo de aire para el proceso de gasificación,  $kg/s$ .

$C$ : :Fracción de Carbón contenida en la biomasa.

$Cv_{mezcla}$ : Calor específico a volumen constante,  $kJ/kg * K$

$Ciclo_{seg}$ : Ciclos por segundo,  $ciclo/seg$ .

$Ex_{\dot{Q}_{Gasificador}}$ : Flujo exergético de calor,  $kJ/kg$ .

$Ex_{quimicaSyngas}$ : Flujo exergético químico del Syngas,  $kJ/kmol$ .

$Ex_{comb}$ : Flujo exergético contenido en la biomasa,  $kJ/kg$ .

$Ex_{entrada}$ : Flujo exergético de las líneas de entrada,  $kJ/kg$ .

$Ex_{estandar}$ : Flujo exergético estándar para las diferentes compuestos,  $kJ/kg$ .

$Irr_{Compresor}$ : Irreversibilidades presentes en el compresor,  $kW$ .

$Irr_{Gasificador}$ : Irreversibilidades generada en el gasificador,  $kW$ .

$Irr_{Motor}$ : Irreversibilidades generada en el motor,  $kW$ .

$Irr_{sistema}$ : Irreversibilidades del sistema  $kW$ .

$MM_{Biomasa}$ : Masa molecular biomasa,  $Kmol/kg$ .

$MM_{mezcla}$ : Masa molecular de la mezcla aire - combustible,  $Kmol/kg$ .

$MM_{masa_i}$ : Masa molecular de cada elemento,  $Kmol/kg$ .

$PCI_{Biomasa}$ : Poder calorífico de la biomasa,  $kJ/kg$ .

$PCI_{syngas}$ : Poder calorífico del Syngas,  $kJ/kg$ .

$PME$ : Presión media efectiva

$PMI$ : Presion media indicada

$Pot_{total}$ : Demanda eléctrica total de la localidad,  $kW$ .

$HR$  : Heat rate,  $kJ/kWh$

$Q$ : Calor liberado o requerido en un proceso,  $W$ .

$R$ : Constante universal de los gases,  $kJ/kmol * K$

$Rev_{ciclo}$ : Revoluciones por ciclo.  $Rev/Ciclo$

$Rev_{seg}$ : Revoluciones por segundo,  $rev/seg$ .

$S$ : Fracción de azufre contenida en la biomasa.

$Vd$ : Cilindrada unitaria,  $m^3$

$Vc$ : Volumen cámara de combustión,  $m^3$

$W$ : Calor liberado o requerido en un proceso,  $W$ .

$i$ : Factor diferenciador entre motores de 4 o 2 tiempos.

$k$ : Relación de calores específicos

$n$ : Factor de aireación

$raps$ : Radianes por segundo,  $rad/seg$

$rc$ : Relación de compresión

$rp$ : Relación de presión

$rpm$ : Revoluciones por minuto,  $rev/min$

## RESUMEN

En Colombia hay un alto porcentaje de poblaciones aisladas geográficamente por ello no pertenecen al sistema interconectado nacional. En consecuencia, estas zonas han implementado como alternativa grupos electrógenos diésel para su abastecimiento de energía eléctrica generando un alto impacto ambiental. Por esta razón este proyecto tiene como finalidad realizar un análisis exergo-ambiental de un sistema de gasificación de biomasa, Arundo Donax, acoplado a un motor de combustión interna como alternativa de generación. Para hacer la evaluación del sistema se toma como base la curva de demanda del corregimiento La Cooperativa ubicada en el municipio de Mapiripán, Meta. Posteriormente, se establece los parámetros de trabajo del gasificador los cuales se ingresan a la simulación realizada del equipo en Aspen Plus para así conocer la composición del gas de síntesis obtenido junto con su poder calorífico. De estos valores se determina el comportamiento del motor a las diferentes cargas establecidas por la demanda eléctrica de la localidad. También, se realiza un análisis de los efectos ambientales que genera el sistema a partir de un análisis de ciclo de vida (ACV) con la ayuda de la herramienta SimaPro, donde se observa que la mayoría de los impactos contribuyen al calentamiento global. Finalmente, se halla la exergía del sistema para relacionarlo con los  $\text{kgCO}_2$  tomados del ACV donde se concluye que el mayor porcentaje de exergía destruida se da en el motor y en el sistema de almacenamiento por consiguiente son los procesos que presentan un mayor impacto ambiental.

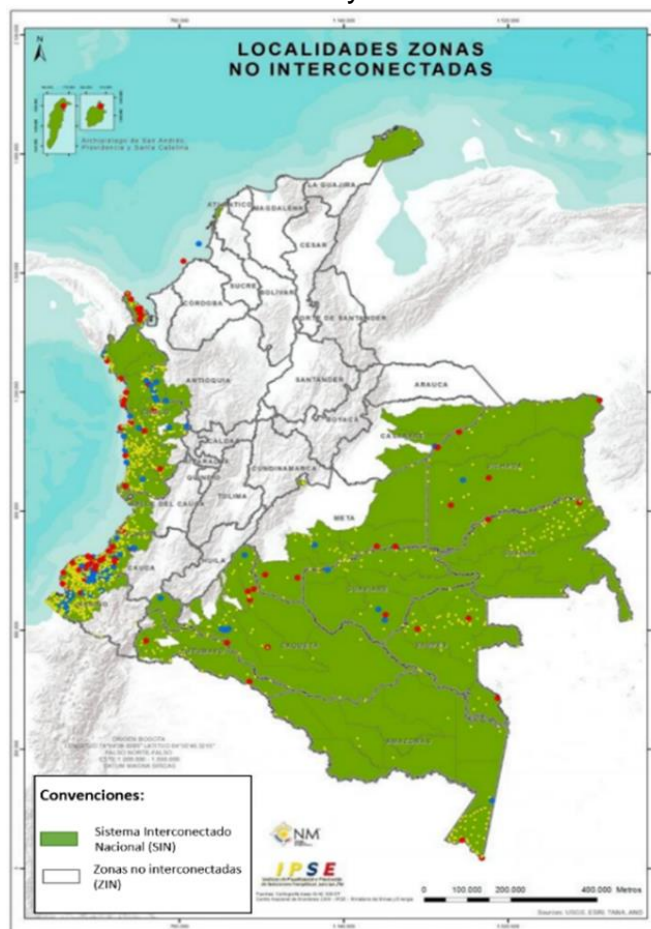
**Palabras Clave:** SISTEMA DE GENERACIÓN, GASIFICACIÓN, ANÁLISIS EXERGÉTICO, ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

## INTRODUCCIÓN

El territorio colombiano cuenta con una diversidad en su geografía, climas y altitudes, lo que dificulta el acceso a algunas áreas e impide que muchas zonas tengan suministro de energía eléctrica, estas zonas son conocidas como no interconectadas (ZNI). Son zonas donde los servicios públicos son escasos y deficientes; carecen de servicios básicos como energía, acueducto y alcantarillado, y presentan dificultades para acceder a la educación, la salud, el agua potable y la comunicación[1]. Esto imposibilita que las condiciones de desarrollo de estas regiones mejoren a niveles que les permitan superar el umbral de pobreza.

Las zonas no interconectadas (ZNI) son los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional[2]. En Colombia esta zona equivale al 52% del territorio nacional dentro de las que se encuentran 1.448 localidades[3].

Figura 1. Mapa de la zona interconectada y no interconectada de Colombia



Fuente: IPSE – CNM[4]

Dado que no cuentan con la infraestructura que permita el abastecimiento de energéticos a partir de los medios de transporte tradicionales (poliductos y gasoductos), se hace necesario que se genere directamente en cada zona y se busca que las soluciones energéticas se basen en fuentes alternativas a las tradicionales, el 96,3% de la capacidad de generación es a partir de plantas diésel, pero aun así el suministro no es confiable ni constante[5]. Adicional a esto, las pocas alternativas de generación local, conlleva a que, el servicio energético en las ZNI sea escaso, deficiente y de alto costo, mientras que la capacidad de pago por el recurso es baja[6].

Otra variable influyente es el ámbito social ya que el país se encuentra en un proceso de transición debido al conflicto que existía décadas atrás, siendo este un aspecto determinante en estas localidades dado que los daños que generaron, en cuanto al suministro de energía en estas zonas, causaron grandes pérdidas monetarias, desconexión de líneas y creación de islas en el SIN[7]. Con esto, se impide tanto la transmisión como la distribución y comercialización de la energía eléctrica.

Según lo planteado es necesario evaluar la viabilidad de la generación eléctrica en esas zonas a partir de fuentes de energía renovable. En particular, para los centros poblados pequeños ya que los proyectos de energización propuestos por el Gobierno Nacional apuntan a las cabeceras departamentales y nacionales.

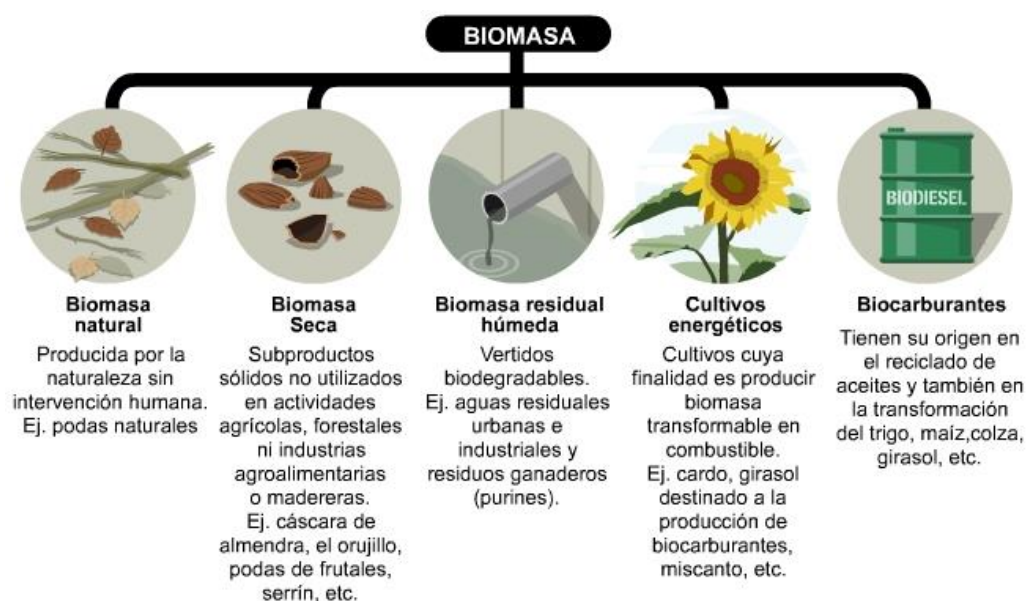
Por esta razón se realiza un estudio exergético y ambiental de la implementación de un sistema de gasificación acoplado a un motor generador el cual debe cumplir con la demanda de energía eléctrica para la localidad de La Cooperativa, Meta, la cual hace parte de las zonas que conforman la ZNI. El estudio se realiza mediante las herramientas de Aspen Plus y SimaPro, donde se varían parámetros con el fin de sensibilizar el desempeño del sistema, se incluyen indicadores energéticos, ambientales y exergético ambientales. En Aspen Plus se simula cada una de las unidades en estado estable con el fin de incluir los resultados en SimaPro y así realizar un análisis de los impactos ambientales generados por sistema teniendo en cuenta irreversibilidades, eficiencia energética y exergética.

# 1. MARCO REFERENCIAL

## 1.1. BIOMASA

La biomasa hace referencia a la materia orgánica e industrial formada en procesos mecánico o biológicos, habitualmente se extrae de los residuos de las sustancias que constituyen los seres vivos (plantas, ser humano, animales, entre otros) o sus restos. Hablar de Biomasa alude a la energía solar, transformada en materia orgánica por la vegetación, la cual se recupera por combustión directa o transformándose en combustibles con diferentes características. El uso de biomasa vegetal es el más extenso y utilizado en el mundo, Orujillo de aceite, huesos de aceituna, caña de azúcar, cáscaras de frutos secos, residuos forestales y de la industria maderera como astillas y serrines son un claro ejemplo de materia orgánica utilizada para obtener la energía de forma sustentable[8]. La biomasa en Colombia tiene mucho potencial por la gran capacidad para el aprovechamiento de residuos forestales y agrícolas que tiene el país, sobre todo en banano, cascarilla de arroz, pulpa de café y explotaciones silvícolas.

Figura 2. Tipos de Biomasa



Fuente: eba (estructuras bioclimáticas avanzadas)[9]

- Arundo Donax

La especie es originaria de la familia de las gramíneas produce más materia prima por hectárea que cualquier otra planta de biomasa conocida, con producciones



anuales por hectárea de 35 – 45 toneladas siendo esta una especie muy prometedora para generación de bioenergía[10]. En Colombia el Arundo Donax tiene varios nombres dependientes al sector del país, se conoce generalmente como caña de castilla o caña brava en los sectores de Boyacá, caldas y Cundinamarca, (se le llama Caña de queco en Cundinamarca y el Huila juco, cañote y carrizo en el sector de Antioquia caldas, Nariño, Norte de Santander, Putumayo y Quindío).

Se encuentra cultivada en climas templados o frío, crece en sitios abiertos y soleados formando densos cañales en potreros a lo largo de cauces, Se adapta muy bien a una gran cantidad de ambientes por no tener un período crítico en la definición del rendimiento. Tolerancia el estrés hídrico y los fuertes vientos, así como, la salinidad y sodicidad. La opción de gasificar este producto es la producción de forma independiente de un valioso producto energético. Es posible utilizar los nuevos sistemas de alta eficiencia para sistemas de gasificación y convertir en diferentes fuentes de energía, como gas de síntesis, la generación eléctrica, el etanol y el biodiesel. A nivel de cultivo requiere mínimos cuidados culturales durante su año de implantación. Por estas características la caña flecha es un buen candidato para emplearse como combustible en calderas convencionales en la generación de energía térmica y eléctrica.

## **1.2. GASIFICACIÓN.**

La gasificación de biomasa es una tecnología de más de cien años de antigüedad. Hoy en día es vista como una alternativa a los combustibles convencionales y a sus altos índices de contaminación, siendo esta una tecnología limpia, flexible y segura en la actualidad se desarrollan nuevas y más eficientes, con las cuales se genera un mayor rendimiento a productos de alto valor agregado, con capacidad de tolerar las fluctuaciones propias del tipo y calidad del material de la biomasa, así como a los diferentes factores que la pueden afectar.[11]

La gasificación es un proceso termoquímico en el que los materiales combustibles, como la biomasa, sufren diferentes transformaciones, desde su estado inicial (estado sólido) hasta convertirla en un gas combustible llamado gas de síntesis, o syngas, el cual puede ser usado para generar calor y energía a este proceso de producción de energía se le conoce como Bioenergía. La biomasa es parcialmente oxidada o quemada a 500-900 °C en presencia de un agente gasificante (por ejemplo: aire, oxígeno, vapor, CO<sub>2</sub>, o mezclas de estos componentes), Dependiendo del tipo de agente gasificante se obtienen diferentes calidades de gases. Si es aire se logra gas pobre y si es oxígeno se obtiene gas rico, con mayor poder calorífico[12].

### 1.2.1. PROCESOS DE GASIFICACIÓN

La base de la gasificación es el proceso de conversión de la biomasa sólida en un gas combustible el cual se conforma de un gran contenido de monóxido de carbono e hidrogeno el cual se obtiene por medio de un proceso termoquímico. Este proceso se cumple en una cámara cerrada y sellada que opera con valores similares a la presión atmosférica. Este proceso se desarrolla en las siguientes etapas:

- Secado

El secado es un proceso endotérmico, el cual se realiza a temperaturas inferiores a los 100°C, para obtener eficiencias tolerables del proceso la cantidad máxima de humedad contenida en el sólido de admisión está limitada a un 20-30% en peso, como producto se obtiene una biomasa seca la cual afectara de manera directa a la gasificación, produciendo un gas rico y con alto poder calorífico.

- Pirolisis

La pirolisis consiste en la degradación térmica de las moléculas de gran tamaño que componen la biomasa, este proceso ocurre a temperaturas entre 200 y 600°C, en un ambiente con ausencia de aire lo cual permite que se lleve a cabo su combustión parcial, en este proceso se obtienen residuos carbonoso o char, gases condensables (hidrocarburos ligeros y pesados) y gases no condensables como el metano, vapor de agua, monóxido de carbono, hidrogeno y dióxido.

- Oxidación

La oxidación tiene como finalidad obtener una mayor cantidad de los compuestos ya mencionados, esto se realiza gracias al ingreso de un agente gasificante el cual, generalmente es aire ya que presenta bajos costos. Esta etapa es beneficiosa desde el punto de vista energético, debido a la energía liberada con la cual se desarrollan el resto de las fases que componen la gasificación.

- Reducción

La oxidación se lleva a cabo a temperaturas elevadas en torno a los 700°C, el resultado final de esta etapa es un gas con bajo poder calorífico compuesto principalmente por monóxido de carbono, hidrogeno, nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua en pequeñas cantidades[13].

### 1.2.2. AGENTES GASIFICANTES

Los agentes gasificantes son diferentes tipos de gas inyectado en el proceso termoquímico de gasificación, según el agente gasificante que se emplee se obtienen diferentes efectos en la gasificación y su producto final, syngas que afecta directamente su composición y poder calorífico.

