

**MODELO DE SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDO
SOLAR FOTOVOLTAICO ACOPLADO A UN MOTOR DE COMBUSTION
INTERNA DIESEL BI-FUEL INTEGRANDO UN GASIFICADOR DE BIOMASA
PARA ZONAS NO INTERCONECTADAS**

ENMANUEL ALBERTO DUARTE CÁCERES

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOMECÁNICAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**

2019

**MODELO DE SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN HÍBRIDO
SOLAR FOTOVOLTAICO ACOPLADO A UN MOTOR DE COMBUSTION
INTERNA DIESEL BI-FUEL INTEGRANDO UN GASIFICADOR DE BIOMASA
PARA ZONAS NO INTERCONECTADAS**

ENMANUEL ALBERTO DUARTE CÁCERES

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
ingeniero en energía**

Director

PhD. Leonardo Esteban Pacheco Sandoval

Codirector

M.Sc. Carlos Alirio Díaz González

PhD. Luis Sebastián Mendoza Castellanos

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOMECÁNICAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**

2019

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga 5 de junio de 2019

DEDICATORIA

A Dios por darme la inspiración y la fuerza en momentos difíciles

A mi madre Amparo y mi padre Carlos por la crianza, el apoyo y los consejos de sabiduría que fueron determinantes para llegar a este meta.

A mis hermanas Andrea y Saray, por su amor y consideración durante esta etapa de mi vida.

A Boni que me ha enseñado lealtad y me ha brindado su afecto y compañía.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos los profesores presentes durante mi formación los cuáles me ayudaron a desarrollar las capacidades que se necesitaron para la elaboración del proyecto. A mis amigos en especial Omar, Cristian, Hernán y Fredy por enseñarme el valor de la honra en una amistad.

TABLA DE CONTENIDO

| | pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| 1. MARCO REFERENCIAL | 12 |
| 1.1 GENERACIÓN ELÉCTRICA EN ZONAS NO INTERCONECTADAS..... | 12 |
| 1.2 ANÁLISIS DEL GASIFICADOR DE BIOMASA | 14 |
| 1.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO | 17 |
| 1.4 ANTECEDENTES..... | 19 |
| 1.5 MARCO LEGAL | 20 |
| 2. OBJETIVOS..... | 22 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL..... | 22 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 22 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 23 |
| 3.1 FASE UNO: LEVANTAMIENTO DE DATOS | 23 |
| 3.2 FASE DOS: CÁLCULOS TERMODINÁMICOS Y DE EQUILIBRIO QUÍMICO | 23 |
| 3.3 FASE TRES: SIMULACIÓN DE ESCENARIOS..... | 23 |
| 3.4 FASE CUATRO: DETERMINACIÓN DE INDICADORES | 23 |
| 4. DESARROLLO | 24 |
| 4.1 GASIFICADOR | 24 |
| 4.1.1 Modelo de gasificación | 24 |
| 4.2 GRUPO MOTOR GENERADOR | 34 |
| 4.2.1 Modelo del grupo motor generador | 35 |
| 4.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO | 44 |
| 4.4 FACTORES DE EMISIÓN (INDICADOR AMBIENTAL) | 46 |
| 4.5 COSTO NIVELADO DE ENERGÍA (INDICADOR ENERGÉTICO) | 48 |
| 4.5.1 Costos fijos..... | 48 |

| | |
|--|----|
| 4.5.2 Costos operación y mantenimiento | 50 |
| 4.5.3 Costos de combustible | 51 |
| 5. RESULTADOS | 54 |
| 5.1 VALIDACIÓN DEL MODELO | 54 |
| 5.2 COMPARACIÓN DE LOS ESCENARIOS | 57 |
| 5.3 ESCENARIO STAND ALONE, DIESEL | 60 |
| 5.4 ESCENARIO STAND ALONE, BI-FUEL | 62 |
| 5.3 BI-FUEL, SISTEMA FOTOVOLTAICO CON 20% CARGA (6.21 kW) | 63 |
| 5.4 BI-FUEL, SISTEMA FOTOVOLTAICO CON 40% CARGA (12.5 kW) | 66 |
| 5.5 BI-FUEL, SISTEMA FOTOVOLTAICO CON 60% CARGA (18.54 kW) | 68 |
| 6. CONCLUSIONES | 71 |
| 7. RECOMENDACIONES | 72 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA..... | 73 |
| ANEXOS | 78 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Número de unidades por rangos de potencia | 13 |
| Tabla 2. Tecnologías de las células solares..... | 18 |
| Tabla 3. Análisis último y próximo de caña flecha | 28 |
| Tabla 4. Calor específico (constantes) | 30 |
| Tabla 5. Entalpías de formación | 31 |
| Tabla 6. Energía de formación de Gibbs | 31 |
| Tabla 7. Características motor k4100zd | 35 |
| Tabla 8. Ciclo de potencia Diésel | 38 |
| Tabla 9. Nomenclatura variables ciclo de potencia..... | 39 |
| Tabla 10. Especificaciones panel solar | 44 |
| Tabla 11. Potencia pico real del panel a condiciones ambiente de Bucaramanga | 46 |
| Tabla 12. Costos fijos de grupos electrógenos en zonas no interconectadas | 49 |
| Tabla 13. Costos OyM para zonas no interconectadas | 50 |
| Tabla 14. Variación del precio del galón de combustible diésel | 51 |
| Tabla 15. Costo de la biomasa | 52 |
| Tabla 16. Costo gasificador | 52 |
| Tabla 17. Costo de la biomasa asociada al gasificador..... | 52 |
| Tabla 18. Comparación de la composición del gas de síntesis | 55 |
| Tabla 19. Escenarios y consideraciones de cada caso | 57 |
| Tabla 20. Disminución de emisiones para cada escenario | 58 |
| Tabla 21. Costo nivelado de energía para los diferentes escenarios | 59 |
| Tabla 22. Consumo específico de combustible..... | 60 |
| Tabla 23. Costo nivelado de energía sistema stand alone diésel | 60 |
| Tabla 24. Costo nivelado de energía para sistema stand alone bi-fuel | 62 |
| Tabla 25. Costo nivelado de energía generador bi-fuel..... | 64 |
| Tabla 26. Costo nivelado de energía Sistema fotovoltaico al 20% carga | 64 |
| Tabla 27. Costo nivelado de energía del sistema híbrido SFV 20% | 64 |
| Tabla 28. Costo nivelado de energía generador bi-fuel..... | 66 |
| Tabla 29. Costo nivelado de energía para el sistema fotovoltaico al 40% carga | 66 |
| Tabla 30. Costo nivelado de energía del sistema híbrido para SFV 40% carga..... | 67 |
| Tabla 31. Costo nivelado de energía generador bi-fuel..... | 68 |
| Tabla 32. Costo nivelado de energía para el sistema fotovoltaico al 60% carga ... | 69 |
| Tabla 33. Costo nivelado de energía del sistema híbrido para SFV 60% carga..... | 69 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Distribución de zonas no interconectadas | 12 |
| Figura 2. Sistema a filo de agua | 13 |
| Figura 3. Esquema reactor de lecho fijo downdraft | 14 |
| Figura 4. Esquema reactor de lecho fluidizado burbujeante | 15 |
| Figura 5. Clasificación y componentes de una ISFV | 17 |
| Figura 6. Algoritmo gasificación | 33 |
| Figura 7. Carga zona no interconectada | 34 |
| Figura 8. Generador GFS30 | 34 |
| Figura 9. Algoritmo modelo motor generador | 43 |
| Figura 10. Algoritmo para el cálculo de potencia real del panel | 45 |
| Figura 11. Diagrama de flujo general de los sistemas modelados | 47 |
| Figura 12. Costo fijo de sistemas fotovoltaicos rooftop sin baterías | 49 |
| Figura 13. Composición del gas de síntesis | 54 |
| Figura 14. Tasa de remplazo de combustible diésel | 55 |
| Figura 15. Poder Calorífico de la mezcla | 56 |
| Figura 16. Eficiencia térmica del motor | 57 |
| Figura 17. Emisiones | 59 |
| Figura 18. Distribución de costos sistema Stand alone diésel vida útil | 61 |
| Figura 19. Emisiones de CO2 sistema stand alone diésel | 61 |
| Figura 20. Distribución de costos sistema stand alone bi-fuel vida útil | 63 |
| Figura 21. Emisiones de CO2 sistema stand alone diésel y bi-fuel | 63 |
| Figura 22. Distribución de costos sistema hibrido SFV 20% carga | 65 |
| Figura 23. Emisiones de CO2 para sistema hibrido SFV 20% carga | 65 |
| Figura 24. Distribución de costos sistema hibrido SFV 40% carga | 67 |
| Figura 25. Emisiones de CO2 para sistema hibrido SFV 40% carga | 68 |
| Figura 26. Distribución de costos sistema hibrido SFV 60% carga | 69 |
| Figura 27. Emisiones de CO2 para sistema hibrido SFV 60% carga | 70 |

RESUMEN

Este proyecto realiza una evaluación energético-ambiental para sistemas híbridos integrando paneles solares, generador diésel y gasificador de biomasa sin baterías, mediante un modelo de simulación, el modelo está en función de la carga y condiciones ambiente (temperatura, irradiación, humedad y presión).

Se presentan cinco escenarios: Generador diésel, generador diésel operando en modo bi-fuel con gas de síntesis y el sistema híbrido variando la potencia pico del componente fotovoltaico (6.21, 12.5, 18.54 kW), se comparan entre sí para el mismo perfil de carga, los resultados obtenidos muestran que el sistema híbrido disminuye las emisiones entre un 62 a 66% respecto al escenario base (Sistema stand alone diésel) con un LCOE de 0.279, 0.2798 y 0.2756 USD/kWh (6.21, 12.5 y 18.54 kW de potencia pico del componente fotovoltaico respectivamente); para el segundo escenario (generador diésel modo bi-fuel) las emisiones se reducen 57% respecto al primer escenario con un LCOE de 0.269 USD/kWh.

Palabras clave: gasificación, sistema híbrido, modelo de simulación, costo nivelado de energía.

ABSTRACT

This project carries out an energetic-environmental evaluation for hybrid systems integrating solar panels, diesel generator and biomass gasifier without batteries, by means of a simulation model, the model is in function of the load and ambient conditions (temperature, irradiation, humidity and pressure).

There are five scenarios: Diesel generator, diesel generator operating in bi-fuel mode with synthesis gas and the hybrid system varying the peak power of the photovoltaic component (6.21, 12.5, 18.54 kW), are compared to each other for the same load profile, the results show that the hybrid system decreases emissions between 62 to 66% compared to the base scenario (standalone diesel system) with a LCOE of 0.279, 0.2798 and 0.2756 USD/kWh (6.21, 12.5 and 18.54 kW peak power photovoltaic component respectively); for the second scenario (diesel Generator bi-fuel mode) the emissions are reduced 57% compared to the first scenario with a LCOE of 0.269 USD/kWh.

Key words: gasification, hybrid system, simulation model, levelized energy cost.

INTRODUCCIÓN

Las ZNI (zonas no interconectadas) equivalen al 52% del territorio nacional [1], el encargado de contribuir al mejoramiento de las condiciones de vida de estas comunidades es el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE), supliendo la demanda energética normalmente con fuentes de energía no convencionales tales como PCH's (pequeñas centrales hidroeléctricas), grupos electrógenos, granjas solares y acoples entre estos.[1] Para el año 2013 el número de plantas diésel instaladas en las ZNI fueron 1320 [2], siendo la principal tecnología de generación para estas comunidades, debido al costo excesivo del combustible [2] la operación de estos grupos es en promedio de 10 horas diarias [3], limitando la calidad de vida de las personas al no tener acceso a un recurso clave para el desarrollo como lo es la electricidad.

El objetivo principal del proyecto es modelar un sistema híbrido que integre paneles fotovoltaicos, grupo electrógeno y gasificación de biomasa caña flecha. Para esto se realiza un levantamiento de datos.[3] El modelo de gasificación de biomasa se adapta de uno existente para tecnología downdraft [4] basado en equilibrio químico y termodinámico. La composición del gas de síntesis obtenido se valida con resultados experimentales publicados para la misma biomasa.[5]

Para el caso del grupo motor generador se desarrolla un modelo de simulación termodinámico [6]-[8], calculando consumos, eficiencias, poder calorífico de la mezcla, trabajo y tasa de remplazo en caso de que se trabaje en modo bi-fuel. Para modelar el comportamiento de los paneles fotovoltaicos se tomó un modelo existente [9] que está en función de las condiciones ambiente, finalmente se integran los tres modelos.

Se plantean cinco escenarios, el base corresponde a un generador diésel, el segundo a un generador que opera en modo bi-fuel con diésel y gas de síntesis, los demás corresponden a sistemas híbridos sometidos a diferentes cargas (ver sección 5), compuestos por un arreglo fotovoltaico acoplado al generador bi-fuel. Se evalúan a través de indicadores energéticos (costo nivelado de energía) y ambientales (factores de emisión). [10]-[12]

De esta forma se analiza la viabilidad para las diferentes tecnologías evaluadas teniendo en cuenta el factor energético y ambiental, lo cual podría ayudar como referencia para futuras evaluaciones en zonas no interconectadas.

1. MARCO REFERENCIAL

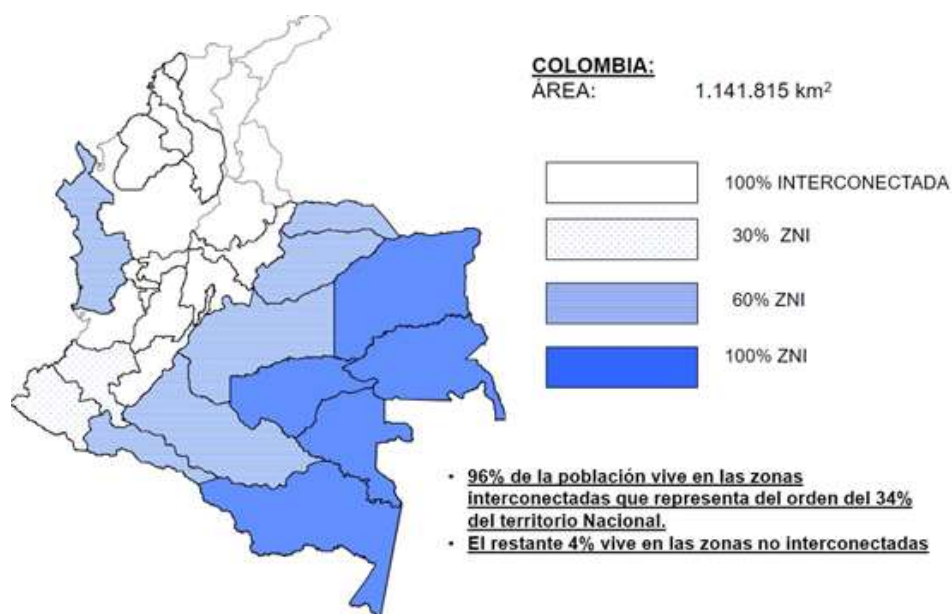
En este capítulo se abordan los antecedentes, normas y conceptos a tener en cuenta para el desarrollo del presente proyecto.

1.1 GENERACIÓN ELÉCTRICA EN ZONAS NO INTERCONECTADAS.

De acuerdo con la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), se define una zona no interconectada (ZNI) como todo municipio, corregimiento, localidad y caserío no conectado al Sistema Interconectado Nacional (SIN).[13]

En las ZNI la prestación del servicio se cubre principalmente con plantas diésel, pequeñas centrales hidroeléctricas y paneles solares.

Figura 1. Distribución de zonas no interconectadas



Fuente: Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME).

El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE); es el encargado de atender las necesidades energéticas de los habitantes que no cuentan con este servicio, se responsabiliza de identificar, implementar y monitorear soluciones energéticas para estos sectores, impulsando el uso de energías renovables con el fin de que Colombia goce de energías limpias y combata la emisión de gases de efecto invernadero aportando así a los compromisos de la meta impuesta en el COP21. [1]

Planta diésel : Es un grupo motor generador y un sistema que utiliza la energía mecánica producida por el motor para generar energía eléctrica a través del principio de inducción magnética. Estos equipos sirven para aplicaciones de reserva (Potencia StandBy) y de operación continua (Potencia Prime).

Para el año 2013 el número de plantas diésel instaladas en las ZNI fueron 1320, distribuida como se muestra en la tabla 1.[2]

Tabla 1. Número de unidades por rangos de potencia

| < 100 kW | De 100 a 300 kW | De 300 a 1000 kW | >1000 kW |
|--------------|-----------------|------------------|----------|
| 1133 | 95 | 76 | 16 |
| 85.8% | 7.2% | 5.8% | 1.2% |
| Total | | 1320 | |

Fuente USAENE LLC, febrero 2013

Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) : Son una tecnología alternativa y ampliamente conocida como fuente no convencional de energía renovable, tiene un rango muy amplio de capacidad instalada, desde 10 kW hasta 20 MW. Aunque hay varias técnicas para la captación de agua, la que se emplea con más frecuencia es el *Sistema a filo de agua*; en este sistema parte del agua embalsada en el río se desvía a un canal de generación, compuesto por el canal, cámara de carga, casa de máquinas y tubería de presión, para luego retornar al río más adelante aguas abajo.[14]

Figura 2. Sistema a filo de agua



Fuente: Investigación de PCH's en Colombia, Ernesto torres quintero. [14]