Los diferentes agentes gasificantes utilizados son, hidrogeno, oxigeno, vapor de agua y aire entre muchos otros, esto depende de las características del gas que se desea producir. en la tabla relacionada a continuación se observan las características del syngas producido con los diferentes agentes gasificantes[14].

Tabla 1. Clasificación gas de síntesis según agente gasificante.

AGENTE GASIFICANTE	Poder Calorífico Superior (MJ/m <sup>3</sup> )	COMPOSICION DEL GAS OBTENIDO (% en volumen)						USO
		H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	
Aire	< 6	16	20	12	2	50	-	Combustible
Oxígeno	10 - 20	32	48	15	2	3	-	Combustible gas de síntesis
Vapor de agua	10 - 20	50	20	22	6	-	2	Combustible gas de síntesis
Hidrógeno	> 30							Sustituto del gas natural

Fuente: Identificación y control de un gasificador de lecho fluidizado[15]

### 1.2.3. TIPOS DE AGENTES GASIFICANTES

- Aire

En la gasificación con aire, parte de la biomasa procesada se quema gracias al oxígeno presente, el remanente de la biomasa sufre el proceso de reducción, dando como resultado un syngas con poder calorífico que ronda los 5.5 MJ/Nm<sup>3</sup> este syngas es ideal para motores de combustión interna convencionales ya que para la síntesis de metanol es un gas pobre.

- Vapor de agua u oxígeno

Este agente gasificante mejora el rendimiento global y aumenta la proporción de hidrógeno contenido en el syngas. Si se desea producir metanol o gasolina sintética es el sistema más adecuado, no obstante, el vapor de agua se produce a partir del calor contenido en el gas de síntesis, el oxígeno tiene un elevado costo económico a tener en cuenta.

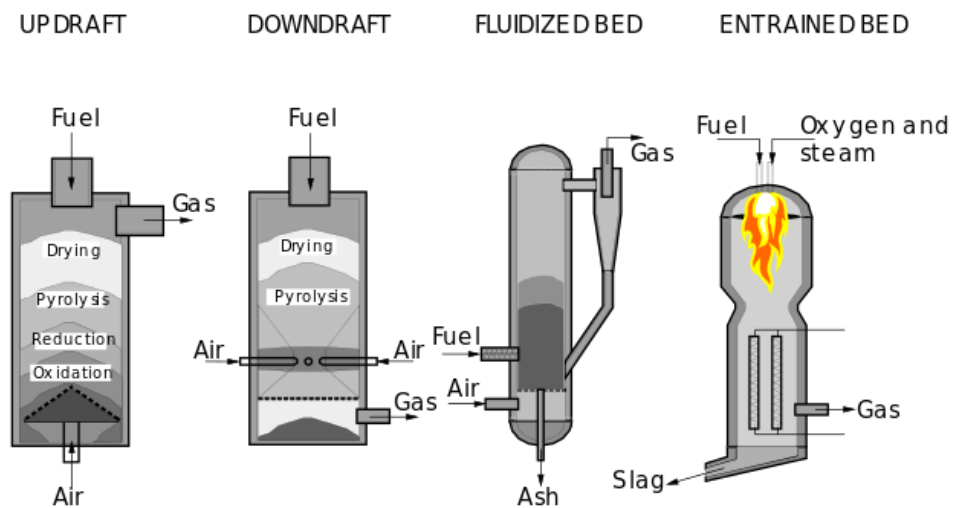
- Hidrógeno

El uso de hidrógeno como agente gasificante permite la obtención de un syngas que puede reemplazar el gas natural, debido a que puede alcanzar un poder calorífico de 30 MJ/kg.

#### 1.2.4. TIPOS DE GASIFICADORES

Para la instalación de una planta de gasificación de biomasa, es de gran importancia la selección del tipo de gasificador, teniendo en cuenta el combustible a usar, los acondicionamientos atmosféricos y tecnológicos del lugar con el fin de generar un gas con elevada proporción de componentes combustibles y pocas impurezas para un mejor desempeño del motor. De acuerdo al lecho de combustibles, hay principalmente de tres tipos de gasificadores: lecho fijo (Downdraft, Updraft y Crossdraft), lecho fluidizado (circulante y fluidizado) y lecho arrastrado (flujo descendente y flujo en contracorriente)[16].

Figura 3. Tipos de Gasificadores

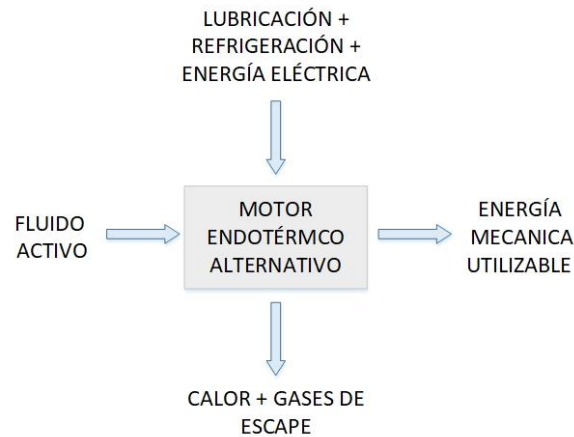


Fuente: La biomasa en la producción de productos base[17]

#### 1.3. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Se conoce como motor de combustión interna o endotérmico alternativo a cualquier maquina capaz de transformar la energía calorífica en energía mecánica directamente utilizable. La energía calorífica proviene de una combustión de un fluido activo (combustibles líquidos o gaseosos) que se lleva a cabo en el interior del equipo[18].

Figura 4. Diagrama de bloques, entradas y salidas de un motor de combustión interna



Fuente: Motores Endotérmicos[18]

### 1.3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN

Hay diferentes tipos de motores de combustión interna, dependen de cuál sea su finalidad. Se pueden clasificar según su:

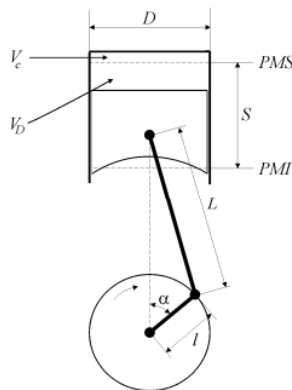
- Aplicación: Automóvil, camión, locomotora, avioneta, marina, sistema de energía portátil, generación de energía.
- Diseño básico del motor: motores alternativos (a su vez subdivididos por la disposición de los cilindros, en línea, v, radial, opuestos). Motores rotativos (Wankel y otras geometrías).
- Ciclo de trabajo: Ciclo de cuatro tiempos (admite aire atmosférico): sobrealimentado (mezcla fresca pre-comprimada admitida), y turbo (mezcla fresca admitida comprimada en un compresor accionado por una tubería de escape), ciclo de dos tiempos: cárter eliminado, sobrealimentado y turbo.
- Diseño y ubicación de la válvula o el puerto: válvulas de cabeza (o cabeza I), válvulas de la cabeza (o cabeza L), válvulas rotativas, puertos de entrada cruzada (puertos de entrada y escape en lados opuestos del cilindro en un extremo), barrido por bucle conexión (puertos de entrada y escape en el mismo lado del cilindro en un extremo), a través o sin flujo de flujo (puertos de entrada y escape o válvulas en diferentes tipos de cilindro).
- Combustible: gasolina, diésel, gas natural, gas licuado de petróleo, alcoholes (metanol, etanol), hidrógeno, combustible dual.

- Método de preparación de la mezcla: carburación, inyección de combustible en los puertos de admisión o colector de admisión, inyección de combustible en el cilindro del motor.
- Método de encendido: encendido por chispa (en motores convencionales donde la mezcla es uniforme y en motores de carga estratificada donde la mezcla no es uniforme), encendido por compresión (en diésel convencionales, así como encendido en motores de gas mediante inyección piloto de diésel).
- Diseño de la cámara de combustión: Cámara abierta (muchos diseños: disco, cuña, hemisferio, tazón - pistón), cámara dividida (cámaras auxiliares grandes y pequeñas; muchos diseños: cámaras de turbulencia, cámaras previas).
- Método de control de carga: aceleración del flujo de combustible y aire juntos, por lo que la composición de la mezcla no se modifica esencialmente, el control del flujo de combustible solo, una combinación de estos.
- Método de enfriamiento: refrigerado por agua, enfriado por aire, sin enfriar (excepto por convección natural y radiación). [19]

### 1.3.2. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

El funcionamiento de un equipo depende en gran medida de las dimensiones de los elementos más importantes, en este caso del motor. De las partes fundamentales se tiene la dimensión del cilindro, el mecanismo biela-manivela y el sistema de renovación de carga. Estos parámetros se definen en el momento del diseño, donde se tiene en cuenta la potencia que se desea producir, el tipo de combustible, su aplicación, entre otras.

Figura 5. Esquema de un motor de combustión interna alternativo



Fuente: Motores de combustión interna alternativos[20]

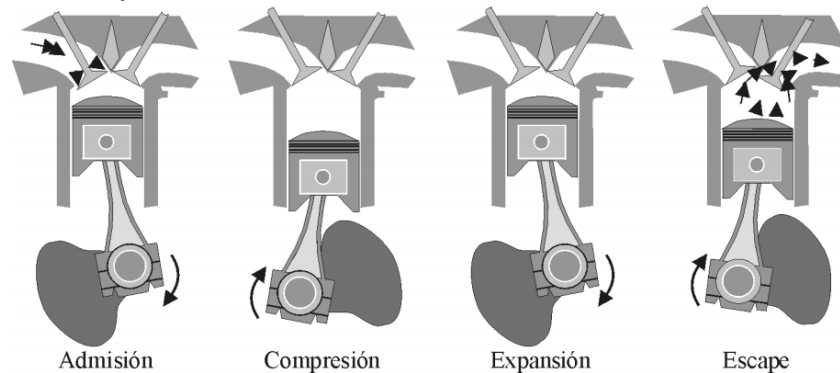
- Diámetro del cilindro (D): Es uno de los parámetros que mejor caracteriza el tamaño de un motor, se denomina calibre. Su valor se tiene en cuenta para el cálculo de la cilindrada y la sección del pistón ya que se debe tener en cuenta que debe haber la mínima fricción.
- Punto muerto superior (PMS): Punto más próximo a la culata
- Punto muerto inferior (PMI): Punto más alejado de la culata
- Carrera (S): Distancia que recorre el pistón entre las dos posiciones extremas, PMS y PMI.
- Longitud de la manivela (l): Permite la conversión del movimiento de traslación y rotación de la biela en una rotación en torno al eje del cigüeñal.
- Longitud de la biela (L): Es quien une el bulón del pistón con la muñequilla del cigüeñal.
- Cilindrada Unitaria ( $V_D$ ): Es el volumen desplazado por el émbolo desde el PMS al PMI
- Volumen cámara de combustión ( $V_C$ ): Es el volumen del cilindro cuando el pistón se encuentra en el PMS y por tanto el volumen mínimo que se alcanza durante la compresión de los gases.
- Relación compresión (r): Es el cociente entre el volumen máximo, estando el pistón en el PMI, y el volumen mínimo en el PMS.[21]

### 1.3.3. FUNCIONAMIENTO

Los ciclos termodinámicos sirven para entender el rendimiento y funcionamiento de cada uno de los estados del motor. Por tal razón se presenta a continuación el ciclo Otto, el cual es el principio de un motor propulsado a gasolina.

En el ciclo Otto ocurre un ciclo termodinámico cuando el fluido actuante experimenta cierto número de procesos que eventualmente regresan al fluido en su estado inicial [22]. El ciclo que planteo Nicolaus Otto consta de cuatro procesos, dos de los cuales no participan en el ciclo termodinámico del fluido operante, pero son fundamentales para la renovación de la carga de este.

Figura 6. Procesos presentes en el ciclo Otto



Fuente: Motores endotérmicos alternativos[20]

- Admisión

Este proceso es cuando el pistón se desplaza desde el PMS hasta el PMI, lo que genera una depresión que induce la entrada de gases, mezcla de aire y combustible, a través del conducto de admisión. Se tiene en cuenta que la válvula de admisión está abierta y la de escape cerrado.

- Compresión

Comienza en el momento en que la válvula de admisión se cierra. El embolo se desplaza desde el PMI al PMS, comprimiendo el fluido. Cuando el pistón se encuentra en el PMS se produce una chispa que da paso a la combustión.

- Expansión:

Por la combustión se produce un aumento de presión en los gases empujando el embolo desde el PMS hasta el PMI. Este desplazamiento es el único del que se obtiene un trabajo.

- Escape

En el PMI se abre la válvula de escape, con el movimiento del pistón hacia el PMS se empiezan a expulsar los humos que quedan de la combustión. Cuando el cilindro se encuentra limpio, se cierra la válvula de escape y se da paso a un nuevo ciclo[20].

Hay dos tipos de motores que se rigen por el ciclo de Otto, los motores de dos tiempos y los motores de cuatro tiempos.

#### 1.3.4. CICLO DE CUATRO TIEMPOS

El ciclo inicia cuando el pistón se desplaza hasta el PMI mientras la válvula de admisión está abierta, permitiendo la entrada de la mezcla de aire y combustible hacia el cilindro (esto no significa que entre de forma gaseosa). Posteriormente, las válvulas se cierran y el pistón se mueve hacia el PMS, comprimiendo la mezcla de aire y combustible. Cuando el pistón llega al final de esta fase, una chispa en la bujía enciende la mezcla generando una combustión liberando energía que provoca la expansión de los gases y el movimiento del pistón hacia el PMI. Se produce la transformación de la energía química contenida en el combustible en energía mecánica transmitida al pistón. Finalmente se abre la válvula de escape y el pistón se mueve hacia el PMS (Punto Muerto Superior), expulsando los gases producidos durante la combustión y quedando preparado para empezar un nuevo ciclo[20].

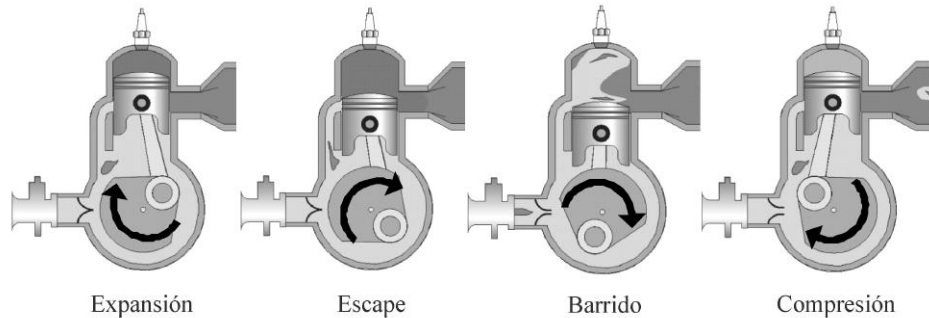
#### 1.3.5. CICLO DE DOS TIEMPOS

Este ciclo se caracteriza por que se cumple en dos carreras del pistón. De igual forma que el motor de cuatro tiempos se presenta los procesos que se identifica el



ciclo Otto, solo que el proceso de admisión de mezcla de aire y combustible ocurre simultáneamente a la expulsión de humos de combustión. Esto se da por que los gases de admisión entran a una mayor presión obligando a salir los gases quemados[20].

Figura 7. Ciclo de proceso de un motor de dos tiempos



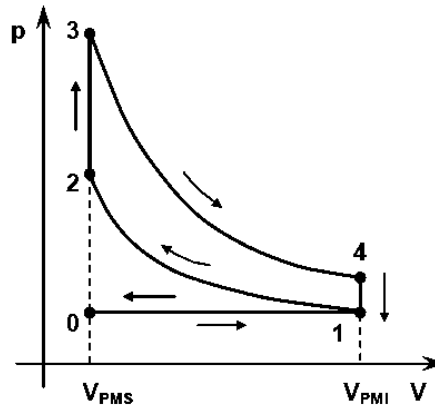
Fuente: Motores endotérmicos alternativos[20]

### 1.3.6. PARÁMETROS INDICADOS

Representan el aumento de la presión instantánea en la cámara a lo largo del ciclo de trabajo en función del volumen del cilindro. En el ciclo de trabajo de un motor de cuatro tiempos se tienen en cuenta fundamentalmente dos lazos, uno de baja presión que es causado por la necesidad de bombear los gases para ser renovados, barrido, y otro de alta presión que se da durante el tiempo en el que el ciclo está cerrado, es decir, en las etapas de compresión, combustión y expansión. Dado lo anterior, se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- Trabajo indicado: Es la integral del lazo de alta presión en el PMI de admisión y el PMI de escape.
- Potencia indicada: Corresponde al trabajo indicado por unidad de tiempo.
- Rendimiento indicado: Es la relación entre la potencia indicada desarrollada por el motor y la potencia térmica del combustible.
- Presión media indicada: Es aquella presión constante que durante una carrera produciría un trabajo igual al trabajo indicado.[20]

Figura 8. Diagrama P-V ciclo Otto, estado teórico



Fuente: Fundamentos de un motor de combustión interna[19]

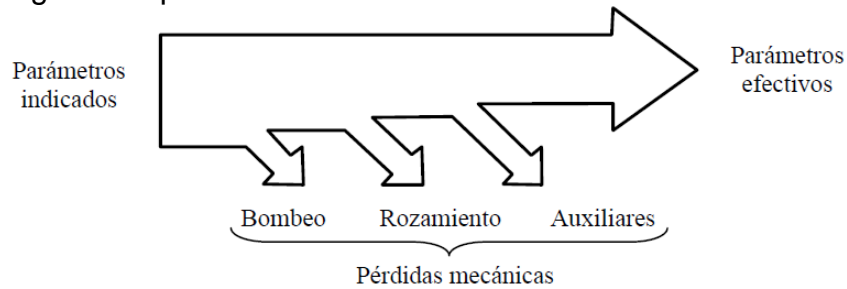
En la figura 8 se puede observar la variación de presión según el cambio de volumen en el cilindro para cada uno de los estados presentes en el ciclo Otto. Cabe aclarar que este es un comportamiento teórico ya que no se tiene en cuenta las pérdidas.