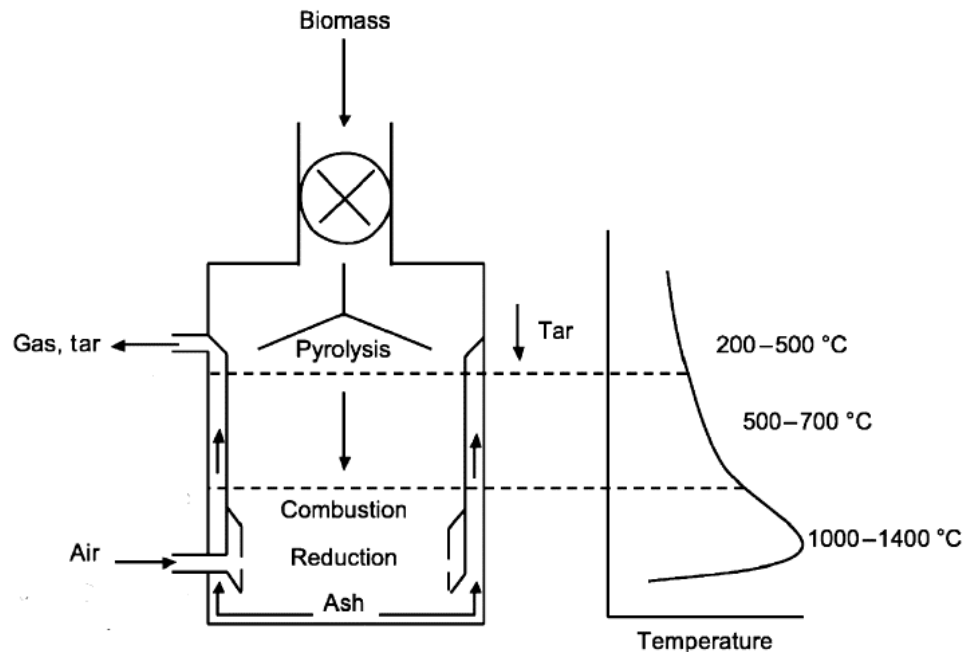
1.2 ANÁLISIS DEL GASIFICADOR DE BIOMASA

En esta sección se abordarán las tecnologías y principios de la gasificación de biomasa, la cual es un proceso termoquímico en el que la biomasa se mezcla con el agente gasificante, este puede ser aire, para producir un gas que pueda ser utilizado como combustible en turbinas o motores para la generación de electricidad o bien generar calor para una caldera. Actualmente las tecnologías más utilizadas para la gasificación de biomasa son:

- **Lecho fijo**, son comunes el *updraft* en donde la biomasa y el aire van en contracorriente, y el *downdraft* donde tanto la biomasa como el aire van en corriente descendente, es decir en la misma dirección.

En la figura 3 se muestra el esquema del reactor de lecho fijo downdraft. El aire que actúa como agente gasificante pasa por el lecho de la biomasa, dando lugar a la producción del gas pobre y residuos sólidos tales como residuos carbonosos y cenizas sin quemar; el gas fluye hacia abajo junto con la biomasa y sale por la parte inferior del lecho de residuo carbonoso. Una característica favorable de este sistema es la baja concentración de alquitrán en el gas producido, debido a que este tiende a craquearse en la zona de alta temperatura.[15]

Figura 3. Esquema reactor de lecho fijo downdraft

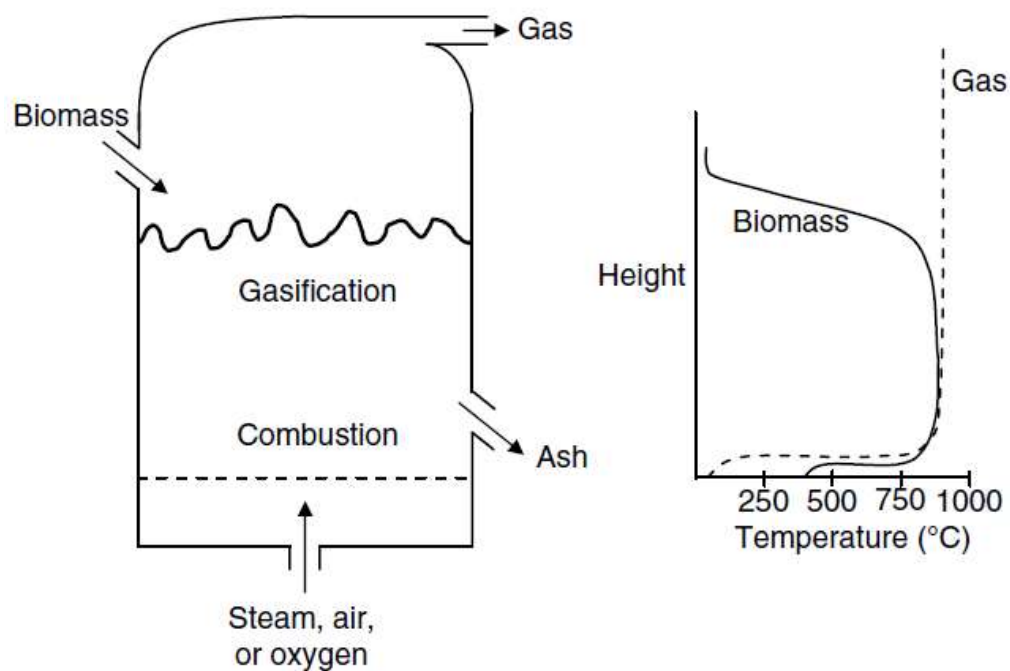


Fuente: Biomass gasification, Prabir Basu.[15]

Son un buen complemento para motores, ya que el gas producido puede servir como combustible y también son deseados por su bajo contenido de alquitrán, siempre y cuando sean operados a la temperatura adecuada.

- **Lecho fluidizado**, sus configuraciones más conocidas y aplicadas son el burbujeante y el circulante. En un gasificador tipo lecho fluidizado burbujeante, se alimenta el combustible por la parte lateral o superior, el gas de fluidización es el mismo agente gasificante, este puede ser aire, vapor de agua, dióxido de carbono u oxígeno y se ingresa por la parte inferior del reactor; siempre trabaja en modo flujo pistón, entrando por la parte inferior y saliendo por la parte superior. En esta tecnología el combustible sólido se pone en contacto con el lecho a alta temperatura, lo cual provoca que experimenten las distintas fases del proceso (secado rápido, pirólisis, combustión de residuo carbonoso y generación de gas).[15]

Figura 4. Esquema reactor de lecho fluidizado burbujeante



Fuente: Biomass gasification, Prabir Basu.[15]

Por su gran inercia térmica y el mezclado óptimo, una gran cantidad de combustibles y gases se pueden obtener, haciendo atractiva su aplicación para la obtención de combustibles a partir de residuos agrícolas y madera; debido a su disponibilidad durante las diferentes épocas del año. Muchas actividades a gran escala en

investigación y desarrollo se centran en las tecnologías de lecho fluidizado burbujeante.

Etapas de la gasificación

- **Secado:** En esta primera etapa, la biomasa se calienta y se seca logrando evaporar parte de su humedad, normalmente los rangos de humedad presente en la biomasa varían de un 20 a 40 %; Este es un factor importante al momento de evaluar el poder calorífico del gas producido, cuando la biomasa tiene altos contenidos de humedad, es necesario un proceso de pre-secado.
- **Pirólisis:** Esta segunda etapa se lleva en un ambiente casi anaerobio, es decir, sin presencia de oxígeno y ocurre entre un rango de temperaturas de 300 a 500 °C; dando lugar a un proceso de descomposición térmica en el que se separan las moléculas más pesadas de hidrocarburos presentes en la biomasa para dar origen a moléculas más livianas como gases condensables y no condensables. Entre los gases producidos se encuentra el H₂, CO, CO₂ e hidrocarburos como el benceno.
- **Oxidación:** En la tercera etapa, el residuo carbonoso obtenido de la etapa anterior se mezcla con el agente gasificante dando lugar a reacciones en las que se producen principalmente CO y CO₂, adicionalmente el oxígeno que aún está disponible se mezcla con CH₄ y H₂ producidos en la etapa 2 dando lugar a la formación de CO₂ y H₂O.
- **Reducción:** Esta etapa ocurre al tiempo que la oxidación, es decir, sus reacciones ocurren en paralelo, pero algunos productos de la oxidación como el CO₂ y H₂O son necesarios para esta etapa, es la más compleja de todas ya que envuelve reacciones químicas entre HC, H₂O, CO₂, O₂ y H₂ junto con los gases desprendidos. Las reacciones más importantes en este proceso son las de gasificación del residuo carbonoso.

Composición final del gas

Para la composición final del gas entran varios factores, los principales son: La composición de la biomasa (de esta depende el poder calorífico obtenido), el contenido de humedad, la temperatura de trabajo de las reacciones, tamaño y densidad de la biomasa triturada y tecnología utilizada.

El gas obtenido contiene principalmente CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, junto con pequeñas partículas de residuos carbonosos como cenizas y alquitrán.

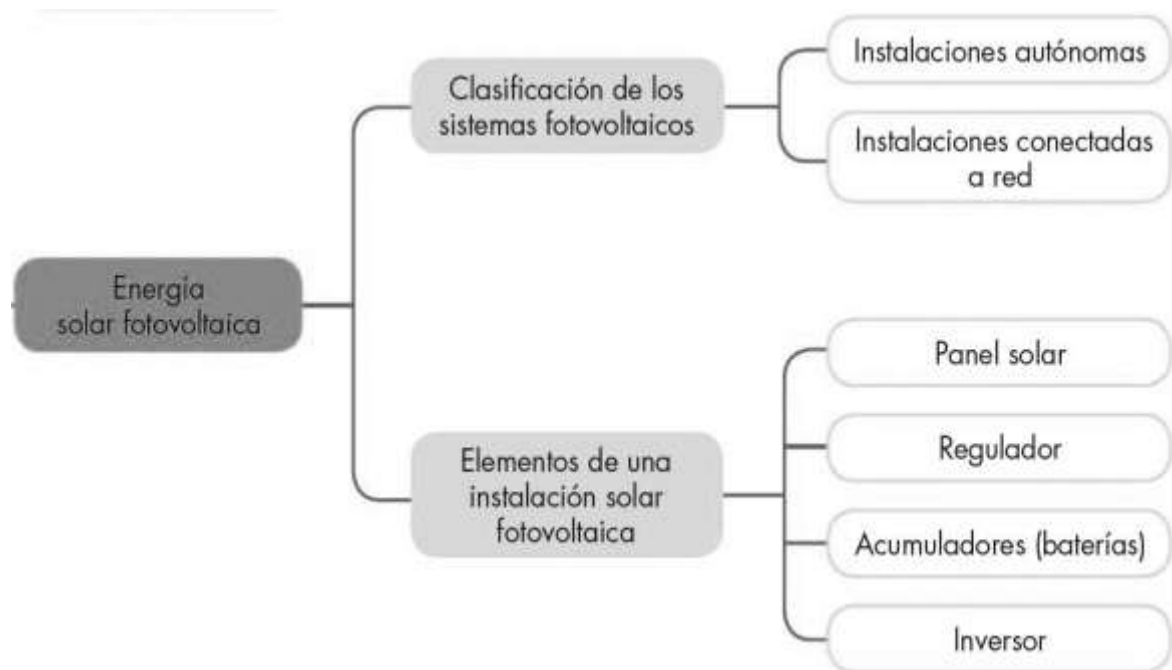
1.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO

A continuación, se presenta la clasificación y componentes principales de las instalaciones solares fotovoltaicas.

Instalaciones autónomas

En este sistema se produce energía sin ningún tipo de conexión con la red eléctrica, el propósito es dotar de energía al lugar donde se encuentran ubicados.[16]

Figura 5. Clasificación y componentes de una ISFV



Fuente: Componentes de una instalación fotovoltaica. [16]

Instalaciones conectadas a red

En este tipo de instalación la generación de energía puede ser inyectada a red netamente o usarla como almacenamiento, este último recibe el nombre de sistema Grid-Tie, donde los excedentes de energía generados se inyectan a red para luego utilizarlos para cumplir con la demanda cuando no hay generación, ahorrando en inversión de baterías.[16]

El panel solar

Está formado por un conjunto de células conectadas, encapsuladas y montadas sobre un marco. A la salida de su conexión proporciona una tensión en corriente continua que varía de acuerdo a su diseño (6 V, 12 V, 24 V). Los tipos de paneles vienen dados por la tecnología de fabricación de sus células.[16]

Tabla 2. Tecnologías de las células solares

| Silicio | Rendimiento Laboratorio | Rendimiento directo | Características y fabricación |
|----------------|-------------------------|---------------------|--|
| Monocristalino | 24% | 15-18% | Son típicos los azules homogéneos y la conexión de las células individuales. Silicio puro fundido y dopado con boro Está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules |
| Policristalino | 19-20% | 12-14% | Igual que el monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización Tiene un color homogéneo (marrón) |
| Amorfo | 16% | <10% | Se deposita en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico |

Fuente: Componentes de una instalación fotovoltaica.[16]

Inversor regulador

Es un equipo electrónico que realiza la conversión de energía continua a alterna, se encarga de sincronizar la onda eléctrica generada con la de la corriente eléctrica de la red, dispone de funciones de protección para garantizar tanto la calidad de la electricidad a la red como la seguridad de la propia instalación de las personas.[16]

Los parámetros que determinan las características de un inversor son los siguientes:

- **Potencia:** Determina la potencia máxima que puede suministrar el arreglo de paneles.[16]
- **Fases:** Para potencias menores a 5kW son monofásicos, para mayores a 15kW suelen ser trifásicos.[16]
- **Rendimiento:** Actualmente en el mercado tienen un rendimiento medio situado alrededor del 90%, el rendimiento del inversor es mayor, en cuanto

más cerca se trabaje a su potencia máxima. La potencia pico de la instalación nunca debe ser menor a la potencia nominal del inversor.[16]

- **Protecciones:** Interruptor automático, limitador de tensión, limitador de frecuencia, protección de sobrecarga, protección contra contactos directos, protección contra corto circuito, bajos niveles de emisión e inmunidad de armónicos.[16]

1.4 ANTECEDENTES

Los sistemas híbridos presentan un ahorro del 25% en costos respecto a sus homólogos (sistemas stand alone) [17]. Los autores evaluaron un sistema híbrido solar fotovoltaico-diésel con baterías para una condición de operación 100 kWh/día mediante indicadores de costo y LLP (*loss of load probability*) como criterio de optimización.

La viabilidad del HES (sistema de energía híbrido) es directamente proporcional a la energía suministrada, es decir, el costo nivelado de energía disminuye conforme aumenta la capacidad y operación del HES.[18] Los autores desarrollaron un algoritmo para evaluar la viabilidad ambiental y económica (HES) compuestos por turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos y grupos electrógenos; el algoritmo está en función de las condiciones ambientales tales como velocidad del viento, radiación solar, junto con la curva de demanda, los indicadores para evaluar la viabilidad son el costo capital inicial, costo nivelado de energía y emisiones contaminantes. Se utilizan las fronteras de Pareto, con diferentes escalas (2kVA, 3kVA, 4kVA) como criterio de optimización.

En sistemas híbridos solares fotovoltaicos-diésel sin baterías el costo nivelado de energía está entre un 0.289 €/kWh y 0.284€/kWh respecto a un 0.32€/kWh del sistema stand alone diésel [19]. Los autores realizaron un modelo y proceso de optimización para el análisis tecno-económico de sistemas híbridos solares fotovoltaicos-diésel sin baterías, sus variables de trabajo son la irradiación solar y la demanda. Se compararon dos escenarios (el primero con generadores diésel de la misma capacidad y el segundo con generadores diésel de distinta capacidad), usando el costo nivelado de energía y número de generadores como criterio de optimización.

Es importante destacar el trabajo realizado por [20] en el cual optimizan un sistema híbrido compuesto por paneles solares, generador diésel, ciclo ORC y baterías utilizando el método de enjambre de partículas. Los factores principales para la optimización son el número de paneles, la potencia del generador diésel, la potencia nominal del ciclo ORC, y su indicador principal es el costo de generación de energía. Los resultados permiten concluir que este sistema logra un ahorro de hasta 38.15% en costos en comparación con el *stand alone* diésel.

1.5 MARCO LEGAL

De acuerdo con el documento entregado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SPPD) *Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica en zonas no interconectadas 2018* [21] el marco normativo o jurídico actualizado para las zonas no interconectadas es el siguiente.

Política

CONPES 3805 de 2014 : Prosperidad para las fronteras de Colombia, en el cual establece las bases para la materialización de una política pública en función del progreso, desarrollo integral y reducción de la brecha socioeconómica de las zonas fronterizas del país [22].

Leyes / Reglamentación

Decreto 1623 de 2015: Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas [23].

Ley 1819 de 2016: Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones [24].

Decreto 348 de 2017: Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala [25].

Decreto 893 de 2017: Por el cual se crean los Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET), garantizando el bienestar y buen vivir de la población en zonas rurales [26].

Decreto 1915 de 2017: Por el cual se adiciona el título 5 de la parte 6 del libro 1 al Decreto 1625 de 2016, Único Reglamentario en Materia Tributaria. para reglamentar el artículo 238 de la Ley 1819 de 2016. El Departamento Nacional de Planeación (DNP) deberá priorizar y distribuir, entre las distintas zonas más afectadas por el conflicto, el cupo máximo de aprobación de proyectos para ser financiados por el mecanismo de pago- Obras por impuestos, definido anualmente por el consejo superior de política económica y fiscal [24], [27].

Decreto Ley 413 de 2018: Por el cual se definen las reglas de priorización de las entidades territoriales beneficiarias de la Asignación para la Paz del Sistema General de Regalías (SGR) y se dictan disposiciones relacionadas con la

aprobación de proyectos de inversión en el OCAD Paz, señaló que los recursos a los que se refieren se distribuirán priorizando las entidades territoriales más afectadas por la pobreza rural y se orientarán a cerrar las brechas sociales, económicas e institucionales en dichas entidades territoriales [28].

Regulación

CREG 027 de 2014: Por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución “Por la cual se definen las reglas para verificar la existencia de los motivos que permiten la inclusión de áreas de servicio exclusivo en los contratos y los lineamientos generales y las condiciones a las cuales deben someterse ellos, para la prestación del servicio público domiciliario de energía eléctrica en las zonas no interconectadas” [29].

CREG 038 de 2014: Por la cual se modifica el código de medida contenido en el anexo general del código de redes [30].

CREG 076 de 2016: Por la cual se definen las reglas para verificar la existencia de los motivos que permiten la inclusión de áreas de servicio exclusivo en los contratos, y los lineamientos generales y las condiciones a las cuales deben someterse ellos, para la prestación del servicio público domiciliario de energía eléctrica en las zonas no interconectadas [31].

CREG 154 de 2017: Por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general, “Por la cual se modifica la Resolución CREG 076 de 2016” [32].

CREG 038 de 2018: Por la cual se regula la actividad de autogeneración en las zonas no interconectadas y se dictan algunas disposiciones sobre la generación distribuida en las zonas no interconectadas [33].