### 1.3.7. PARÁMETROS EFECTIVOS

Se refieren al eje del motor y por tanto incluyen el ciclo cerrado, el bombeo y las pérdidas por fricción y auxiliares. Normalmente, se relacionan los siguientes parámetros:

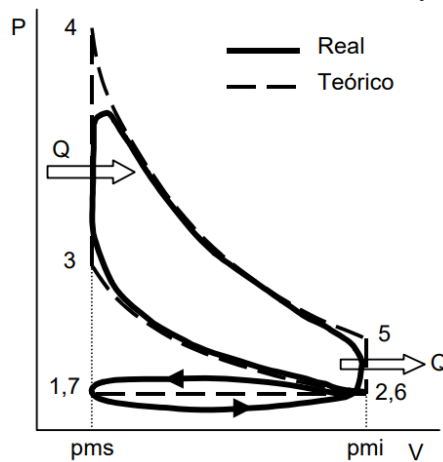
- Par efectivo: Indica la capacidad tractora que da el motor a los dispositivos arrastrados por él; asimismo, indica la capacidad de aceleración.
- Potencia Efectiva: Se obtiene directamente a partir del par efectivo que el motor entrega al régimen de giro. También puede expresarse en función de la indicada y de las pérdidas mecánicas.
- Trabajo efectivo: Se define como el trabajo efectivo indicado menos las pérdidas mecánicas.
- Rendimiento efectivo: Relación entre la potencia efectiva desarrollada por el motor y la potencia térmica disponible.
- Rendimiento mecánico: Se tienen en cuenta las pérdidas mecánicas a partir de la proporción del trabajo indicado.
- Presión media efectiva: Es la presión constante que durante la carrera de expansión produce un trabajo.
- Consumo específico: Es el consumo horario de combustible en relación a la potencia producida[20].

Figura 9. Desglose de pérdidas mecánicas en un motor



Fuente: Motores endotérmicos alternativos[20]

Figura 10. Diagrama P-V del ciclo Otto, estado teórico y real



Fuente: Motores Endotérmicos[20]

Los parámetros efectivos representan valores más reales ya que tienen en cuenta las pérdidas mecánicas producidas en el bombeo, rozamiento y auxiliares. Por lo tanto, el diagrama P-V tiene una variación en su proceso como se muestra en la figura 9.

### 1.3.8. RENDIMIENTO TÉRMICO

La eficiencia o rendimiento térmico de un motor de este tipo depende de la relación de compresión, proporción entre los volúmenes máximo y mínimo de la cámara de combustión. Una relación de compresión baja no requiere combustible con alto número de octanos para evitar la denotación; de la misma manera, una compresión alta requiere un combustible de alto número de octanos, para evitar este fenómeno, es decir, que se produzca una auto ignición del combustible antes de producirse la chispa en la bujía[19].

### 1.3.9. PROPORCIÓN DE AIRE Y COMBUSTIBLE

Esta proporción ha de permanecer lo más uniforme posible, dentro de unos estrechos márgenes de variación, se denomina factor lambda y se sitúa alrededor de 14-15 partes de aire en peso por cada parte de gasolina en peso[22].

### 1.4. ANÁLISIS EXERGÉTICO

El Análisis Exergético es una técnica basada en el concepto de exergía, este término fue sugerido por Rant en 1953 para describir el trabajo máximo que se puede obtener a partir de un sistema termodinámico en condiciones ideales[23]. Su valor numérico depende del estado del sistema y del estado del ambiente. Cuando dos sistemas en diferentes estados entran en contacto, existe una oportunidad de generar trabajo al pasar ambos de sus respectivos estados iniciales a un estado de equilibrio mutuo. Si el proceso ocurre de manera reversible, entonces el trabajo generado tiene el valor máximo. Cuando hay irreversibilidades presentes durante el proceso, entonces parte del potencial de generar trabajo que existía desde el origen es disipado[24]. La exergía permite analizar el desperdicio de los recursos en las actividades, cuantificando el máximo trabajo que puede obtenerse de un desequilibrio entre un sistema y el ambiente que lo rodea, y así identificar las pérdidas termodinámicas internas en un sistema y por otro comparar entre distintas formas de energía

### 1.5. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una de las técnicas desarrolladas para comprender y tratar los impactos asociados a los productos o servicios. Según la norma ISO 14040, el ACV trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (es decir de la cuna a la tumba) [25].

Los ACV se desarrollan en cuatro fases: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario ambiental, evaluación del impacto ambiental e interpretación. La evaluación de impactos es el núcleo central del análisis de ciclo de vida y representa una parte crítica del mismo.

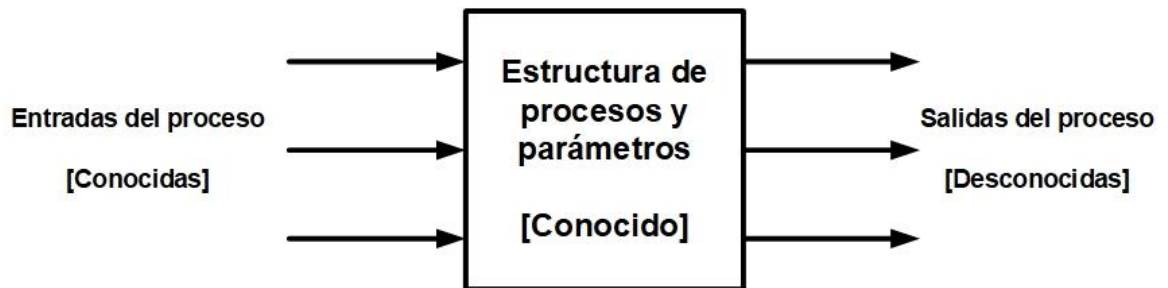
La herramienta SimaPro evalúa, analiza y realiza un seguimiento a los impactos ambientales de productos, procesos y actividades[26]. El software trabaja con diferentes metodologías, una de ellas es la ReCipe que tiene como objetivo principal transformar la larga lista de inventarios de ciclo de vida en un limitado número de puntajes de indicadores los cuales expresan la severidad relativa en una categoría de impacto ambiental a través de su unidad de referencia. Esta metodología incluye categorías de impacto de punto medio (Midpoint – orientado a impactos) y de punto

final (Endpoint – orientado al daño), disponibles para tres perspectivas diferentes (individualista (I), jerarquista (H), e igualitario (E)).[27]

## 1.6. ASPEN PLUS

El software Aspen Plus permite crear un modelo propio de proceso, comenzando con el diagrama de flujo y luego especificando los componentes químicos y las condiciones de operación. El objetivo de simular es modelar y predecir el rendimiento de un proceso. Para esto se debe descomponer el proceso en cada uno de los elementos que influyen en el rendimiento. Para la predicción se usan técnicas de análisis a partir de modelos matemáticos, correlaciones empíricas y paquetes ya incluidos en el simulador [28][29].

Figura 11. Diagrama simulación en Aspen Plus



Fuente: Introduction to Aspen Plus simulation[29]

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio del desempeño exergo-ambiental de un sistema de generación, en zona no interconectada, con base en motor de combustión interna acoplado a un gasificador de biomasa utilizando herramientas de simulación.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer los parámetros del sistema de generación con motor de combustión interna ante diferentes condiciones de carga.
- Establecer las características del sistema de gasificación de acuerdo con los parámetros del motor-generator.
- Simular el comportamiento del sistema gasificador-motor-generator utilizando la herramienta Aspen-Plus, para diferentes condiciones de carga.
- Determinar indicadores de desempeño exergo-ambientales para el sistema gasificador-motor-generator a partir de resultados de simulación.

### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo, se plantea la metodología para llevar a cabo el análisis exergo-ambiental de un sistema de generación, en una zona no interconectada, tomando como base cada uno de los objetivos planteados. Se especifica la información necesaria para establecer las características y los parámetros de funcionamiento del sistema de generación. Asimismo, la manera en que se recopilan los datos que indicaran el desempeño energético y ambiental. Se exponen cuatro fases para la ejecución del proyecto.

La primera fase consta de la recopilación de información sobre la zona del caso estudio para realizar el análisis de la demanda energética. De igual manera, se evalúa el contenido energético de la biomasa seleccionada en estudios anteriores para la producción de syngas. Se realiza la elección de los equipos para la configuración óptima del sistema de generación

La segunda fase comprende el modelamiento matemático el cual se desarrolla en dos partes; la primera consta del análisis termodinámico del motor-generador para definir parámetros efectivos e indicados y la segunda consiste en determinar los flujos de entradas al sistema de gasificación, aire y biomasa, asimismo las condiciones de funcionamiento como la temperatura. Esto se realiza teniendo en cuenta las ecuaciones matemáticas y reacciones químicas para los diferentes procesos que ocurren dentro del sistema, mediante los softwares de trabajo Excel y EES (Engineering Equation Solver).

En la tercera fase se realiza la simulación de todo el sistema en la herramienta de trabajo Aspen Plus, con el fin de obtener la composición del syngas y los flujos necesarios para cumplir con la demanda de la localidad. Posteriormente, se usa el software SimaPro que tiene como finalidad evaluar la huella de carbono del sistema propuesto.

La cuarta fase consiste en relacionar los datos obtenidos en las simulaciones. Finalmente, se establecen indicadores que dan paso a la evaluación exergo-ambiental del sistema con el fin de determinar los impactos ambientales.

## 4. DESARROLLO

### 4.1. FASE 1: DESCRIPCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO

#### 4.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

El caso estudio se desarrolla teniendo en cuenta la demanda total diaria de la localidad Cooperativa ubicada en el noroeste de la cabecera urbana del municipio de Mapiripán, Meta. La localidad consta de quince viviendas, nueve establecimientos comerciales, una institución educativa y un centro de salud.

Los datos se tomaron de la memoria de cálculo del diseño técnico de soluciones de energía sostenible para el departamento del meta el cual fue elaborado por la IPSE. En la tabla 2 se muestra el consumo total diario de energía eléctrica de la localidad.

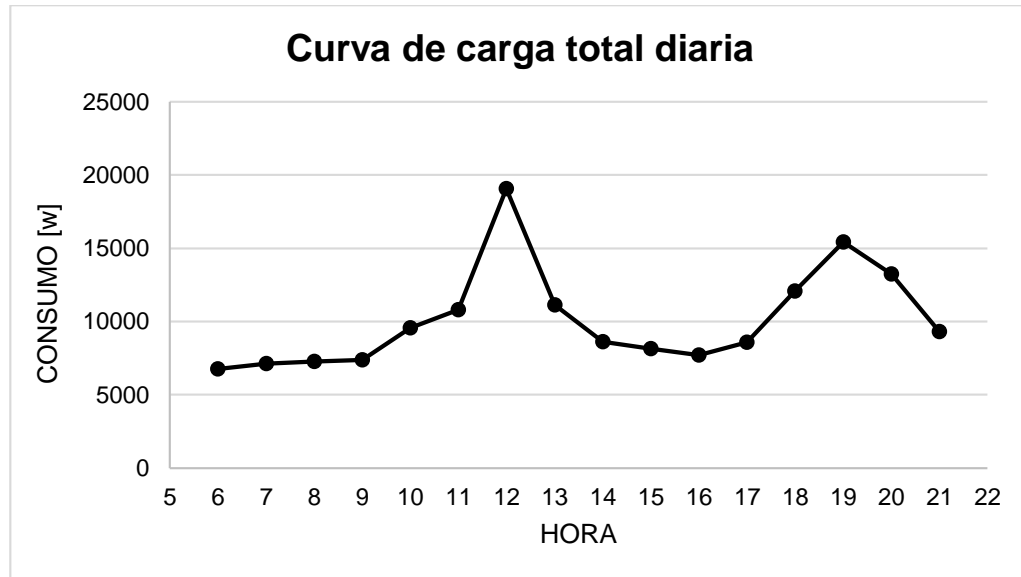
Tabla 2. Demanda total diaria caso de estudio.

<b>Hora</b>	<b>Consumo [W]</b>
6	6750
7	7110
8	7280
9	7390
10	9573
11	10793
12	19048
13	11128
14	8630
15	8140
16	7690
17	8590
18	12065
19	15425
20	13240
21	9308

Fuente: Memoria de cálculo del diseño técnico de soluciones de energía sostenible para el departamento del meta [30]



Gráfica 1. Curva de carga total horaria diaria de la localidad.



Fuente: Memoria de cálculo del diseño técnico de soluciones de energía sostenible para el departamento del meta [30]

En la gráfica 1 se observa la curva de demanda total diaria de la localidad de Mapiripán haciendo referencia a la Tabla 2.

#### 4.1.2. EVALUACIÓN DE LA BIOMASA

La biomasa seleccionada para el proceso de gasificación es Arundo Donax o más conocida como caña flecha debido su alta cantidad de residuos que se generan en procesos artesanales y alto potencial energético. Para el desarrollo del proyecto se tiene presente la composición química, análisis próximo y último de la biomasa de trabajo, determinada a partir de diferentes pruebas realizadas por el laboratorio Idaho National. La fracción del peso de la biomasa contenida en lo que se conoce como ceniza, material volátil o carbono fijo se encuentran en el análisis próximo.

Tabla 3. Análisis Próximo Arundo Donax.

<b>Material</b>	<b>Porcentaje en base seca</b>
Humedad	4,5
Cenizas	18,1
Material Volatil	63,1
Carbono	14,3

Fuente: Arundo Donax Test Results [31]

El análisis último indica el contenido de diferentes componentes como lo son: carbono, nitrógeno, hidrogeno, azufre presente en una amplia muestra en la naturaleza orgánica e inorgánica.

Tabla 4. Análisis ultimo Arundo Donax

<b>Material</b>	<b>Porcentaje en base seca</b>
Hidrogeno	5,52
Carbono	38,7
Nitrogeno	2
Oxigeno	35,5
Aszufre	0,2

Fuente: Arundo Donax Test Results [31]

El potencial energético es el análisis preliminar de biomasa potencialmente útil para la generación de combustibles, a fin de conocer la energía contenida en la biomasa seleccionada, se analiza su poder calorífico mediante la ecuación de Dulong[32].

$$PCS_{Biomasa} = 4,184 * \left( 8148 * C + 34720 * \left( H_2 - \left( \frac{O_2}{8} \right) \right) + 2268,5 * S \right) \quad (1)$$

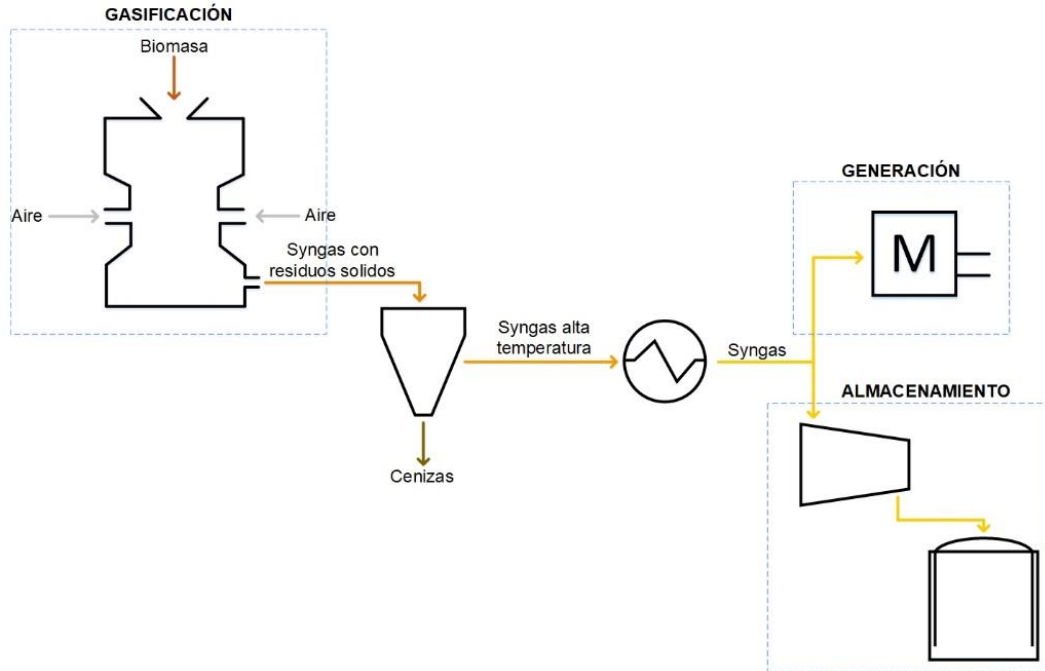
$$PCI_{Biomasa} = PCS_{Biomasa} - 600 * H_2O \quad (2)$$

$$PCI_{Biomasa} = 14917 \frac{kJ}{kg}$$

#### 4.1.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La configuración del sistema se compone de un equipo de gasificación para la producción de Syngas con alto material particulado, para la separación del Syngas de sus respectivas cenizas se usa un separador, posteriormente se baja la temperatura del producido mediante un intercambiador para llevarlo a óptimas condiciones a la hora de ingresar al motor de combustión interna para la generación eléctrica. El excedente de Syngas generado se almacena directamente en un sistema de acumulación compuesto de un compresor con tanque esto para el posterior uso, con el fin de que el sistema de gasificación no trabaje de forma continua sin dejar de suplir la demanda de la localidad estudiada.