CREG 087 de 2018: Por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general, “Por la cual se modifica la Resolución CREG 076 de 2016” [34].

Como complemento a los mecanismos que el Gobierno ha implementado para el desarrollo de las ZNI, se reglamentó otra fuente de financiación de proyectos mediante el Decreto ley 413 de 2016 [21].

Resolución

Resolución 180961 de 2004: Por la cual se fijan las fórmulas para el cálculo y asignación de los subsidios destinados a los usuarios pertenecientes a los estratos socioeconómicos 1, 2 y 3 ubicados, en las Zonas No Interconectadas y se delegan unas funciones al Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas, IPSE [35].

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

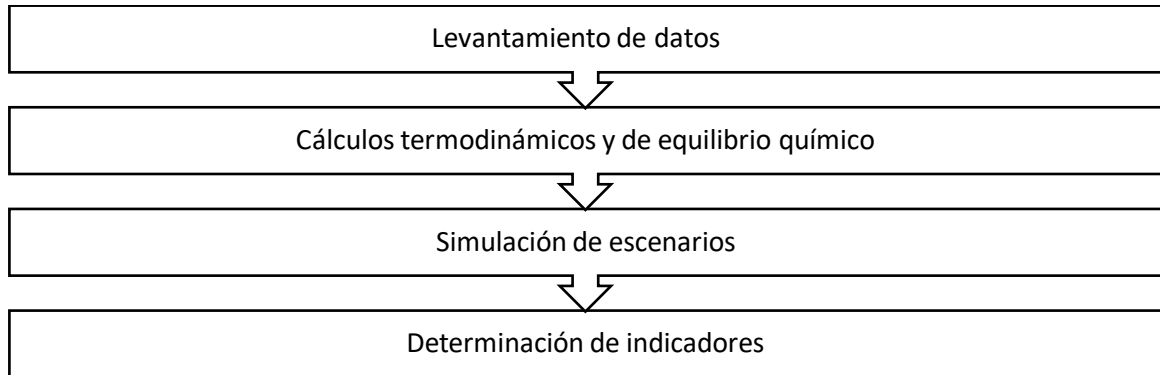
Modelar y simular un sistema de generación híbrido solar fotovoltaico acoplado a un MEC bi-fuel (gas de síntesis-diésel) sometido a diferentes condiciones de carga.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Modelar el sistema MEC de operación bi-fuel (syngas- diésel).
2. Modelar un gasificador de biomasa del gas producido.
3. Simular el sistema acoplado gasificador-MEC-paneles fotovoltaicos para diferentes condiciones de carga.
4. Determinar indicadores de desempeño energético – ambiental.

3. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos se necesitó seguir la siguiente metodología, dividida en las siguientes fases:



3.1 FASE UNO: LEVANTAMIENTO DE DATOS

1. Revisión de literatura relacionada con las tecnologías necesarias para la realización del modelo de simulación.
2. Búsqueda en el centro nacional de monitoreo para definir la carga de la zona no interconectada.

3.2 FASE DOS: CÁLCULOS TERMODINÁMICOS Y DE EQUILIBRIO QUÍMICO

3. Determinación de los cálculos para la obtención de los modelos de simulación del proceso de gasificación.
4. Determinación de los cálculos para el modelo de simulación del grupo motor generador.

3.3 FASE TRES: SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

5. Simulación del sistema en MATLAB, sometido al perfil de carga de la zona no interconectada con variación en la potencia entregada por el sistema fotovoltaico.

3.4 FASE CUATRO: DETERMINACIÓN DE INDICADORES

6. Determinación de los indicadores energéticos e indicadores ambientales y evaluación del sistema de acuerdo a los resultados obtenidos.

4. DESARROLLO

4.1 GASIFICADOR

Debido a que el generador diésel es alimentado con diésel y gas de síntesis, se escogió un gasificador downdraft, ya que esta tecnología se ajusta a las necesidades del sistema como se mostró en la sección 1.2 (Análisis del gasificador de biomasa) .

4.1.1 Modelo de gasificación

Para la tecnología de gasificación se adaptó un modelo de tipo termodinámico y equilibrio químico [4], el cual tiene en cuenta estas consideraciones:

Se tomó como referencia los siguientes parámetros para la composición del gas de síntesis:

- Humedad presente en la biomasa, 20%.
- Condición ambiente (Temperatura, humedad específica) de Bucaramanga.

Se asumió que todas las reacciones se encuentran en equilibrio termodinámico. Se espera que los productos de la pirolisis se quemen y alcancen el equilibrio en la zona de reducción antes de salir del gasificador [4]. Las reacciones son las siguientes:



Combinando las ecuaciones (1) y (2) se obtiene la reacción de cambio o water *Shift reaction*. [4]



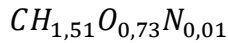
La constante de equilibrio para la formación de metano es

$$K_1 = \frac{P_{CH_4}}{(P_{H_2})^2} \quad (5)$$

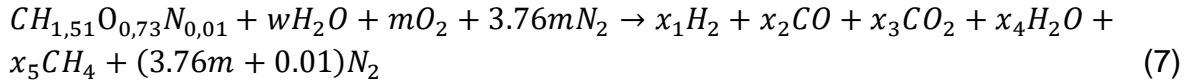
La constante de equilibrio para la reacción de cambio (*Shift reaction*) es

$$K_2 = \frac{P_{CO_2} * P_{H_2}}{P_{CO} * P_{H_2O}} \quad (6)$$

La fórmula química para la caña flecha se obtuvo de Aponte y Gordillo [36]



La reacción global para el modelo de gasificación es



Donde w es la cantidad de agua por kmol de caña flecha, m la cantidad de aire teórico por kmol de caña flecha, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 los coeficientes que constituyen los productos.[4]

Para conocer el valor de w , se relaciona con la humedad de la biomasa de la siguiente manera

$$MC = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de biomasa húmeda}} \times 100\% \rightarrow MC = \frac{18w}{25.19 + 18w} \times 100\%$$

$$w = \frac{25.19 * MC}{18(1 - MC)}$$

Donde MC es la cantidad de humedad por mol de biomasa, una vez conocido este valor, w se vuelve constante; con esto se tienen seis incógnitas x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 y m . Por lo tanto, se requieren seis ecuaciones.[4]

Balance de Carbón

$$x_2 + x_3 + x_5 = 1 \quad (8)$$

Balance de Hidrógeno

$$w = x_1 + x_4 + 2x_5 - 0.755 \quad (9)$$

Balance de Oxígeno

$$w + 2m + 0.73 = x_2 + 2x_3 + x_4 \quad (10)$$

Constante de equilibrio para la formación de metano, ecuación (5)

$$K_1 = \frac{x_5}{(x_1)^2} \quad (11)$$

Constante de equilibrio para la reacción de cambio (*Shift reaction*)

$$K_2 = \frac{x_1 * x_3}{x_2 * x_4} \quad (12)$$

La ecuación para el balance de energía del proceso de gasificación, asumiendo que es un proceso adiabático [4] es:

$$H_{f_{cf}}^0 + w \left(H_{f_{H_2O(l)}}^0 + H_{vap} \right) + m \left(H_{f_{O_2}}^0 \right) + 3.73m \left(H_{f_{N_2}}^0 \right) = x_1 \left(H_{f_{H_2}}^0 \right) + x_2 \left(H_{f_{CO}}^0 \right) + x_3 \left(H_{f_{CO_2}}^0 \right) + x_4 \left(H_{f_{H_2O_{vap}}}^0 \right) + x_5 \left(H_{f_{CH_4}}^0 \right) + \Delta T \left(x_1 C_{p_{H_2}} + x_2 C_{p_{CO}} + x_3 C_{p_{CO_2}} + x_4 C_{p_{H_2O_{vap}}} + x_5 C_{p_{CH_4}} + (3.76m + 0.01) C_{p_{N_2}} \right) \quad (13)$$

Como $H_{f_{N_2}}^0$, $H_{f_{H_2}}^0$ y $H_{f_{O_2}}^0$ son cero a temperatura ambiente, la ecuación se reduce en:

$$H_{f_{cf}}^0 + w \left(H_{f_{H_2O(l)}}^0 + H_{vap} \right) = x_2 \left(H_{f_{CO}}^0 \right) + x_3 \left(H_{f_{CO_2}}^0 \right) + x_4 \left(H_{f_{H_2O_{vap}}}^0 \right) + x_5 \left(H_{f_{CH_4}}^0 \right) + \Delta T \left(x_1 C_{p_{H_2}} + x_2 C_{p_{CO}} + x_3 C_{p_{CO_2}} + x_4 C_{p_{H_2O_{vap}}} + x_5 C_{p_{CH_4}} + (3.76m + 0.01) C_{p_{N_2}} \right) \quad (14)$$

Donde $H_{f_{cf}}^0$ es la entalpía de formación de la caña flecha, $H_{f_{H_2O(l)}}^0$ la entalpía de formación del agua líquida, H_{vap} la entalpía de vapor del agua, $H_{f_{H_2O_{vap}}}^0$ la entalpía de formación del vapor de agua, $H_{f_{CO}}^0$, $H_{f_{CO_2}}^0$, $H_{f_{CH_4}}^0$, entalpías de formación de los productos; $C_{p_{H_2}}$, $C_{p_{CO}}$, $C_{p_{CO_2}}$, $C_{p_{H_2O_{vap}}}$, $C_{p_{CH_4}}$, $C_{p_{N_2}}$, son los calores específicos de los productos, $\Delta T = T_2 - T_1$, T_2 es la temperatura de gasificación en la zona de reducción, T_1 es la temperatura ambiente.[4]

La ecuación (14) se simplifica y se obtiene:

$$dH_{cf} + w \left(dH_{H_2O(l)} \right) = x_1 dH_{H_2} + x_2 dH_{CO} + x_3 dH_{CO_2} + x_4 dH_{H_2O_{vap}} + x_5 dH_{CH_4} + (3.76m + 0.01) dH_{N_2} \quad (15)$$

Donde

$$dH_{cf} = H_{f_{cf}}^0$$

$$dH_{H_2O(l)} = H_{f_{H_2O(l)}}^0 + H_{vap}$$

$$dH_{gas} = H_f^0 + \Delta H, \quad \Delta H = \Delta T (C_{p_{gas}}) \quad (16)$$

Reduciendo (15) con (16) se obtiene

$$Ax_1 + Bx_2 + Cx_3 + Dx_4 + Ex_5 + Fm + G \quad (17)$$

Donde

$$A = dH_{H_2}$$

$$B = dH_{CO}$$

$$C = dH_{CO_2}$$

$$D = dH_{H_2O_{vap}}$$

$$E = dH_{CH_4}$$

$$F = 3.76dH_{N_2}$$

$$G = 0.01(dH_{N_2}) - \left(dH_{cf} + w \left(dH_{H_2O(l)} \right) \right)$$

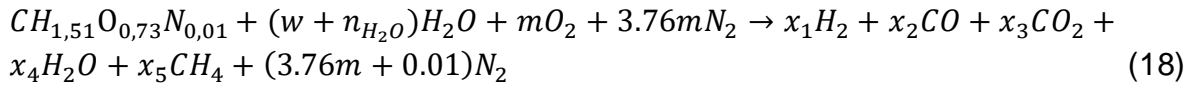
Se obtienen seis ecuaciones (8, 9, 10, 11, 12, 17) para seis incógnitas, de las cuáles (11) es no-lineal; para la solución del sistema de ecuaciones se utilizó el método de NEWTON-RAPHSON.

Una vez realizados los cálculos para el aire teórico m , se calcula el aire húmedo para relacionar las condiciones del ambiente con la composición del gas de síntesis.

$$n_{H_2O} = H_e + 4.76m \left(\frac{M_{aire}}{M_{H_2O}} \right)$$

Donde H_e es la humedad específica del ambiente, M_{aire} el peso molecular del aire, M_{H_2O} el peso molecular del agua.

La reacción global con aire húmedo para el modelo de gasificación es:



Siguiendo con el análisis se tiene:

Balance de Carbón

$$x_2 + x_3 + x_5 = 1 \quad (19)$$

Balance de Hidrógeno

$$w + n_{H_2O} = x_1 + x_4 + 2x_5 - 0.755 \quad (20)$$

Balance de Oxígeno

$$w + n_{H_2O} + 2m + 0.73 = x_2 + 2x_3 + x_4 \quad (21)$$

Constante de equilibrio para la formación de metano, ecuación (5)

$$K_1 = \frac{x_5}{(x_1)^2} \quad (22)$$

Constante de equilibrio para la reacción de cambio (*Shift reaction*)

$$K_2 = \frac{x_1 * x_3}{x_2 * x_4} \quad (23)$$

$$dH_{cf} + (w + n_{H_2O}) (dH_{H_2O(l)}) = x_1 dH_{H_2} + x_2 dH_{CO} + x_3 dH_{CO_2} + x_4 dH_{H_2O_{vap}} + x_5 dH_{CH_4} + (3.76m + 0.01) dH_{N_2} \quad (24)$$

Reduciendo (24) se obtiene

$$A_h x_1 + B_h x_2 + C_h x_3 + D_h x_4 + E_h x_5 + F_h m + G_h \quad (25)$$

$$A_h = dH_{H_2}$$

$$B_h = dH_{CO}$$

$$C_h = dH_{CO_2}$$

$$D_h = dH_{H_2O_{vap}}$$

$$E_h = dH_{CH_4}$$

$$F_h = 3.76 dH_{N_2}$$

$$G_h = 0.01(dH_{N_2}) - \left(dH_{cf} + (w + n_{H_2O}) (dH_{H_2O(l)}) \right)$$

Se utilizó el método de NEWTON-RAPHSON para la solución del sistema de ecuaciones. La tabla 3 muestra el análisis último y próximo de la caña flecha.[36]

Tabla 3. Análisis último y próximo de caña flecha

| CAÑA FLECHA | | | |
|---|--------|----------------------------------|-------|
| C% | 44.696 | H% | 5.70 |
| O% | 43.83 | N% | 0.44 |
| Ash % | 3.15 | Moisture % | 1.92 |
| FC% | 14.49 | VM% | 80.44 |
| HHV (kJ/kg) | 18448 | HHV_{DAF} (kJ/kg) | 19845 |
| Formula empírica : CH_{1.51}O_{0.73}N_{0.01} | | | |

FUENTE: Aponte y Gordillo [36]

La ecuación para obtener la entalpía de formación para la caña flecha a partir de carbón sólido, hidrógeno y oxígeno es [4] :



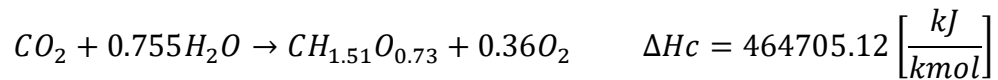
Para la tercera reacción se necesita la entalpía de combustión de la caña flecha, por concepto se tiene que:

$$\Delta H_c = HHV$$

$$HHV = 18448 \left[\frac{kJ}{kg} \right] * 25.19 \left[\frac{kg}{kmol} \right] = 464705.12 \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$$

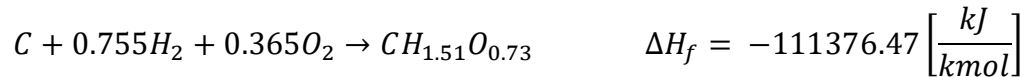
ΔH_c es la entalpía de combustión, de acuerdo con Zainal [4], la entalpía de formación puede ser calculada para cualquier biomasa si se conoce su poder calorífico superior y su análisis último. [4]

Entonces:



$$\Delta H_f = \sum \Delta H_{c_{productos}} - \sum \Delta H_{c_{reactantes}}$$

$$\Delta H_f = 464705.12 - (-393509 - 182572.59)$$



Constantes de equilibrio

La constante de equilibrio K está en función de la temperatura planteándola de la siguiente manera.[4]

$$-RT \ln(K) = \Delta G^0 \quad (26)$$

Donde R es la constante universal de los gases, ΔG^0 es la energía de formación de Gibbs la cual se expresa en función de la temperatura.

$$\frac{d\left(\frac{\Delta G^0}{RT}\right)}{dT} = -\frac{\Delta H^0}{RT^2} \quad (27)$$

Despejando $\ln K$ en (26)

$$\frac{\Delta G^0}{RT} = -\ln(K) \quad (28)$$

Remplazando (28) en (27)

$$\frac{d \ln(K)}{dT} = \frac{\Delta H^0}{RT^2} \quad (29)$$

Integrando (29)

$$\ln(K) = \int \frac{\Delta H^0}{RT^2} dT + I \quad (30)$$

Donde I es la constante de integración. De acuerdo con Zainal [4] ΔH^0 viene dada por:

$$\frac{\Delta H^0}{R} = \frac{J}{R} + (\Delta A)T + \frac{\Delta B}{2} T^2 + \frac{\Delta C}{3} T^3 - \frac{\Delta D}{T} \quad (31)$$

Donde J representa una constante, $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \Delta D$ son coeficientes para determinar el calor específico.