Figura 12. Esquema del sistema de generación gasificador-motor



Fuente: Elaborado por los autores

## 4.2. FASE 2: PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO PARA LOS PRINCIPALES EQUIPOS DEL SISTEMA.

### 4.2.1. GASIFICACIÓN

La gasificación se lleva a cabo mediante un gasificador Downdraft de lecho fijo a temperaturas de 600°C con alimentación de biomasa de 25 kg/h y producción máxima de 50 m<sup>3</sup>/h de syngas con aire como agente gasificante. El producto de este proceso es un combustible con bajo poder calorífico.

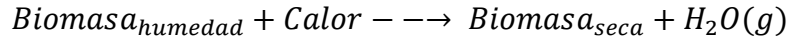
Tabla 5. Especificaciones técnicas del gasificador

<b>Especificaciones gasificador Downdraft KX-50S</b>		
Consumo de material de alimentación	25	kg/h
Gas producido	50	m <sup>3</sup> /h
Poder calorífico del gas	4600 - 5200	kJ/h
Eficiencia	72%	-
Generación de energía	20	kW
Tamaño de la materia prima (longitud)	< 30	mm
Humedad de la materia prima	<20%	-

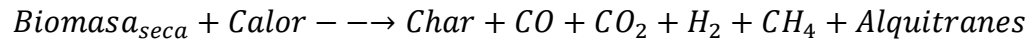
Fuente: 20KW biomass gasification power plant proposal [33]

El proceso de transformación de la materia prima se realiza mediante una serie de reacciones tanto homogéneas como heterogéneas, las cuales se pueden agrupar en las siguientes etapas[13]:

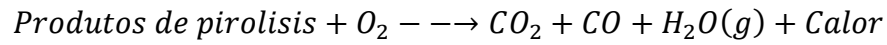
- Secado



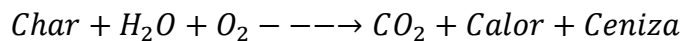
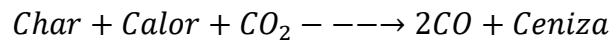
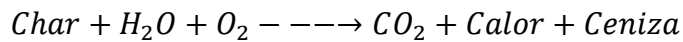
- Pirolisis



- Oxidación



- Reducción



Se realiza el balance teórico tomando como base el análisis último de la biomasa planteado en la tabla 6.

Tabla 6. Balance teórico estequiométrico de la biomasa

BALANCE TEORICO ESTEQUIOMÉTRICO		
$(0,387\ C + 0,0552\ H_2 + 0,02\ N_2 + 0,3098\ O_2 + 0,002\ S) + a_t * (O_2 + 3,76N_2) \longrightarrow X\ CO_2$ $+ Y\ H_2O + Z\ N_2 + W\ SO_2$		
CARBONOS	0,387	<b>X</b>
HIDRÓGENOS	0,0552	<b>Y</b>
OXÍGENOS	0,1068	<b>a<sub>t</sub></b>
NITRÓGENOS	0,422	<b>Z</b>
AZUFRES	0,002	<b>W</b>

Fuente: Elaborado por los autores

Posteriormente se realiza el balance real, especificando un factor de aireación, n, de acuerdo con el proceso realizado en este caso con un valor de 0.46

Tabla 7. Balance real estequiométrico de la biomasa

<b>BALANCE REAL ESTEQUIOMÉTRICO</b>		
$(0,387 C + 0,0552 H_2 + 0,02 N_2 + 0,3098 O_2 + 0,002 S) + n * a_{real} * (O_2 + 3,76N_2) \text{ -----} > X_{real}$ $CO_2 + Y_{real} H_2O + Z_{real} N_2 + W_{real} SO_2$		
CARBONOS	0,387	$X_{real}$
HIDRÓGENOS	0,0552	$Y_{real}$
OXÍGENOS	0,1068	$a_{real}$
NITRÓGENOS	0,422	$Z_{real}$
AZUFRES	0,002	$W_{real}$

Fuente: Elaborado por los autores

Con base en los balances anteriormente planteados se calculan diferentes parámetros de funcionamiento del gasificador relacionados a continuación:

- Relación Aire-Combustible

$$A/C = \frac{a_{real} * 4.76 * 28.84}{MM_{Biomasa}} \quad (3)$$

$$A/C = 1.332$$

- Flujo de aire

$$\dot{m}_{aire_G} = \dot{m}_{Biomasa} * A/C \quad (4)$$

#### 4.2.2. MOTOR-GENERADOR

Se escoge un motor que cumpla con el pico de consumo el cual se genera al medio día y es de aproximadamente 19 kW, esto se puede observar en la tabla 2. Teniendo en cuenta esta restricción, el motor a escoger debe tener una potencia aproximada de 22 kW. Adicionalmente se tuvo en cuenta que el motor trabaje a gas natural para no realizar ningún cambio físico en él, para esta consideración se analiza la similitud de las características del gas natural y el gas de síntesis. La pérdida de energía debido al bajo poder calorífico del Syngas se compensa mediante la relación  $A/C$ .

En la tabla 8 se observan los datos del motor de combustión interna seleccionado.

Tabla 8. Especificaciones del Motor-Generador

<b>Especificaciones motor Model QT022 - 22 kW</b>		
Número de cilindros	4	-
Desplazamiento	2,4	Lt
Diámetro del cilindro	86,5	mm
Carrera	100	mm
RPM nominales	1800	rpm
Relación de compresión	9.5:1	-
Tipo de combustible	Gas natural, Vapor de propano	-
Humedad de la materia prima	<20%	-

Fuente: Generac [34]

Los parámetros que no son mostrados en la ficha técnica del motor se pueden calcular, como lo son:

- Volumen cámara de combustión

$$rc = \frac{Vs + Vd}{Vd} \quad (5)$$

- Cilindraje

$$Cilindrada = \frac{Vs}{\#Cilindros} \quad (6)$$

- Ciclos por segundo

$$Ciclo_{seg} = \frac{rpm}{120} \quad (7)$$

- Revoluciones por ciclo y por segundo

$$Rev_{seg} = \frac{rpm}{60} \quad (8)$$

$$Rev_{ciclo} = \frac{Rev_{seg}}{Ciclo_{seg}} \quad (9)$$

#### 4.2.2.1. Parámetros funcionamiento

- Flujo de masa de masa admitida

$$m_{admitida} = \frac{P * V}{R * T} \quad (10)$$

$$m_{admitida_{kg}} = m_{admitida} * MM_{mezcla} \quad (11)$$

- Relación aire-combustible

$$A/C_{Motor} = \frac{\dot{m}_{aire_{motor}}}{\dot{m}_{syngas}} \quad (12)$$

#### 4.2.2.2. Parámetros indicados

- Estados termodinámicos del teórico

Son las condiciones a las que funciona en el motor en cada una de sus etapas. También, se considera el calor y trabajo tanto consumido como generado.

Estado 1: Es la admisión de la mezcla de aire y combustible, esta ocurre a condiciones ambiente y como volumen se tiene el total del cilindro, es decir:

$$T_1 = 298 [K] \quad P_1 = 101,235 [kPa]$$

$$V_T = V_s + V_d \quad (13)$$

Estado 2: Consiste en la compresión de la mezcla de gases.

$$P_2 = P_1 * r_c^k \quad (14)$$

$$V_2 = V_d \quad (15)$$

Para este proceso se necesita un trabajo el cual se calcula teniendo en cuenta que no hay flujo de calor:

$$Q - W = \Delta U \quad (16)$$

$$W_{1-2} = \dot{m}_{mezcla} * \frac{P_2 * V_{2esp} - P_1 * V_{1esp}}{1 - k} \quad (17)$$

$$\Delta U = \dot{m}_{mezcla} * C_{v_{mezcla}} * (T_2 - T_1) \quad (18)$$

Estado 3: Son las condiciones de los gases quemados, ya que se presenta después de la combustión, es decir, hay una liberación de calor.

$$P_3 = P_2 * \left(\frac{T_3}{T_2}\right) \quad (19)$$

$$V_3 = V_2 \quad (20)$$

Para el cálculo del calor liberado se tiene en cuenta la ecuación (16) y que no hay un trabajo.

$$Q_{2-3} = \dot{m}_{mezcla} * PCI_{syngas} \quad (21)$$

$$\Delta U = \dot{m}_{mezcla} * Cv_{mezcla} * (T_3 - T_2) \quad (22)$$

Estado 4: Consiste en la expansión de los gases quemados por lo que se produce un trabajo y así finalmente dar paso a la salida de los humos.

$$P_4 = P_3 * \left(\frac{1}{rc}\right)^k \quad (23)$$

$$V_4 = V_1 \quad (24)$$

$$W_{3-4} = \dot{m}_{mezcla} * \frac{P_4 * V_{4esp} - P_3 * V_{3esp}}{1 - k} \quad (25)$$

$$\Delta U = \dot{m}_{mezcla} * Cv_{mezcla} * (T_4 - T_3) \quad (26)$$

- Trabajo indicado: Es el trabajo total, tanto necesario como generado, en el motor de combustión interna.

$$W_i = W_{1-2} + W_{3-4} \quad (27)$$

- Potencia indicada

$$N_i = rpm * i * W_i \quad (28)$$

Donde  $i$  es un factor que depende de las carreras que realice el motor, para un motor de cuatro, que es el caso estudio, tiene un valor de 0,5.

- Rendimiento indicado

$$\eta_i = \frac{N_i}{\dot{m}_{syngas} * PCI_{syngas}} \quad (29)$$

- Presión media indicada



$$PMI = \frac{W_i}{V_d} \quad (30)$$

#### 4.2.2.3. Parámetros efectivos

- Par efectivo

$$M_e = \frac{Pot_{total}}{raps * \eta_{gen}} \quad (31)$$

- Potencia efectiva

$$N_e = M_e * 2 * \pi * rpm \quad (32)$$

- Trabajo efectivo

$$W_e = \frac{N_e}{i * n} \quad (33)$$

- Rendimiento efectivo

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_{syngas} * PCI_{syngas}} \quad (34)$$

- Presión media efectiva

$$PME = \frac{Rev_{ciclo} * 2 * \pi * M_e}{Cilindrada} / 1000 \quad (35)$$

- Estados termodinámicos reales

Para el cálculo de los estados se halla la relación de presión la cual depende de la presión media efectiva, con la siguiente ecuación:

$$rp = \frac{P_1 * rc^k + k * rc * pme - k * pme - P_1 * rc - rc * pme + pme}{P_1 * (rc^k - rc)} \quad (36)$$

El primer estado permanece igual que los parámetros indicados ya que son las condiciones de entrada de la mezcla de gases.

Para el estado dos, compresión, se recalcula la temperatura mientras que la presión si es la misma que se plantea en los parámetros indicados:

$$T_{2REAL} = P_1 * rc^{k-1} \quad (37)$$

En la combustión se tiene en cuenta la relación de presión de la ecuación (36), por lo que los valores de temperatura y presión cambian, por lo tanto, el calor generado también varía.

$$P_{3REAL} = rp * P_{2REAL} \quad (38)$$

$$T_{3REAL} = \frac{P_{3REAL} * T_{2REAL}}{P_{2REAL}} \quad (39)$$

Finalmente, se hallan los nuevos valores de temperatura y presión en el estado de expansión:

$$P_{4REAL} = P_{3REAL} * \left(\frac{1}{rc}\right)^k \quad (40)$$

$$T_{4REAL} = T_{3REAL} * \left(\frac{1}{rc}\right)^{k-1} \quad (41)$$

### 4.3. FASE 3: SIMULACIÓN DEL SISTEMA

#### 4.3.2. ASPEN PLUS

Para la modelación del proceso de gasificación de la biomasa, mediante el cual, se realiza la producción de gas de síntesis para un requerimiento máximo de  $54 m^3$  con el fin suplir la demanda a través del motor-generator o el respectivo almacenamiento de los excesos directamente al tanque, Se usa la herramienta de simulación de procesos Aspen Plus.

##### 4.3.2.1. Gasificación

Para la simulación del sistema gasificador en Aspen Plus, cada equipo representa una etapa del proceso de gasificación. Esto se realiza tomando como base un ejemplo de la librería, en el que la materia prima de ingreso, es carbón y el producto es un gas de síntesis similar a lo que se quiere obtener. La figura 13 que representa el sistema de gasificación simulado en Aspen Plus.

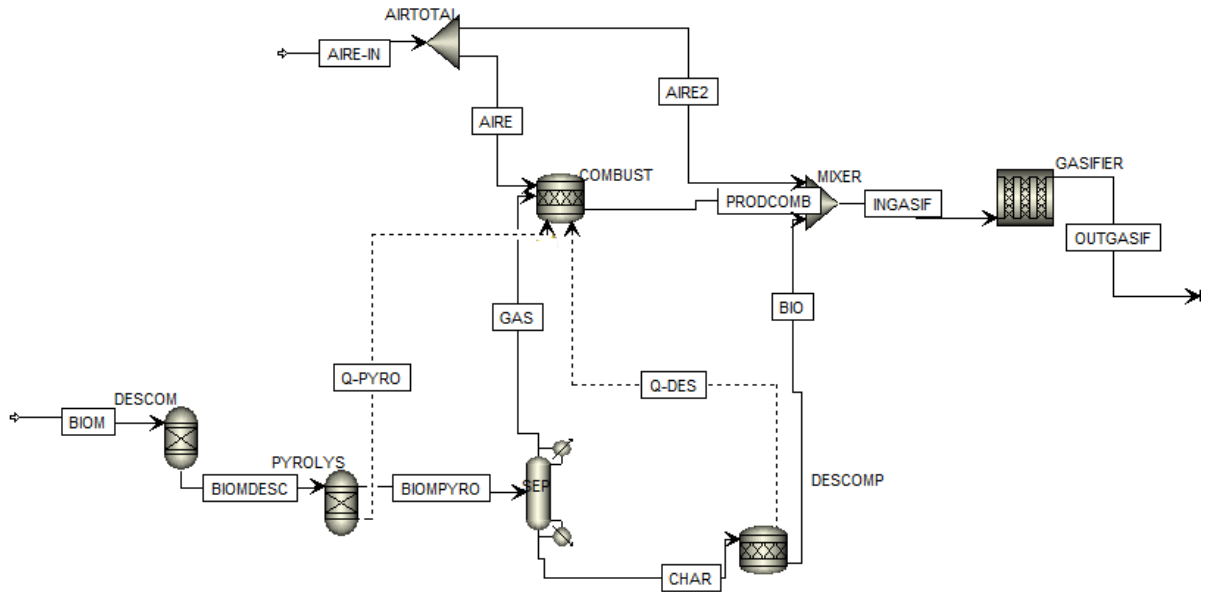
La corriente de materia prima que ingresa al sistema se define como *no convencional* puesto que, la herramienta de simulación Aspen plus no tiene definida la biomasa *Arundo Donax* y sus características. Para esto se crea una línea de entrada teniendo en cuenta la composición química, el análisis próximo, ultimo, condiciones de temperatura y presión.

Tabla 9. Condiciones Entrada Biomasa

<b>Condiciones de entrada de la Biomasa</b>		
Temperatura	298	K
Presión	101,325	kPa
Flujo	25	kg/h

Fuente: Elaborado por los Autores

Figura 13. Esquema del sistema de gasificación en Aspen Plus



Fuente: Aspen Plus

Adicional a la entrada de biomasa se observa la línea del agente gasificante, aire en este caso, por cuestiones operativas de bajos costos y fácil manejo. Se simula a condiciones ISO y con flujo de aire necesario para obtener las características del gas de síntesis necesarias para suplir la demanda.

Tabla 10. Condiciones entrada Agente Gasificante

Condiciones de entrada del Agente Gasificante		
Temperatura	298	K
Presión	101,325	kPa
Flujo	29,62	kg/h

Fuente: Elaborado por los autores

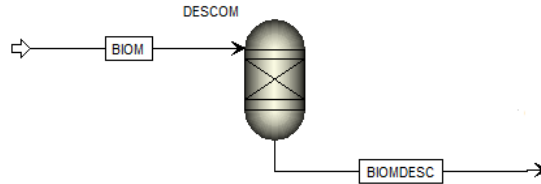
El agente gasificante se emplea en dos procesos, la oxidación y la reducción, por esto es necesaria la separación de su flujo en diferentes proporciones. Estos factores se tomaron de estudios realizados.

$$Aire_{oxi} = 0.67 * Aire_{gasif} \quad (42)$$

$$Aire_{Reduc} = 0.33 * Aire_{gasif} \quad (43)$$

En la primera etapa del proceso de gasificación, se lleva a cabo la descomposición de la biomasa, esto con el fin de fraccionar las moléculas de gran tamaño, el proceso ocurre en un reactor de tipo *RYield* con parámetros de entrada de temperatura y presión.

Figura 14. Proceso de Descomposición



Fuente: Aspen Plus

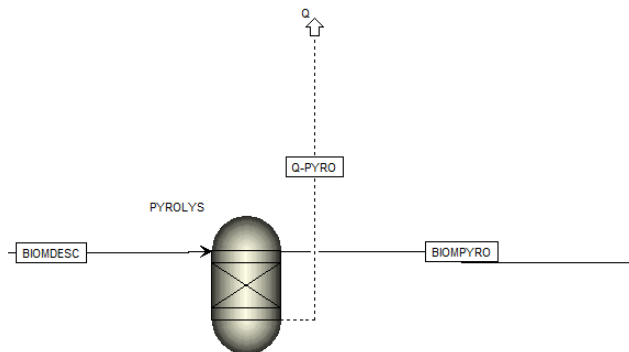
Tabla 11. Condiciones de Operación Proceso de Descomposición

Condiciones de Operación Proceso de Descomposición		
Temperatura	873	K
Presión	101,325	kPa

Fuente: Elaborado por los autores

Después del proceso de fraccionamiento la línea de *BIOMDESC* ingresa a la etapa de pirolisis con parámetros específicos de temperatura y presión generando una mezcla de gases y sólidos, el calor residual de la operación es utilizado más adelante, la fase descrita previamente se lleva a cabo en un reactor tipo *RGibbs*.

Figura 15. Proceso de Pirolisis



Fuente: Aspen Plus

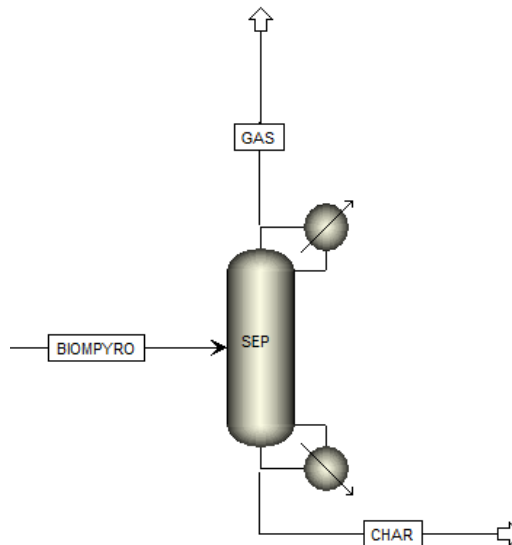
Tabla 12. Condiciones de Operación Proceso de Pirolisis

Condiciones de Operación Proceso de Descomposición		
Temperatura	873	K
Presión	101,325	kPa

Fuente: Elaborado por los autores

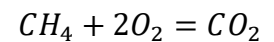
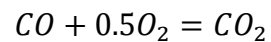
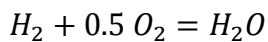
Debido a la mezcla de sólidos y gases, obtenidos como producto en la etapa de pirolisis es necesario dividir los sólidos de los gases, esta acción se realiza por medio de un separador (Sep).

Figura 16. Separador de Sólidos



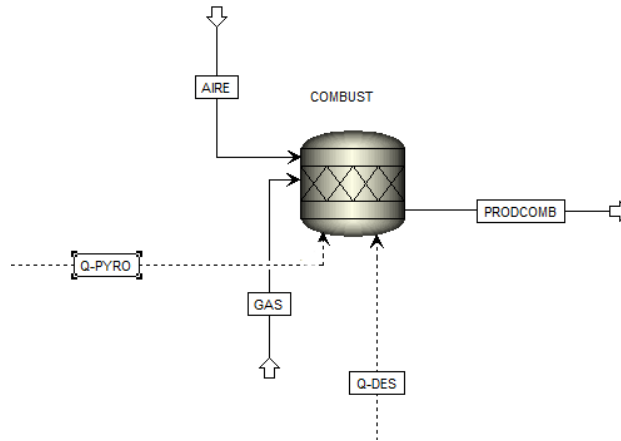
Fuente: Aspen Plus

La línea denominada *GAS* se lleva al proceso de Oxidación, en la simulación de la etapa se hace presente el agente gasificante para realizar una serie de reacciones de oxidación parcial relacionadas a continuación:



El proceso de Oxidación se desarrolla con la ayuda de un reactor tipo *RStoic* de la librería de Aspen Plus a condiciones específicas de presión, 101.325 kPa, proporcionando como resultado un gas con diferentes proporciones de una serie de compuestos.

Figura 17. Proceso de Oxidación



Fuente: Aspen Plus

La línea Char experimenta una descomposición de sus partículas mediante un reactor RStoic con parámetros específicos de temperatura y presión, además se define la reacción para obtener como resultado los componentes de nuestro interés.

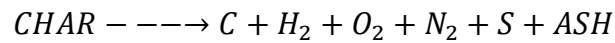
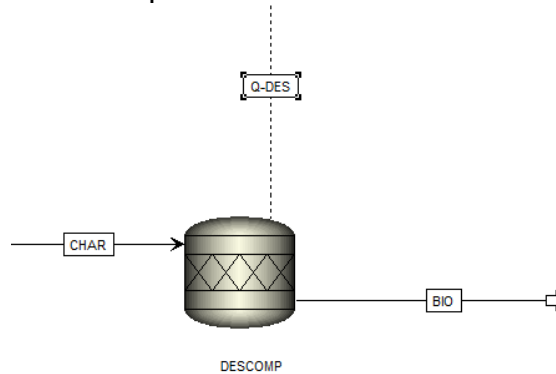


Figura 18. Proceso de Descomposición de CHAR.



Fuente: Aspen Plus

Tabla 13. Condiciones de Operación Proceso de Descomposición CHAR.

Condiciones de Operación Proceso de Descomposición CHAR		
Temperatura	873	K
Presión	101,325	kPa

Fuente: Elaborado por los autores

Para el aprovechamiento de estos residuos el flujo de BIOM hace parte de la línea de entrada del proceso de gasificación junto con el producto de la Oxidación denominado PRODCOMB y el agente gasificante. La etapa de Reducción la realiza un reactor RPlug con temperatura especificada de 873 K y diferentes reacciones para la producción del gas de síntesis requerido

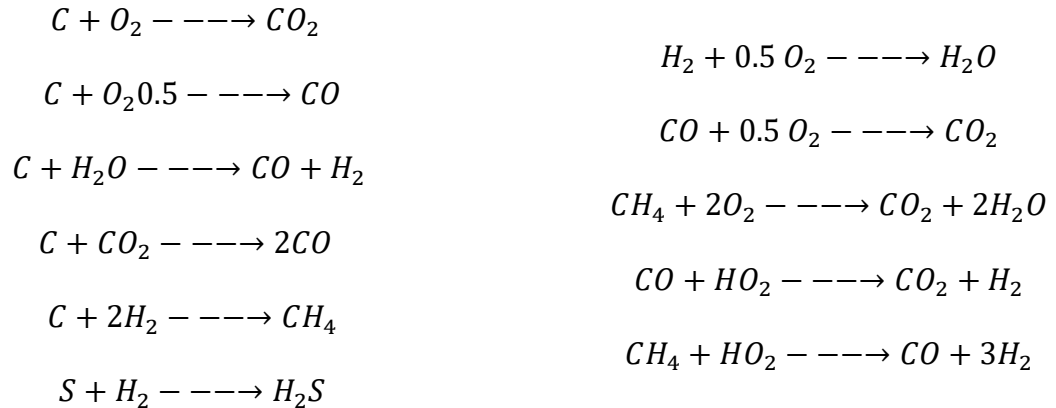
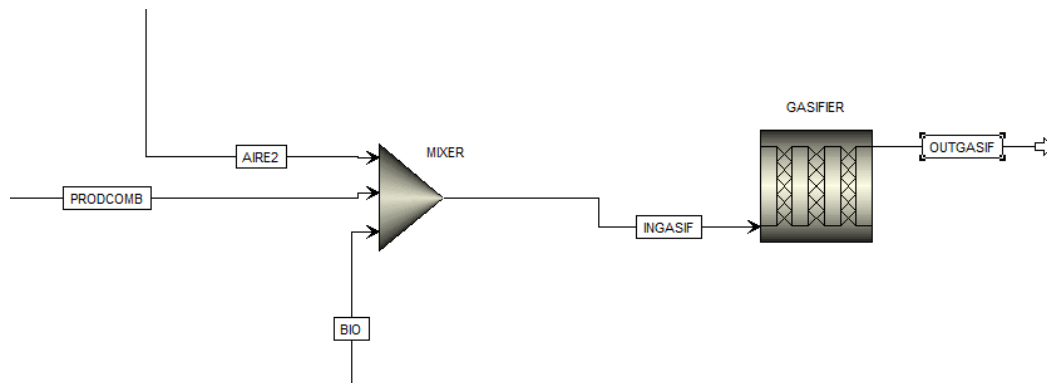


Figura 19. Proceso de Descomposición de CHAR



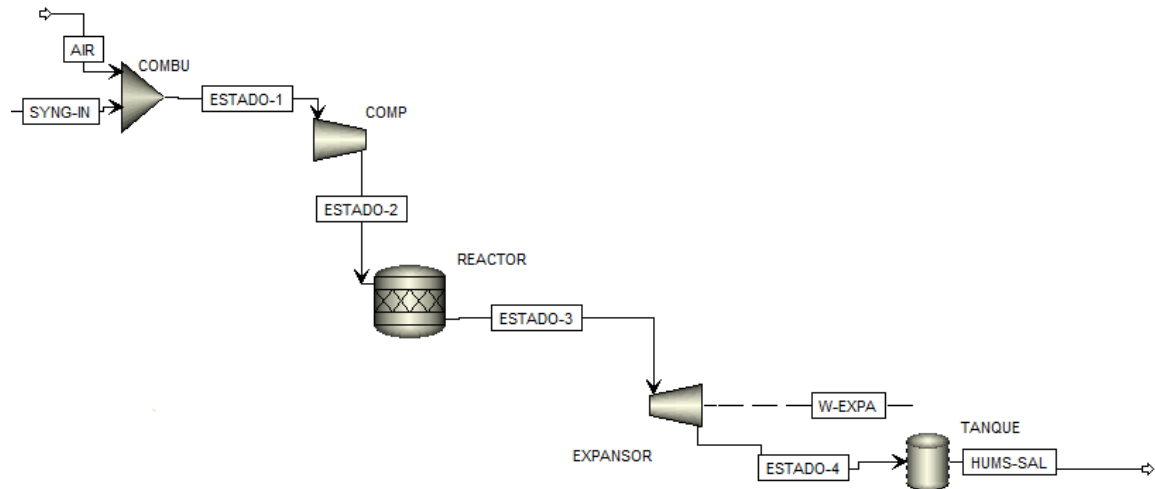
Fuente: Aspen Plus

Una vez obtenido el syngas, se continúa con su respectiva limpieza de impurezas por medio de un *Cyclone*, para conseguir un gas de síntesis libre de cenizas, nombrado como SYNGAS-W con alto contenido de humedad, la cual se retira gracias a un separador. Por último, el gas de síntesis es dirigido a un intercambiador de calor con el fin de llevarlo a condiciones normales para un mejor funcionamiento a la hora del ingreso al motor. Las características del syngas obtenido son analizadas por medio de su respectiva composición, se evalúa el potencial calorífico mediante balances químicos.

#### 4.3.2.2. Motor

Para la simulación del funcionamiento de un motor de combustión interna se tienen en cuenta cada uno de los estados de funcionamiento ya que el software no cuenta con un equipo que realice todos los procesos presentes en el ciclo Otto. A continuación, se muestra la configuración usada para el motor.

Figura 20. Sistema Motor-Generador



Fuente: Aspen Plus

Una vez obtenido el syngas, se limpia y se acondiciona, temperatura y presión, para darle ingreso al motor con un flujo de aire que va determinado por la relación aire-combustible. La cantidad de syngas que ingresa depende de la potencia que se necesite generar.

Tabla 14. Condiciones de entrada al Motor-Generador

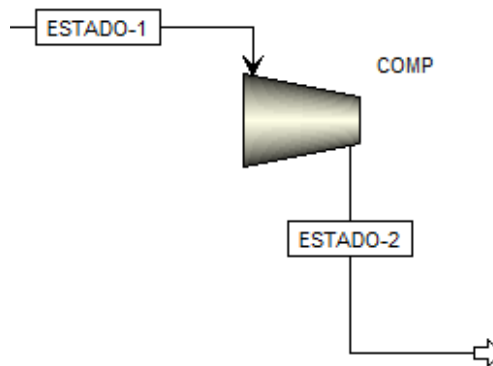
<b>Condiciones de entrada del Syngas y Aire</b>		
Temperatura	298	K
Presión	102,325	kPa
A/C <sub>MOTOR</sub>	1,5	-

Fuente: Elaborado por los autores

Para el primer estado, se usa el equipo *Compr* el cual simula el proceso de compresión de fluidos. Se tiene en cuenta el cambio de presión que se desea efectuar. Este valor se toma de los parámetros efectivos, la  $P_{2REAL}$ .



Figura 21. Proceso de compresión de la mezcla de gases



Fuente: Aspen Plus

En la combustión de la mezcla de gases se usa el reactor tipo *RStoic*, para que represente este proceso se ingresan las diferentes reacciones químicas que suceden. Además, se define la presión y la temperatura correspondiente,  $T_{3REAL}$  y  $P_{3REAL}$ .

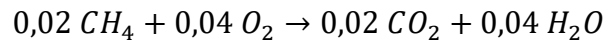
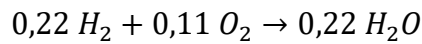
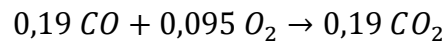
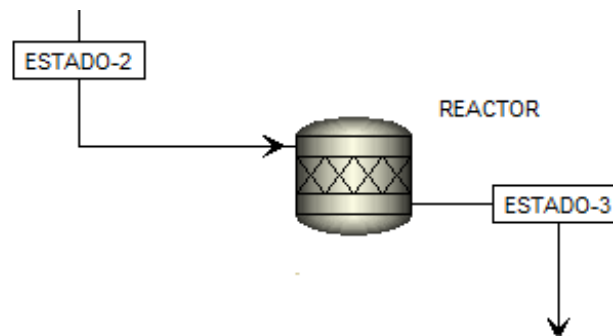


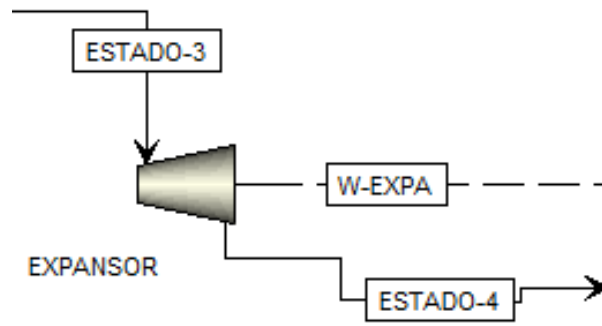
Figura 22. Proceso de Combustión de la mezcla de gases



Fuente: Aspen Plus

La unidad *Compr* representa la expansión de los gases, se configura de tal forma que funcione como turbina y se especifica el cambio de presión la cual sería  $P_{4REAL}$ . Se agrega una línea de flujo a la salida para conocer la potencia producida por el motor.

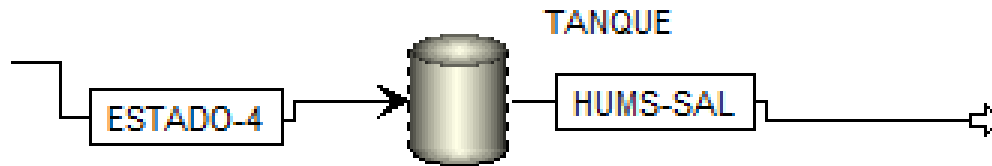
Figura 23. Proceso de expansión de los gases quemados



Fuente: Aspen Plus

Finalmente, se agrega un *TANK* con el fin de disminuir la presión de los gases quemados,  $101,325\text{ kPa}$ , pero el volumen permanece constante. Así se acondicionan los humos para su salida al medio.

Figura 24. Proceso de acondicionamiento de los humos para salir al medio

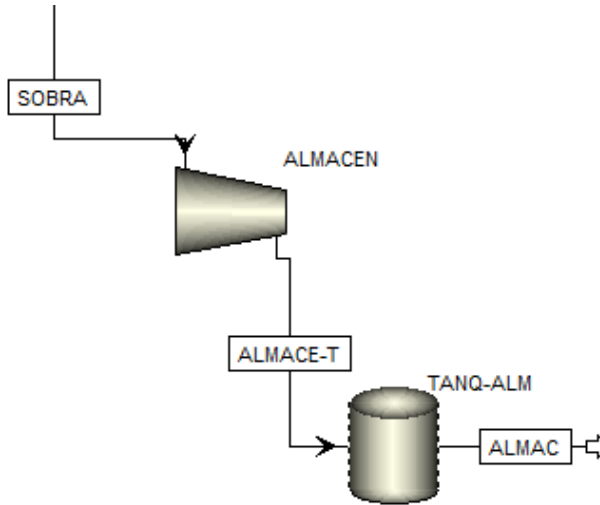


Fuente: Aspen Plus

#### 4.3.2.3. Sistema de almacenamiento

Según la curva de demanda de la localidad las potencias que se necesitan suplir durante el día varían. Por esto no se va a consumir todo el syngas producido, por lo que se necesita un lugar donde acumularlo. Para esto se plantea un sistema de compresor y tanque, donde se almacena el syngas sobrante para usarlo cuando el gasificador no esté en funcionamiento. Para los parámetros de almacenamiento se tiene en cuenta la presión, que se definió a  $10\text{ bar}$ . En la simulación se usa el equipo *Comp* y *TANK* a las condiciones planteadas.