Remplazando (31) en la integración (30)

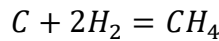
$$\ln(K) = -\frac{J}{RT} + (\Delta A) \ln T + \frac{\Delta B}{2} T + \frac{\Delta C}{6} T^2 + \frac{\Delta D}{2T^2} + I \quad (32)$$

De (26) y multiplicando por $-RT$ se tiene:

$$\Delta G^0 = J - RT(\Delta A) \ln T + \frac{\Delta B}{2} T + \frac{\Delta C}{6} T^2 + \frac{\Delta D}{2T^2} + I \quad (33)$$

Con las ecuaciones (31, 32, 33) se calcularon los valores de las constantes de equilibrio. Para esto es necesario conocer los valores de ΔH^0 y ΔG^0 , las equivalencias son las siguientes:

Para la constante de equilibrio K_1



$$\Delta = CH_4 - C - 2H_2 \quad (34)$$

Tabla 4. Calor específico (constantes)

| Especie | Formula | T _{max} | A | 10 ³ B | 10 ⁶ C | 10 ⁻⁵ D |
|---------------------|------------------|------------------|-------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Metano | CH ₄ | 1500 | 1.702 | 9.081 | -2.164 | - |
| Hidrógeno | H ₂ | 3000 | 3.249 | 0.422 | - | 0.083 |
| Monóxido de carbono | CO | 2500 | 3.376 | 0.557 | - | -0.031 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 2000 | 5.457 | 1.047 | - | -1.157 |
| Nitrógeno | N ₂ | 2000 | 3.280 | 0.593 | - | 0.040 |
| Agua | H ₂ O | 2000 | 3.470 | 1.450 | - | 0.121 |
| Carbón | C | 2000 | 1.771 | 0.771 | - | -0.867 |

FUENTE: Zainal [4]

$$\Delta A = A_{CH_4} - A_c - 2A_{H_2}$$

$$\Delta B = B_{CH_4} - B_c - 2B_{H_2}$$

$$\Delta C = C_{CH_4} - C_c - 2C_{H_2}$$

$$\Delta D = D_{CH_4} - D_c - 2D_{H_2}$$

Tabla 5. Entalpías de formación

| Especie | Formula | Fase | ΔH°_{298} (kJ/kmol) |
|---------------------|------------------|-------------|--|
| Agua | H ₂ O | Gas | -241818 |
| Agua | H ₂ O | Liquido | -285830 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | Gas | -393509 |
| Monóxido de carbono | CO | Gas | -110525 |
| Metano | CH ₄ | Gas | -74520 |
| Hidrógeno | H ₂ | Gas | 0 |
| Oxígeno | O ₂ | Gas | 0 |
| Nitrógeno | N ₂ | Gas | 0 |

FUENTE: Zainal [4]

$$\Delta H^0 = \Delta H^0_{CH_4} - \Delta H^0_C - 2\Delta H^0_{H_2} \quad (35)$$

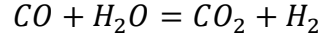
Tabla 6. Energía de formación de Gibbs

| Especie | Formula | Fase | ΔG°_{298} (kJ/kmol) |
|---------------------|------------------|-------------|--|
| Agua | H ₂ O | Gas | -228752 |
| Agua | H ₂ O | Liquido | -237129 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | Gas | -394359 |
| Monóxido de carbono | CO | Gas | -137169 |
| Metano | CH ₄ | Gas | -50460 |
| Hidrógeno | H ₂ | Gas | 0 |
| Oxígeno | O ₂ | Gas | 0 |
| Nitrógeno | N ₂ | Gas | 0 |

FUENTE: Zainal [4]

$$\Delta G^0 = \Delta G_{CH_4}^0 - \Delta G_C^0 - 2\Delta G_{H_2}^0 \quad (36)$$

Para la constante de equilibrio K_2



$$\Delta = CO_2 + H_2 - CO - H_2O \quad (37)$$

Deltas de constantes

$$\Delta A = A_{CO_2} + A_{H_2} - A_{CO} - A_{H_2O}$$

$$\Delta B = B_{CO_2} + B_{H_2} - B_{CO} - B_{H_2O}$$

$$\Delta C = C_{CO_2} + C_{H_2} - C_{CO} - C_{H_2O}$$

$$\Delta D = D_{CO_2} + D_{H_2} - D_{CO} - D_{H_2O}$$

Entalpía de formación

$$\Delta H^0 = \Delta H_{CO_2}^0 + \Delta H_{H_2}^0 - \Delta H_{CO}^0 - \Delta H_{H_2O}^0 \quad (38)$$

Energía de formación de Gibbs

$$\Delta G^0 = \Delta G_{CO_2}^0 + \Delta G_{H_2}^0 - \Delta G_{CO}^0 - \Delta G_{H_2O}^0 \quad (39)$$

Se obtienen los valores y se remplazan en las ecuaciones (31,32) despejando el valor de las constantes I, J para luego remplazarlas en la ecuación (33), de esta forma las constantes de equilibrio quedan en función de cualquier temperatura.

Delta de entalpías

$$\Delta H = Cp_{prom}(T_2 - T_1) \quad (40)$$

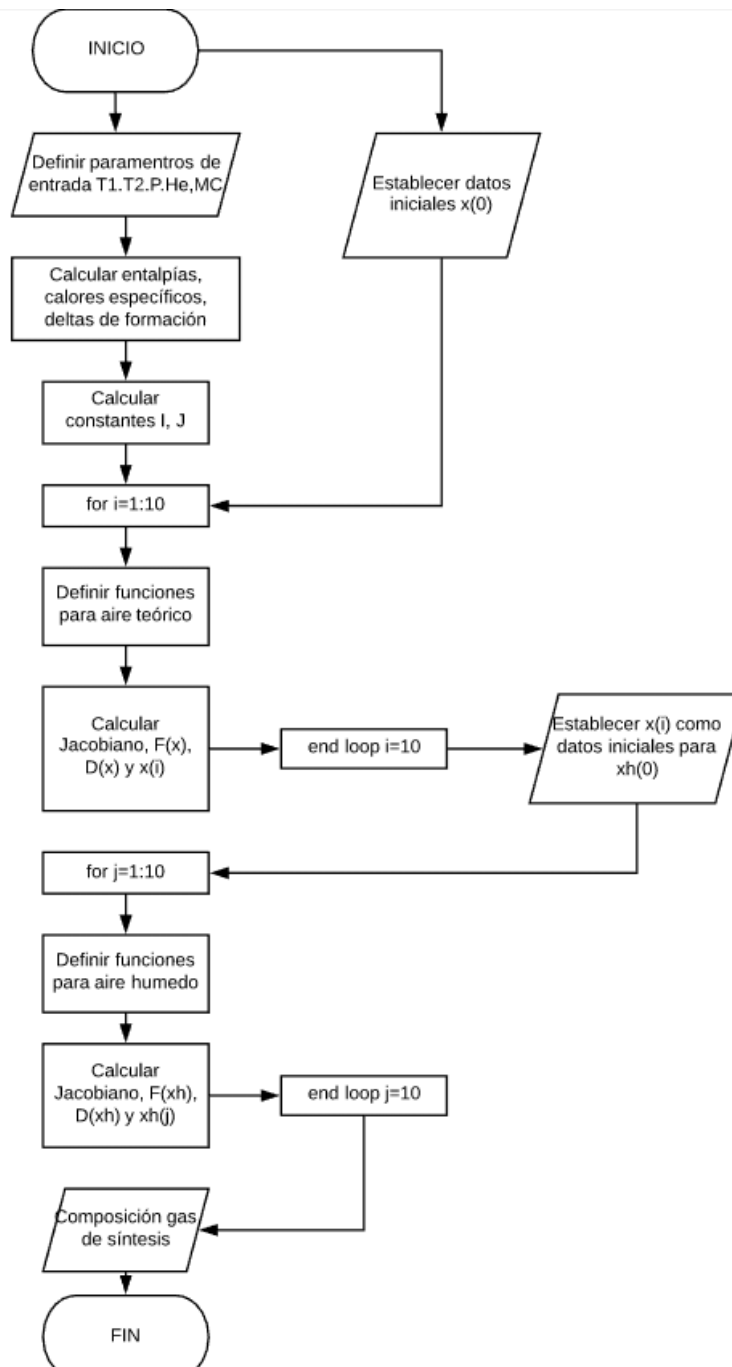
Donde Cp_{prom} es el calor específico promedio para el cambio de temperatura dado, se calcula con la siguiente ecuación [4]:

$$Cp_{prom} = R \left(A + BT_{am} + \frac{C}{3}(4T_{am}^2 - T_1T_2) + \frac{D}{T_1T_2} \right) \quad (41)$$

T_{am} es la temperatura media aritmética $T_{am} = \frac{T_1+T_2}{2}$, A, B, C, D son las constantes de los gases, sus valores se muestran en la Tabla 4.

La figura 6 muestra el algoritmo del modelo de gasificación para una mejor comprensión del mismo.

Figura 6. Algoritmo gasificación



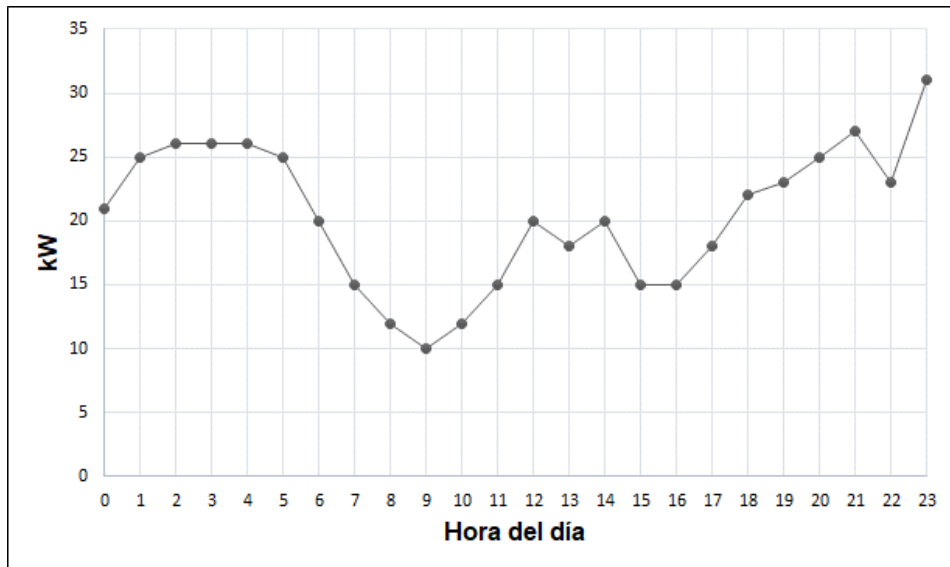
Fuente : Adaptación de [4].