Figura 25. Sistema de almacenamiento de syngas no usado



Fuente: Aspen Plus

#### 4.3.3. SIMAPRO

Con la finalidad de realizar una evaluación de los impactos de la configuración del sistema analizado, se efectúa la simulación mediante el software SimaPro, del caso planteado con anterioridad a las diferentes cargas de energía durante día, de modo similar se evalúan los impactos del grupo electrógeno que se encuentra en funcionamiento en la zona para llevar a cabo un comparativo.

Para simular el sistema, el volumen de control planteado tiene a su vez definido individualmente el sistema de gasificación, el motor de combustión interna y el sistema de almacenamiento. Tomando los datos obtenidos de la simulación en Aspen Plus como flujo másico de la biomasa, flujo másico de gas de síntesis, aire, cenizas y componentes de los humos para las emisiones al ambiente. Estos datos son ingresados para 1 kW y analizados para la generación de las diferentes demandas de energía de la zona.

Figura 26. Volumen de control del sistema



Fuente: Elaborado por los autores

#### 4.3.3.1. Gasificador

Se toma un caso base de la librería de SimaPro este contiene una biomasa genérica, la cual es caracterizada por medio de su poder calorífico; se deben tener los datos de ingreso en unidades de masa, por esto se utiliza la ecuación (44).

$$m_{Biomasa1[kW]} = \frac{\dot{m}_{Biomasa22[kW]}}{Pot_{Total}} \quad (44)$$

La entrada del aire se da en metros cúbicos, el dato se toma del valor ya establecido anteriormente. Para flujo de gas de síntesis se necesita el dato de ingreso en unidades de masa, utilizando la siguiente ecuación:

$$V_{Aire\ Gasificador1[kW]} = \frac{\dot{V}_{Aire\ Gasificador22[kW]}}{Pot_{Total}} \quad (45)$$

#### 4.3.3.2. Motor de combustión interna

Se selecciona un motor que funciona con gas de síntesis para la producción de energía eléctrica en la librería que contiene SimaPro teniendo en cuenta datos de entrada de Syngas en  $m^3$  producido por el gasificador analizado anteriormente, para ello se tiene en cuenta la siguiente ecuación:

$$V_{Syngas1[kW]} = \frac{\dot{V}_{Syngas22[kW]}}{Pot_{Total}} \quad (46)$$

El aire de ingreso al motor se da en  $m^3$ , este valor se toma de la simulación realizada por medio de Aspen Plus y se convierte a las unidades necesarias con la siguiente ecuación:

$$V_{Aire\ Motor1[kW]} = \frac{\dot{V}_{Aire\ Motor22[kW]}}{Pot_{Total}} \quad (47)$$

Los gases de combustión del motor se toman como emisiones al aire y se ingresan de acuerdo con la composición de cada elemento.

Tabla 15. Inventario Utilizado en los Procesos

ENTRADAS			
Gasificador	Biomasa	0.3888	kg
	Aire <sub>Gasif</sub>	0.594962	m <sup>3</sup>
	Syngas	1	m <sup>3</sup>
Motor	Aire <sub>Motor</sub>	2.12835	m <sup>3</sup>
	Syngas	1.64618	m <sup>3</sup>
	Energía	1	kWh

Fuente: Elaborado por los autores

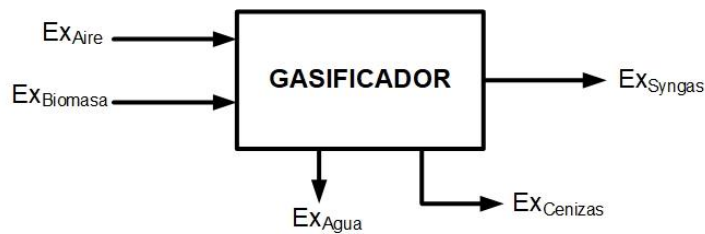
En las siguientes tablas se muestra el inventario usado en sistema creado en SimaPro, es importante tener en cuenta que los datos de biomasa, flujo volumétrico de aire y flujo volumétrico de Syngas se tiene para la generación de 1 kW.

#### 4.4. FASE 4: ANÁLISIS EXERGÉTICO E INDICADORES DE DESEMPEÑO

##### 4.4.3. ANÁLISIS EXERGÉTICO

Inicialmente en el análisis exergético se realiza para evaluar los valores de exergía relacionados con los subsistemas y los flujos de energía, para ello se establecen 2 volúmenes de control de la configuración ya planteada.

Figura 27. Volumen de control de exergías del gasificador



Fuente: Elaborado por los autores

En el gasificador se calcula la exergía química de la Biomasa mediante la ecuación 48 de para esto se toma el  $PCI_{Biomasa}$ .

$$Ex_{comb} = \beta * PCI_{Biomasa} \quad (48)$$

$$\beta = \frac{1.0414 + 0.177 \left(\frac{C}{H}\right) - 0.3328 \left(\frac{O}{C}\right) (1 + 0.3377)}{1 - 0.4021 \left(\frac{O}{C}\right)} \quad (49)$$

La exergía física del agua y del aire se calcula mediante la siguiente expresión, teniendo en cuenta que los estados muertos de cada flujo son diferentes.

$$Ex_f = \left( h_{flujoEntrada} - h_{EstadoMuerto_{flujoEntrada}} \right) - T_o * \left( S_{flujoEntrada} - S_{EstadoMuerto_{flujoEntrada}} \right) \quad (50)$$

La exergía total de syngas contiene exergía física y exergía química. La exergía química del Syngas se halla por medio de la siguiente expresión que corresponde a la exergía química estándar de una mezcla:

$$Ex_{quimica_{syngas}} = \sum y_i Ex_{estandar} + RT_o \sum y_i \ln(y_i) \quad (51)$$

La exergía estándar de cada elemento se relaciona en el Anexo A.10, se utiliza la constante de los gases ideales 8.3144 kJ/Kmol \* K dando como resultado la exergía en unidades de kJ/Kmol, se debe dividir este valor en su peso molecular para obtener la exergía química en kJ/kg

$$MM_{syngas} = \sum y_i * MM_{masa_i} \quad (52)$$

$$Ex_{quimica_{syngas}} [kJ/kg] = \frac{Ex_{quimica_{syngas}}}{MM_{masa_{syngas}}} \quad (53)$$

En cuanto a la exergía física se calcula con la ecuación (50) teniendo como referencia el estado muerto del aire. Finalmente, el volumen de control incluye una exergía por pérdida de calor, expresa en las siguientes ecuaciones:

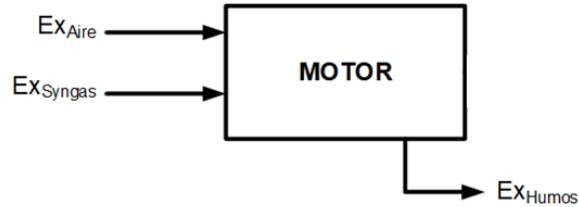
$$\dot{Q}_{Gasificador} = Salida - Entrada \quad (54)$$

$$Entradas = (\dot{m}_{Biomasa} * PCI_{Biomasa}) + (\dot{m}_{aire_G} * h_{aire}) \quad (55)$$

$$Salidas = (\dot{m}_{syngas_G} * PCI_{syngas}) + (\dot{m}_{agua} * h_{agua}) + (\dot{m}_{cenizas} * h_{cenizas}) \quad (56)$$

$$Ex_{\dot{Q}_{Gasificador}} = \left( 1 - \left( \frac{T_o}{T_{gasificador_{prom}}} \right) \right) * \dot{Q}_{Gasificador} \quad (57)$$

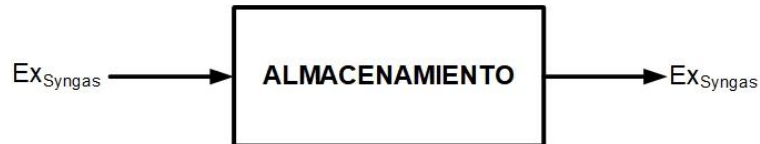
Figura 28. Volumen de control de exergías del motor



Fuente: Elaborado por los autores

Para el motor se toma como entrada la exergía del Syngas calculada anteriormente, las corrientes de salida del volumen de control son, la exergía química de los humos calcula mediante la expresión (51) con sus respectivas fracciones de los elementos que lo conforma Tomados de la simulación realizada en Aspen Plus y la exergía de calor liberado calculada por la ecuación (57).

Figura 29. Volumen de control de exergías del sistema de almacenamiento



Fuente: Elaborado por los autores

En la línea de entrada del syngas se toma la exergía química de salida del gasificador y se calcula la exergía física por medio de la ecuación (50) a condiciones de ingreso a el compresor, para la línea de salida del compresor se calcula la exergía física con la ecuación (50) con parámetros de salida del equipo.

#### 4.4.4. INDICADORES DE DESEMPEÑO

Medir el desempeño energético del sistema es de gran importancia para ello se calculan las irreversibilidades por volúmenes de control y las eficiencias exegéticas.

##### 4.4.4.1. Irreversibilidades

Gracias a las irreversibilidades en cada volumen de control se da a conocer cual componente genera más dentro del sistema. Para el gasificador y motor se encontró la exergía destruida, teniendo en cuenta la exergía química y física en cuanto al compresor se tiene la exergía física. A continuación, se muestran cada una de las expresiones usadas.

- Gasificador

$$Irr_{Gasificador} = \sum \dot{m}_{entrada} * (Ex_f + Ex_q)_{entrada} - \sum \dot{m}_{salida} * (Ex_f + Ex_q)_{salida} \quad (58)$$

- Motor

$$Irr_{Motor} = \sum \dot{m}_{entrada} * (Ex_f + Ex_q)_{entrada} - \sum \dot{m}_{salida} * (Ex_f + Ex_q)_{salida} \quad (59)$$

- Compresor

$$Irr_{Compresor} = \sum \dot{m}_{entrada} * (Ex_f + Ex_q)_{entrada} - \sum \dot{m}_{salida} * (Ex_f)_{salida} \quad (60)$$

- Sistema

$$Irr_{Total} = Irr_{Compresor} + Irr_{Motor} + Irr_{Gasificador}$$

#### 4.4.4.2. Eficiencias energéticas y exergéticas

Para establecer las eficiencias energéticas, se debe especificar, el calor de cada proceso calculado mediante la ecuación (51) y las respectivas líneas de suministro y producción. La eficiencia se calcula como:

$$\eta_e = \frac{\sum \dot{m}_{produccion} * h_{produccion}}{\sum \dot{m}_{suministro} * h_{suministro}} \quad (61)$$

En cuanto a la eficiencia exergética se tiene presente el valor de las irreversibilidades calculadas en las expresiones (58), (59), (60) y se evalúa con la siguiente fórmula:

$$\eta_{Ex} = \left( \frac{\sum Ex_{salida}}{\sum Ex_{entrada}} \right) \quad (62)$$

#### 4.4.5. ANÁLISIS EXERGOAMBIENTAL

Para cuantificar los valores de impactos generados en el sistema planteado e identificar las oportunidades de optimización del sistema de generación se deben considerar los impactos ambientales del ciclo de vida asociados a cada componente y su relación con el consumo de los recursos.



Se consideran el impacto indirecto asociado con las rutas de combustible, el impacto generado durante la transformación de los combustibles para los diferentes equipos y el impacto ambiental asociado con el ciclo de vida de cada subsistema. Teniendo en cuenta la unidad funcional tomada como *kWh* se asigna el impacto ambiental a las corrientes de exergía calculadas para cada subsistema del ciclo termodinámico, a fin de permitir la evaluación ambiental mediante las siguientes ecuaciones:

$$\dot{B}_{Gasif,motor} = \frac{I_{gafis,motor}[kgCO_2]}{Energia [kWh]} * \frac{1 [h]}{3600[seg]} \quad (63)$$

Posteriormente, se calcula el costo específico ambiental del combustible a partir de la eficiencia energética del equipo calculada en la formula 61 y el Heat reat.

$$HR_{motor} = \frac{3600}{\eta_e} \quad (64)$$

$$b_{comb} = \frac{I_{comb}}{UF_{Sistem} * HR_{motor} * 3600} \quad (65)$$

Se realiza el balance ambiental con el fin de conocer los costos ambientales de la transformación de energía en el sistema motor-generador,  $b_{Pot}$ .

$$(\dot{m}_{Biomasa} * Ex_{comb} * b_{comb}) + \dot{B}_{Gasif,motor} = UF_{Sistem} * b_{Pot} + (\dot{m}_{humos} * Ex_{humos} * b_{humos}) \quad (66)$$

Para la evaluación exergo-ambiental se tienen en cuenta el criterio de asignación, con respecto al costo ambiental de los humos, ya que la generación de potencia es el producto útil del sistema, por este motivo se cargan todos los impactos generados a esta corriente, despreciando los humos de combustión que a pesar de tener alto contenido exergético no es el producto comercializado, es decir:

$$b_{humos} = 0 \quad (67)$$

A partir de esto se determinan la tasa de impacto para cada uno de los flujos analizados:

$$Tasa_{impacto} = Tasa_{humos} + Tasa_{potencia} + Tasa_{fuel} \quad (68)$$

$$Tasa_{humos} = ((\dot{m}_{humos} * Ex_{humos}) * b_{humos}) \quad (69)$$

$$Tasa_{potencia} = UF_{Sistem} * b_{Pot} \quad (70)$$

$$Tasa_{fuel} = (\dot{m}_{Biomasa} * Ex_{comb} * b_{comb}) \quad (71)$$

## 5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de la configuración simulada en Aspen Plus, de modo similar se realiza un análisis de los indicadores con la finalidad de determinar sus impactos y estudiar su desempeño. Los resultados se exponen en el mismo orden que el desarrollo.

### 5.1. SIMULACIÓN ASPEN

#### 5.1.1. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN EN ASPEN PLUS

Realizada satisfactoriamente la simulación se obtuvo el Syngas a ciertas condiciones y una composición característica relacionada a continuación.

Tabla 16. Composición Syngas obtenido de Aspen Plus

<b>Composición Syngas (Fracción Molar)</b>						
O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>
0,033993	0,443054	0,053561	0,350527	0,059711	0,006702	0,052452

Fuente: Elaborado por los autores

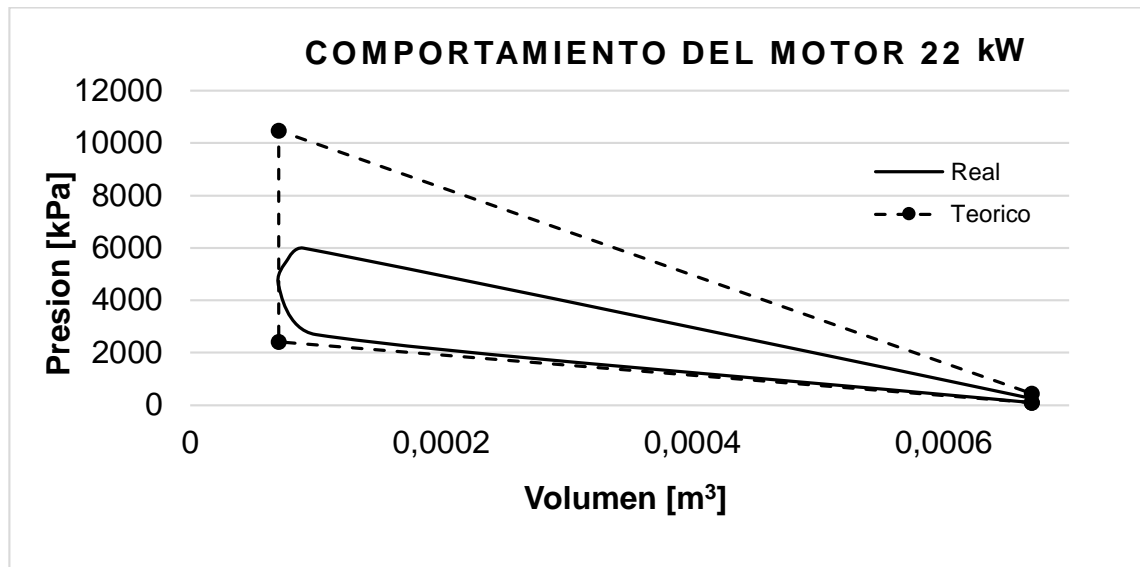
Tabla 17. Condiciones de obtención del gas de síntesis

<b>Características del Syngas</b>		
Temperatura	873	K
Presión	101,325	kPa
Densidad	0,282044	kg/m <sup>3</sup>
PCI	7579	kJ/kg
C <sub>p</sub>	0.3143	kJ/kg*K
C <sub>v</sub>	0.2297	kJ/kg*K
Masa Molar	19,4	kg/kmol
Flujo másico	0,0130496	kg/seg
Flujo volumétrico	54,265898	m <sup>3</sup> /seg

Fuente: Elaborado por los autores

A partir del poder calorífico del Syngas se puede determinar que el comportamiento del motor ideal es diferente en comparación con el funcionamiento real en términos de presión como se puede observar en la gráfica 2.

Gráfica 2. Comportamiento del Motor en Términos de presión.



Fuente: Elaborado por los autores

Las diferencias entre el comportamiento del motor en su estado teórico y real se deben a que existen factores que distorsionan su funcionamiento, de manera que su eficiencia baja. En la gráfica 2 se puede observar este efecto el cual se debe a que la combustión no es a volumen constante, es decir, esta se genera cuando el pistón se encuentra cerca al PMS por lo que se dan pérdidas de trabajo útil. También se debe tener en cuenta que a medida que ocurre la compresión la mezcla de gases va aumentando su temperatura, por lo tanto, se alcanza más rápido la presión de combustión.

### 5.1.2. PARAMETRIZACIÓN DE LA DEMANDA

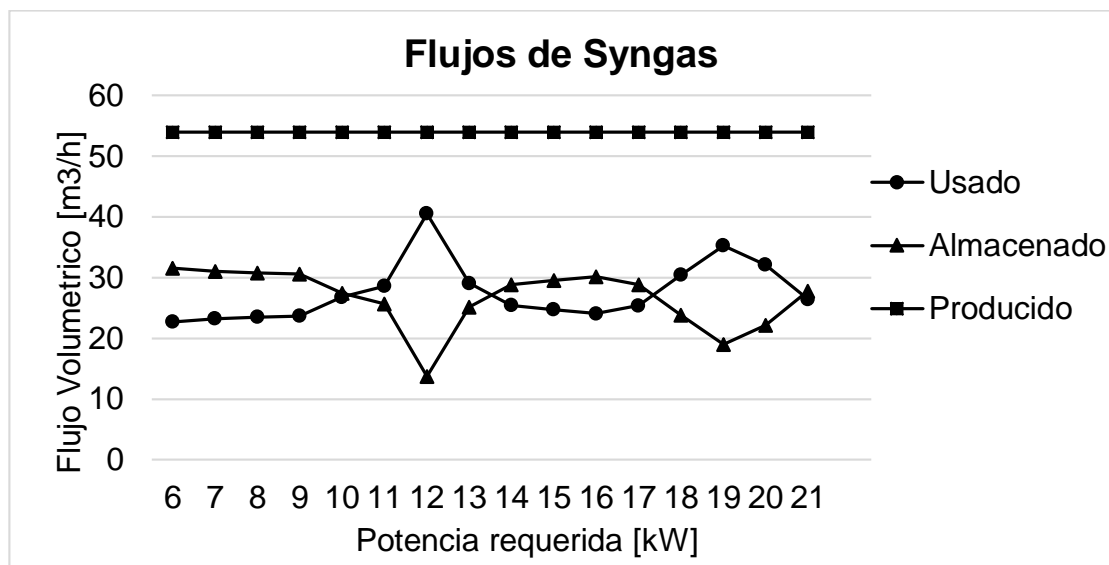
De la simulación del funcionamiento del motor y el sistema de almacenamiento a las diferentes cargas de energía durante el día por medio de la herramienta Aspen Plus se obtuvieron los flujos de Syngas necesarios.

Tabla 18. Flujos para Abastecimiento de la demanda de la localidad

Hora	Flujo de Syngas		Potencia Consumida [kW]		
	Kg/h	m <sup>3</sup> /h	Localidad	Compresor Almacenamiento	Total
6	19,684	22,737	6,75	5,206	11,956
7	20,135	23,258	7,11	5,120	12,230
8	20,348	23,504	7,28	5,079	12,359
9	20,485	23,663	7,39	5,053	12,443
10	23,221	26,823	9,573	4,531	14,104
11	24,749	28,588	10,793	4,239	15,032
12	35,093	40,536	19,048	2,267	21,315
13	25,169	29,073	11,128	4,159	15,287
14	22,039	25,458	8,63	4,756	13,386
15	21,425	24,749	8,14	4,873	13,013
16	20,861	24,097	7,69	4,981	12,671
17	21,989	25,400	8,59	4,766	13,356
18	26,343	30,429	12,065	3,935	16,000
19	30,553	35,292	15,425	3,133	18,558
20	27,815	32,130	13,24	3,655	16,895
21	22,889	26,439	9,308	4,594	13,902
Total	382,798	442,177	-	-	-

Fuente: Elaborado por los autores

Gráfica 3. Flujos de Syngas en los diferentes equipos a diferentes cargas



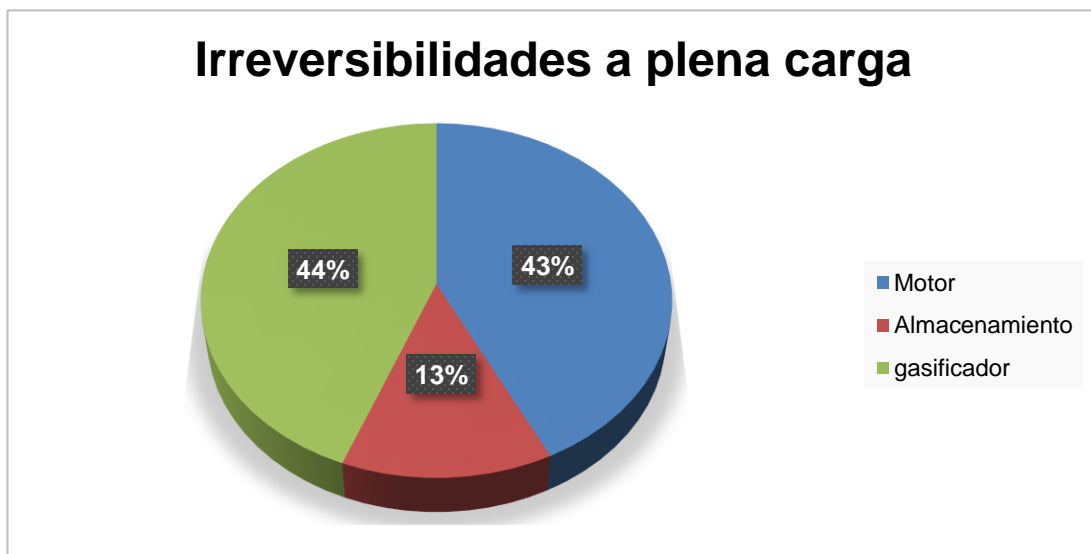
Fuente: Elaborado por los autores

Para suplir la demanda eléctrica de la localidad el motor necesita en promedio la mitad del flujo de Syngas generado por el gasificador, 442,117 m<sup>3</sup>/h, como se puede observar en la gráfica 3, por lo tanto, al finalizar el día la cantidad almacenada en el tanque es similar o cercana a la consumida por el motor a sus diferentes cargas.

## 5.2. ANÁLISIS DE IRREVERSIBILIDADES

Se determinaron las Irreversibilidades de cada equipo por medio del análisis exergético, con esto se logró estimar un porcentaje de cada uno sobre la exergía destruida en el cual el gasificador presenta el 44% dadas las reacciones químicas que ocurren en su interior. Por otra parte, el motor representa el 43%, esto se debe al alto contenido exergético de los humos de combustión que no están siendo aprovechados en el momento de la transformación de energía mecánica a energía eléctrica, lo que genera que baje la eficiencia del proceso.

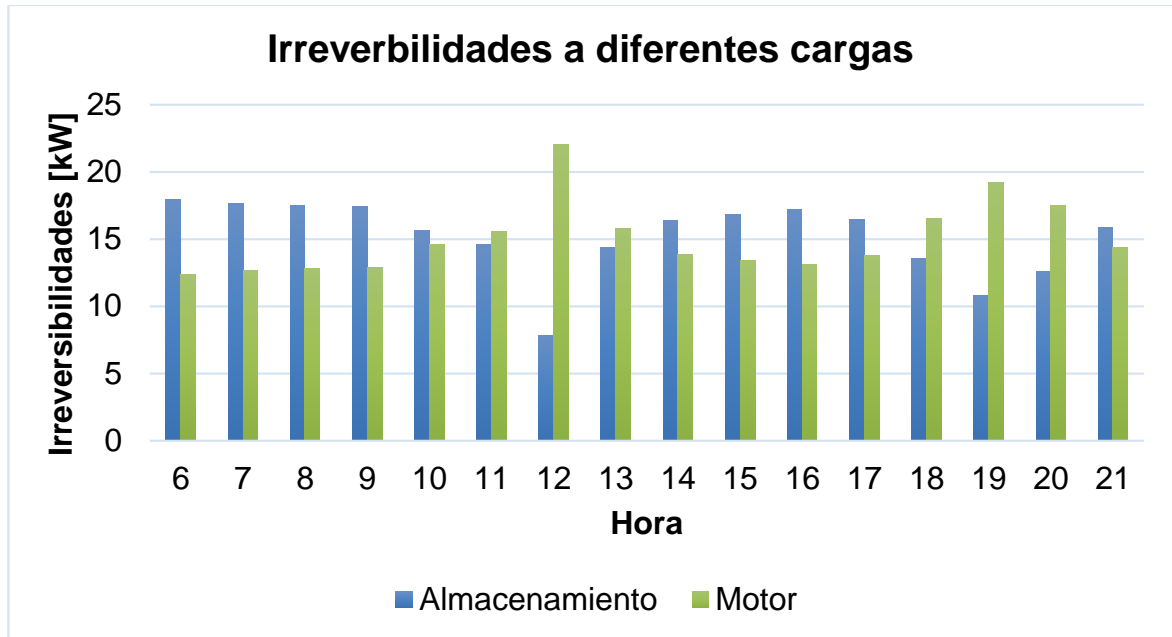
Gráfica 4. Irreversibilidades totales, Sistema plena carga.



Fuente: Elaborado por los autores

El sistema presenta mayores irreversibilidades en los equipos donde ocurren diferentes transformaciones. En el gasificador se presentan el valor más alto, donde la biomasa se convierte en syngas mediante reacciones químicas. A su vez el motor presenta una cantidad similar de irreversibilidades debido el proceso de combustión que se da en este.

Gráfica 5. Irreversibilidades del motor y del sistema de almacenamiento, diferentes cargas.



Fuente: Elaboración propia.

Al suplir la demanda de energía eléctrica de la localidad durante el día, el flujo de gas está variando por lo que se presentan diferentes valores de irreversibilidades para el motor-generator y el sistema de almacenamiento, los cuales se presentan en la gráfica 5. Se puede observar que el sistema de almacenamiento presenta mayor cantidad de irreversibilidades cuando el compresor presenta un mayor trabajo, en comparación con el motor.

El motor siendo una maquina térmica, en el cual ocurre un proceso de transformación con una gran cantidad de exergía destruida presenta su mayor valor transcurridas las doce horas del día donde se da el pico de demanda eléctrica generando más de 20 kW de irreversibilidades momento en el cual se presenta la mayor demanda por ende el flujo de gas almacenado es menor por lo tanto la perdida exergética en el almacenamiento es la más baja durante el día.

### 5.3. EFICIENCIAS EXERGÉTICA Y ENERGÉTICA

Tabla 19. Eficiencia exergética y energética de los equipos del sistema.

Equipo	Eficiencia	
	Exergética	Energética
Motor	0.3751	0.2885
Sistema	0.2205	0.2458

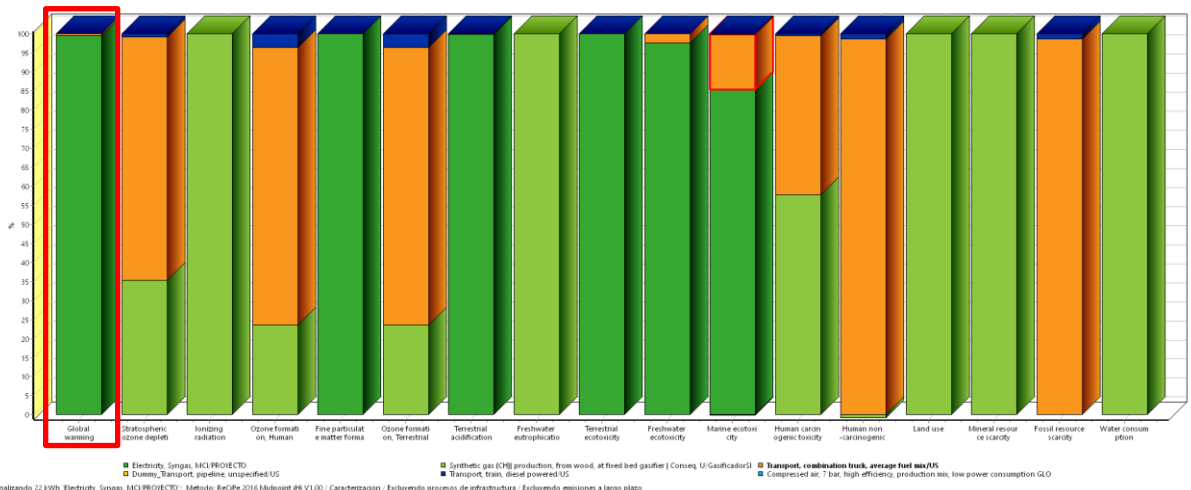
Fuente: Elaborado por los autores

El sistema de generación presenta en el motor una eficiencia energética de 28.8 % un valor relativamente bajo al ser una máquina térmica accionada con gas de síntesis. Por otra parte, la eficiencia global de la configuración, es decir el gasificador acoplado al motor- generador tienen una eficiencia de 24.5 %.

### 5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS EN SIMAPRO

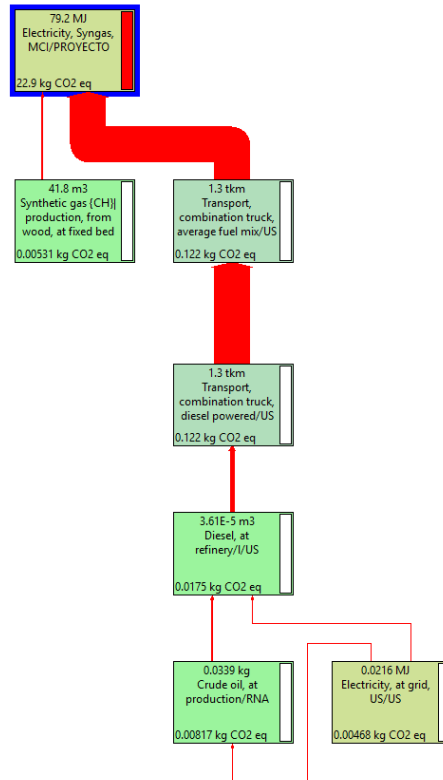
El análisis contiene el estudio de impactos ambientales obtenidos por procesos de generación de energía empleando biomasa como combustible, haciendo sensibilidad para diferentes potencias de generación. Se eligió la categoría de calentamiento global para el análisis de los impactos debido al tipo sustancias que se tienen en el proceso y a que esta categoría es la que presenta un mayor impacto.

Gráfica 6. Impactos ambientales Sistema de generación



Fuente: SimaPro

Figura 30. Árbol de impactos ambientales



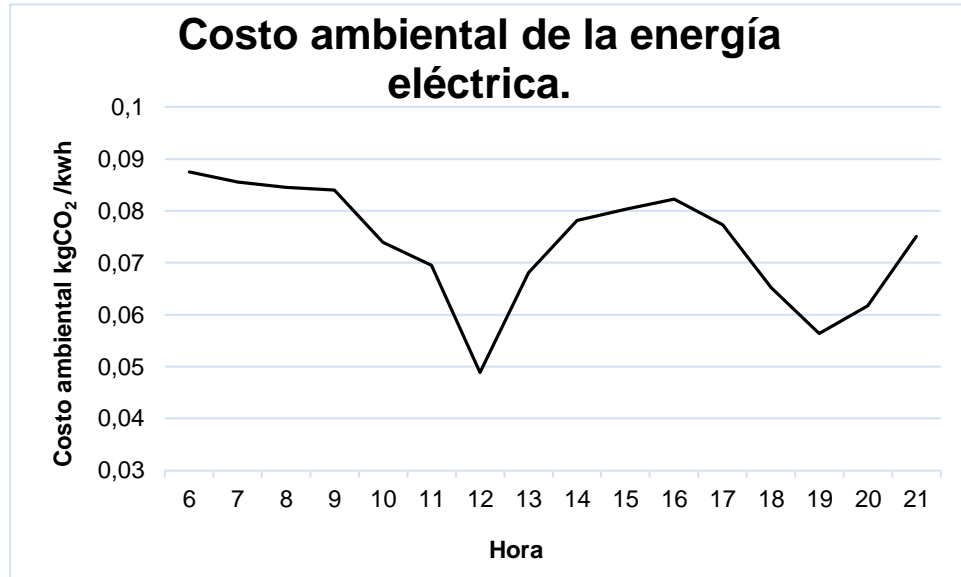
Fuente: SimaPro

La figura 30 muestra como los impactos ambientales del sistema de generación se concentran en la gasificación dado las reacciones que ocurren por la conversión de la biomasa en gas de síntesis.

En la gráfica 7 se observa el criterio de asignación para los costos ambientales en los cuales se asignan todos los costos a la generación de potencia debido a que la generación del flujo de humos no los tenemos en cuenta.



Gráfica 7. Costo ambiental de energía eléctrica.



Fuente: Elaborado por los autores.

En la gráfica 7 se observa que a la hora correspondiente al mínimo consumo de energía, incrementa la tasa de costo ambiental ya que esta hora corresponde a su vez a la carga mínima, considerando que operar a cargas parciales conduce a ineficiencias en el sistema. Lo contrario sucede a las horas de máxima demanda del equipo donde su costo es mínimo.

## 6. CONCLUSIONES

Se logró estudiar el comportamiento del sistema de generación por medio de la herramienta Aspen Plus, del cual se obtuvieron las condiciones de trabajo del motor-generador para suplir la demanda diaria de energía eléctrica, arrojando como resultado, el flujo máximo de syngas necesario para abastecer simultáneamente cada una de las cargas determinadas para la localidad y la potencia requerida por el compresor de almacenamiento. En el caso del pico de demanda con una potencia de 19.048 kW para la población y 2.267 kW para el compresor se requieren 40.53 m<sup>3</sup>/h, el compresor direcciona los 13 m<sup>3</sup>/h de syngas que no son usados por el motor hacia el tanque de almacenamiento. Por otro lado se tiene que el requerimiento mínimo se da a las seis de la mañana con una potencia de 6.75 kW para la población y 5.206 kW para el compresor de tal forma que se necesita 22.737 m<sup>3</sup>/h de syngas, almacenando 31.529 m<sup>3</sup>/h es decir que por cada hora de generación eléctrica producida se almacena en promedio un 49 % de syngas. De esta manera se concluye que el gasificador entrara en operación día de por medio ya que se logra almacenar la cantidad suficiente para suplir el requerimiento energético de la localidad durante un día.

Teniendo las características del gas de síntesis se determinó el comportamiento real del motor, donde se observó una disminución en la presión de combustión de 41.98% con respecto al ciclo ideal, debido a la activación del fluido antes de llegar al PMS (punto muerto superior) en el proceso de compresión lo que genera bajas eficiencias, 28% energética y 37% exergética. El consumo de aire está dada por la relación aire-combustible de 1.525641. Para el flujo máximo de syngas se requiere 61.8342 m<sup>3</sup>/h de aire, por lo tanto al combinarse estos fluidos se convierte en una mezcla pobre.

La simulación del gasificador se realizó en el software Aspen Plus de manera fraccionada, ya que es un simulador de procesos químicos no permite realizar el proceso de gasificación en un sólo equipo. Las condiciones de diseño del gasificador presentadas en la ficha técnica, especifican un flujo de admisión de biomasa de 25 kg/h para obtener 50 m<sup>3</sup>/h de syngas sin embargo en este estudio se redujo la cantidad de biomasa de entrada a 21 kg/h debido a las características de simulación, obteniéndose un flujo de gas de síntesis de 54 m<sup>3</sup>/h con un poder calorífico de 7579 kJ/kg.

El sistema motor- generador tiene el 43% de las irreversibilidades del sistema a plena carga. El punto donde se hace más notoria su alto contenido de irreversibilidades se da a las doce horas con un valor de 22 *kW* debido a que en este instante del día el motor presenta su mayor trabajo de generación eléctrica, no obstante este valor no es constante dado las variaciones de potencia requerida por lo que a las seis horas siendo el intervalo de tiempo de menor trabajo de generación se tienen 12.36 *kW* de exergía destruida para el motor y 17.96 *kW* en el sistema de almacenamiento. Por otra parte, el gasificador comprende las más altas irreversibilidades de 23 *kW* dado que su producción de syngas no varía en las horas del día lo que representa el 44% de irreversibilidades totales del sistema.

Operar el sistema a cargas parciales induce un incremento en el costo ambiental ya que genera altas tasas de ineficiencia de hasta un máximo de 87 *kgCO<sub>2</sub>/MWh*. mientras que a plena carga se tiene un costo ambiental asociado de 48 *kgCO<sub>2</sub>/MWh*. En conclusión, la operación del sistema a mínima carga representa un aumento del 78 % aproximadamente en este indicador ambiental.

En estudios realizados anteriormente como lo es el análisis ambiental aplicado a centrales eléctricas modificadas para quemar carbón y paja de arroz las cuales tiene un costo ambiental de 1230 *KgCO<sub>2</sub>/MWh* para la generación eléctrica, demuestran que la generación con biomasa Arundo Donax generan un menor costo ambiental de 48 *KgCO<sub>2</sub>/MWh* y por ende su viabilidad ambiental.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Franco, "Contribución De La Energía Al Desarrollo De Comunidades Aisladas No Interconectadas : Un Caso De Aplicación De La Dinámica De Sistemas Y Contribution of the Energy At Development of Islated Communities in Not Interconnected Zones : a Case of Application O," vol. 75, no. 2008, pp. 199–214, 2007.
- [2] El Congreso de la República de Colombia, "Ley 855 de 2003," *D. Of. No. 45.405, 18 diciembre 2003*, pp. 1–2, 2003.
- [3] N. A. García, R. H. T. Holguín, and D. A. O. Urrea, "ZONAS NO INTERCONECTADAS - ZNI Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2017 Superintendencia Delegada para Energía y Gas Combustible," no. 1, 2017.
- [4] IPSE, "Centro Nacional de Monitoreo," *Ipsew*. 2018.
- [5] J. Hernán, F. Acosta, and D. T. Orozco, "las zonas no interconectadas ( ZNI ) en C olombia ? : un análisis," vol. 22, no. 38, pp. 219–245, 2009.
- [6] N. Gómez, "Energización de las ZNI de Colombia a partir de las energías solar y eólica," *Univ. Javeriana*, p. 99, 2011.
- [7] S. V. Gomez Guillen, "Los costos del conflicto armado en Colombia: Incidencia en el desempeño económico reciente (1998-2012)," p. 59, 2015.
- [8] Twenergy, "La Biomasa En Colombia: El Gran Reto Para Generar Energía Sustentable," *Twenergy*. 2014.
- [9] Estructuras Bioclimáticas Avanzadas (EBA), "La biomasa: producir energía con un sistema ecológico," *Producir energía con la biomasa: utilizar materiales de naturaleza orgánica*. .
- [10] G. Liliana and L. Villanueva, "Arundo donax L . como gramínea perenne para la producción de biomasa en ambiente Mediterráneo Arundo donax L . como gramínea perenne para la producción de biomasa en ambiente Mediterráneo Memoria presentada por Gladys Liliana Lino Villanueva para optar al."
- [11] C. Augusto and A. Zapata, "Gasificación De Biomasa Para Producción De Combustibles De Bajo Poder Calorífico Y Su Utilización En Generación De Potencia Y Calor," *Sci. Tech.*, vol. 25, no. Agosto, pp. 155–159, 2004.
- [12] FAO, "Manual de Usuario. Gasificación," p. 37, 2014.
- [13] A. Cabello Domínguez, "Planta piloto de gasificación de biomasa," p. 182, 2008.
- [14] B. Grahn and H. Lovtrup-Rein, *The Effect of Cordycepin on Nuclear RNA Synthesis in Nerve and Glial Cells*, vol. 82, no. 1. 1971.
- [15] P. A. Castellanos, "IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE UN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO - PDF." p. 22.
- [16] N. Fonseca, "Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa (GG) en motores de combustión interna alternativos," *Ciemat*, 2003.
- [17] "La biomasa en la producción de productos base \_ Cuaderno del Ingeniero."
- [18] D. Giacosa, *Motores Endotermicos*. .

- [19] J. B. Lheywood, *Internal combustion engine gasket*, vol. 2010, no. 1. 2010.
- [20] F. Payri and J. M. Desantes, *Motores de combustión interna alternativos*. 2015.
- [21] A. D. Jose, L. Muñoz, T. Francisco, and V. T. Fuxá, “Reducción de pérdidas mecánicas en el accionamiento de elementos auxiliares de un motor de combustión interna alternativo,” 2012.
- [22] E. F. Obert, *Motores De Combustion Interna: Analisis y aplicaciones*. .
- [23] E. Consultant, “Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society Wall, G. Energy Conversion and Management, 2002, 43, (9–12), 1235–1248,” *Fuel Energy Abstr.*, vol. 44, no. 2, p. 117, 2003.
- [24] I. Rojas-Gordillo, “Análisis de exergía en dos puntos críticos en una industria productora de harina de pescado,” *Facultad de Ingeniería*, vol. Magister e. 2005.
- [25] ICONTEC, “Colombiana Ntc-Iso 14004,” *Inst. Colomb. Normas y Certificación*, no. 571, pp. 1–62, 2007.
- [26] E. M. Mark Goedkoop, Michiel Oele, Marisa Vieira, Jorrit Leijting, Tommie Ponsioen, “SimaPro Tutorial Colophon,” no. May, p. 89, 2014.
- [27] ecoRaee, “Informe de Resultados del ACV del proceso V2.0,” p. 115, 2013.
- [28] C. F. Belda and E. U. Grande, “Los Modelos De Simulación: Una Herramienta Multidisciplinar De Investigación,” *Encuentros Multidisciplinares*, vol. 11, no. 32, pp. 37–48, 2009.
- [29] M. R. Eden, “Introduction to Aspen Plus,” *Teach Yours. Basics Aspen Plus™*, pp. 1–19, 2011.
- [30] J. F. O. PORTILLA, “MEMORIA DE CÁLCULOS DEL DISEÑO TÉCNICO DE SOLUCIONES DE ENERGÍA SOSTENIBLES CONSISTENTES EN SISTEMAS DE GENERACION POR BIOMASA GASIFICADA PARA GENERACION DE ELECTRICIDAD Y SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS PARA LOCALIDADES Y VIVIENDAS RURALES DISPERSAS EN LA.” .
- [31] C. Nichol and T. L. Westover, “Arundo Donax Test Results,” no. January, 2012.
- [32] J. F. FERNANDEZ, “Poder calorífico,” pp. 1–22, 2018.
- [33] L. 青島科信新能源技术有限公司 Qingdao Kexin New Energy Technology Co ., Ltd 青島科信新能源技术有限公司 Qingdao Kexin New Energy Technology Co ., “20KW biomass gasification power plant proposal.”
- [34] Q. Series, “Quietsource ® Series.”

## 8. ANEXOS

### A.1. Características mezcla de aire-combustible en la entrada del motor

<b>Mezcla de aire-combustible</b>		
Relación A/C	1,525641	-
Cp	0,7313	kJ/kg*K
Cv	0,5244	kJ/kg*K
k	1,402	-
Masa Molar	25,11	kg/kmol
Temperatura	285,61525	K
Presión	101,325	kPa
Densidad	1,0321389	kg/m <sup>3</sup>

### A.2. Parámetros indicados del funcionamiento del motor

<b>Estado</b>	<b>Unidad</b>	<b>Compresión</b>	<b>Combustión</b>	<b>Expansión</b>
Temperatura	K	433,7	1882	1234
Presión	kPa	2414	10472	439,6
Volumen	m <sup>3</sup>	0,00007059	0,00007059	0,0006706

<b>Parámetros indicados</b>		
$W_{\text{compresión}}$	-11,41	W
$Q_{\text{combustión}}$	98,9	W
$W_{\text{expansión}}$	48,23	W
Potencia	36,82	W
Trabajo	33,13	W
Rendimiento	0,335	-
PMI	920,4	W

A.3. Parámetros efectivos motor del funcionamiento del motor

Estado	Unidad	Compresión	Combustión	Expansión
Temperatura	K	706,2	1801	727,8
Presión	kPa	2382	6075	258,4
Volumen	m <sup>3</sup>	0,00007059	0,00007059	0,0006706

Parámetros efectivos		
$W_{\text{compresión}}$	-11,41	W
$Q_{\text{combustión}}$	103,5	W
$W_{\text{expansión}}$	29,1	W
Par	122,9	
Potencia	23,16	W
Trabajo	17,69	W
Rendimiento	0,2341	-
PME	643,1	W
Relación de presión	2,55	kPa

A.4. Flujos de syngas para abastecer la potencia requerida

Hora	Flujo de Syngas		Potencia necesaria [kW]		
	Kg/h	m <sup>3</sup> /h	Localidad	Almacenamiento	Total
6	19,684	22,737	6,75	5,206	11,956
7	20,135	23,258	7,11	5,120	12,230
8	20,348	23,504	7,28	5,079	12,359
9	20,485	23,663	7,39	5,053	12,443
10	23,221	26,823	9,573	4,531	14,104
11	24,749	28,588	10,793	4,239	15,032
12	35,093	40,536	19,048	2,267	21,315
13	25,169	29,073	11,128	4,159	15,287
14	22,039	25,458	8,63	4,756	13,386
15	21,425	24,749	8,14	4,873	13,013
16	20,861	24,097	7,69	4,981	12,671
17	21,989	25,400	8,59	4,766	13,356
18	26,343	30,429	12,065	3,935	16,000
19	30,553	35,292	15,425	3,133	18,558
20	27,815	32,130	13,24	3,655	16,895
21	22,889	26,439	9,308	4,594	13,902
Total	382,798	442,177	-	-	-

A.5. Flujo de syngas que se almacena y potencia necesaria para el compresor

Hora	Potencia [kW]	Flujo de Syngas	
		Kg/h	m <sup>3</sup> /h
6	5,206	27,295	31,529
7	5,120	26,844	31,008
8	5,079	26,631	30,762
9	5,053	26,493	30,603
10	4,531	23,758	27,443
11	4,239	22,229	25,677
12	2,267	11,886	13,730
13	4,159	21,810	25,193
14	4,756	24,939	28,808
15	4,873	25,553	29,517
16	4,981	26,117	30,169
17	4,766	24,990	28,866
18	3,935	20,636	23,836
19	3,133	16,426	18,973
20	3,655	19,163	22,136
21	4,594	24,090	27,827
Total	-	368,860	426,077

A.6. Irreversibilidades de cada equipo a las diferentes cargas

Horas	Irreversibilidades [kW]			
	Almacenamiento	Gasificador	Motor	Total
6	17,96		12,36	53,8
7	17,66		12,64	53,78
8	17,52		12,78	53,78
9	17,43		12,86	53,77
10	15,63		14,58	53,69
11	14,62		15,54	53,65
12	7,819		22,04	53,34
13	14,35		15,81	53,63
14	16,41	23,48	13,84	53,73
15	16,81		13,45	53,75
16	17,18		13,1	53,76
17	16,44		13,81	53,73
18	13,57		16,54	53,6
19	10,81		19,19	53,47
20	12,61		17,47	53,56
21	15,85		14,37	53,7



A.7. Impactos ambientales del sistema, datos de SimaPro

Hora	Energía requerida [kWh]	Impacto Sistema	Impacto Syngas
6	11,96	0,00079	12,5
7	12,23	0,000808	12,8
8	12,36	0,000817	12,9
9	12,44	0,000822	13
10	14,1	0,000932	14,7
11	15,03	0,000994	15,7
12	21,31	0,00141	22,2
13	15,29	0,00101	15,9
14	13,39	0,000885	14
15	13,01	0,00086	13,6
16	12,67	0,000838	13,2
17	13,36	0,000883	13,8
18	16	0,00106	16,7
19	18,56	0,00123	19,4
20	16,89	0,00112	17,6
21	13,9	0,000919	14,5

A.8. Impactos ambientales referidos a la potencia producida

Hora	Energía requerida [kWh]	Costo del impacto ambiental [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	Tasa de Impacto [kgCO <sub>2</sub> /seg]
6	11,96	0,08745	1,046
7	12,23	0,08558	1,047
8	12,36	0,08446	1,044
9	12,44	0,08397	1,045
10	14,1	0,0739	1,042
11	15,03	0,06948	1,044
12	21,31	0,04886	1,042
13	15,29	0,06803	1,04
14	13,39	0,07813	1,046
15	13,01	0,08031	1,045
16	12,67	0,08222	1,042
17	13,36	0,07736	1,033
18	16	0,06523	1,044
19	18,56	0,05633	1,045
20	16,89	0,06166	1,042
21	13,9	0,07502	1,043

A.9. Impactos ambientales referidos al combustible, Syngas.

Hora	Energía requerida [kWh]	Costo del impacto ambiental [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	Tasa de Impacto [kgCO <sub>2</sub> /seg]
6	11,96	1,47E-12	1,47E-10
7	12,23	1,47E-12	1,47E-10
8	12,36	1,47E-12	1,47E-10
9	12,44	1,47E-12	1,47E-10
10	14,1	1,47E-12	1,47E-10
11	15,03	1,47E-12	1,47E-10
12	21,31	1,47E-12	1,47E-10
13	15,29	1,47E-12	1,47E-10
14	13,39	1,47E-12	1,47E-10
15	13,01	1,47E-12	1,47E-10
16	12,67	1,47E-12	1,47E-10
17	13,36	1,47E-12	1,47E-10
18	16	1,48E-12	1,47E-10
19	18,56	1,48E-12	1,47E-10
20	16,89	1,48E-12	1,47E-10
21	13,9	1,47E-12	1,47E-10

A.10. Exergías estandar de cada elemento.

Elemento	Exergía química estándar[kJ/kmol]
O <sub>2</sub>	3970
CO	275430
H <sub>2</sub>	238490
CO <sub>2</sub>	20140
H <sub>2</sub> S	804770
N <sub>2</sub>	720
CH <sub>4</sub>	836510
SiO <sub>2</sub>	3280
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	204270
TiO <sub>2</sub>	23090
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20370
CaO	119620
MgO	59170
Na <sub>2</sub> O	313260
K <sub>2</sub> O	425540

SO<sub>3</sub>

225070

---