Una vez se obtuvo la composición del gas de síntesis producido por la caña flecha, se procedió a utilizar estos valores en el modelo del motor.

4.2 GRUPO MOTOR GENERADOR

Lo primero fue definir la carga a la que va a estar sometida el sistema, la siguiente curva de carga corresponde a una zona no interconectada que opera 24 horas día [3]. La figura 7 muestra la distribución típica de carga en un día hora-hora.

Figura 7. Carga zona no interconectada



Fuente: Adaptación de IPSE [3]

De acuerdo a la curva se escoge un grupo motor generador que pueda suplir esa demanda para poder evaluar los diferentes escenarios.

Figura 8. Generador GFS30



Fuente: EMEAN power.

En la figura 8 se muestra el generador diésel GFS-30, la tabla 7 muestra las características del motor con el que opera el generador.

Tabla 7. Características motor k4100zd

| Modelo motor | K4100ZD |
|------------------------------|---|
| Tipo de motor | Vertical en línea, cuatro tiempos refrigeración por agua. |
| Potencia | 41 kW |
| Número de cilindros | 4 |
| Diámetro*carrera | 100*115 |
| Desplazamiento (L) | 3.61 |
| Relación de presión | 19 |
| Orden de disparar | 1-3-4-2 |
| Presión efectiva media (kPa) | 914 |
| Temperatura de escape | 540 |
| Consumo (L/h) | 13 |

Fuente: Weifang Huankun Co, Ltd.

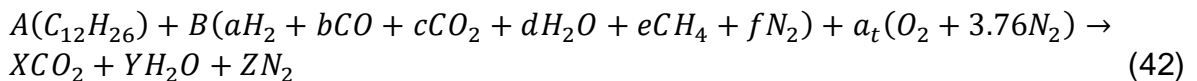
4.2.1 Modelo del grupo motor generador

Se realizó un modelo termodinámico el cual está en función de la fracción molar de diésel y gas de síntesis involucrados en el proceso de combustión.

Consideraciones

El modelo es estático, se mantiene en equilibrio y se asume que el ciclo del motor se comporta como el ciclo ideal; el sistema usa la tecnología HFO (*High Fuel Operation*) para trabajar bi-fuel, ya que se debe mantener una energía firme en caso de que el gasificador no funcione. El diésel se representa con el dodecano.

Estequiometría para el proceso de combustión



Donde

A, B son los porcentajes de diésel y gas de síntesis respectivamente presentes en la combustión; a, b, c, d, e, f es la composición del gas de síntesis obtenido del modelo de gasificación.

$A = 1 : -0.01 : 0.2$ es decir, varía de 1 a 0.2 en intervalos de -0.01.

$$B = 1 - A$$

Balance de carbón

$$X = 12A + B(b + c + e) \quad (43)$$

Balance de hidrógeno

$$Y = \frac{26A + B(2a + 4e + 2d)}{2} \quad (44)$$

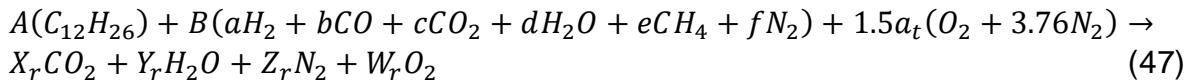
Balance de oxígeno

$$a_t = \left(\frac{2X + Y}{2} - \frac{B(b + 2c + d)}{2} \right) \quad (45)$$

Balance de nitrógeno

$$Z = fB + 3.76a_t \quad (46)$$

Se tomaron estos valores para A, debido a que el sistema siempre debe operar con un valor mínimo de diésel, de lo contrario presentaría fallos en su operación. Una vez obtenido el valor de aire teórico necesario, se procede a realizar el cálculo con un exceso de aire del 50%; los motores diésel trabajan con ese exceso de aire.[7]



Balance de carbón

$$X_r = 12A + B(b + c + e)$$

Balance de hidrógeno

$$Y_r = \frac{26A + B(2a + 4e + 2d)}{2}$$

Balance de oxígeno

$$W_r = \left(\frac{B(b + 2c + d) + 3a_t - Y_r - 2X_r}{2} \right) \quad (48)$$

Balance de nitrógeno

$$Z_r = fB + 3.76(1.5a_t) \quad (49)$$

Se realizó el balance de carbón, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Luego se procede a calcular la relación aire combustible.

$$AC_{molar} = \frac{(1.5 * a_t)(4.76)}{A + B(a + b + c + d + e + f)} \quad (50)$$

$$AC_{masico} = AC_{molar} * \left(\frac{M_{aire}}{M_{mezcla}} \right) \quad (51)$$

Donde M_{aire} , M_{mezcla} son los pesos moleculares del aire y de la mezcla respectivamente. Se debe tener en cuenta el poder calorífico inferior de la mezcla ya que de este depende la energía mecánica del motor. Una forma de calcular viene dada por [37] con la siguiente ecuación:

$$PCI_{mezcla} = \sum y_i PCI_i \quad (52)$$

Por ende, el poder calorífico inferior de la mezcla es:

$$PCI = A(PCI_{C_{12}H_{26}}) + B(PCI_{sg}) \quad (53)$$

El poder calorífico del dodecano se tomó de la base de datos de la NIST (*National Institute of Standards and Technology*).[38]

$$PCI_{C_{12}H_{26}} = 44147 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Por otra parte, el poder calorífico inferior del gas de síntesis se calculó de la siguiente forma.

$$(aH_2 + bCO + cCO_2 + dH_2O + eCH_4 + fN_2) + a_{t_{sg}}(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow X_{sg}CO_2 + Y_{sg}H_2O + Z_{sg}N_2 \quad (54)$$

$$X_{sg} = b + c + e \quad (55)$$

$$Y_{sg} = \frac{2a+2d+4e}{2} \quad (56)$$

$$a_{t_{sg}} = \frac{2X_{sg}+Y_{sg}-b-2c-d}{2} \quad (57)$$

$$Z_{sg} = 3.76(a_{t_{sg}}) \quad (58)$$

$$PCI_{sg} = \sum y_p * h_{f_{productos}}^0 - \sum y_r * h_{f_{reactivos}}^0 \left[\frac{kJ}{kmol} \right] \quad (59)$$

Se asumió $T_{reactivos} = T_{productos}$ tomando esta temperatura como 293.15K, para facilitar el proceso de cálculo.

Se procedió a realizar un análisis dimensional sobre el poder calorífico inferior pasando sus unidades de kJ/kmol a kJ/kg.

$$PCI_{sg_{masico}} = \frac{PCI_{sg}}{M_{sg}} \quad (60)$$

$$M_{sg} = \sum y_i M_i \quad (61)$$

Siendo y_i la fracción molar por componente del gas de síntesis y M_i el peso molecular del mismo componente.

Ciclo de potencia

La tabla 8 muestra cada etapa del ciclo de potencia, junto con las consideraciones y ecuaciones principales para definir los estados termodinámicos.

Tabla 8. Ciclo de potencia Diésel

| | | |
|-------------------|---|--|
| Compresión | Compresión adiabática (Iso-entrópica), se necesita trabajo para llegar a la $T_{\text{ignición}}$ | $P_1 = P_{\text{ambiente}}$ $T_1 = T_{\text{ambiente}}$ $V_1 = V_h + V_c$ $h_1 = f(T_1)$ |
| Combustión | Adición de calor, expansión isóbara, se absorbe trabajo y se realiza trabajo | $P_2 = P_1(r)^k$ $T_2 = T_1(r)^{k-1}$ $V_2 = \frac{V_1}{r}$ $h_2 = f(T_2)$ |
| Expansión | Expansión adiabática (Iso-entrópica), se realiza trabajo y se asume adiabático | $P_3 = P_2$ $T_3 = f(h_2)$ $V_3 = \left(\frac{T_3}{T_2}\right) V_2$ $k_3 = f(T_2)$ $h_3 = \frac{h_2 + CA * PCI}{1 + CA}$ |
| Escape | Expansión Isócora, se cede calor al foco frío (sumidero), no se realiza trabajo | $V_4 = V_3$ $P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k_3}$ $T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k_3-1}$ $h_4 = f(T_4)$ |

Fuente: M.David Burghardt [7]

En la tabla 9 se muestran las unidades y significado de cada variable del ciclo de potencia.

Tabla 9. Nomenclatura variables ciclo de potencia

| Variable | Unidades | Significado |
|------------------|----------------|---|
| CA | - | Relación entre kg de combustible y kg de aire |
| h_1 | kJ/kg | Entalpía en estado 1 |
| h_2 | kJ/kg | Entalpía en estado 2 |
| h_3 | kJ/kg | Entalpía en estado 3 |
| h_4 | kJ/kg | Entalpía en estado 4 |
| k | - | Coefficiente adiabático estado 1 |
| k_3 | - | Coefficiente adiabático estado 3 |
| P_1 | kPa | Presión en estado 1 |
| P_2 | kPa | Presión en estado 2 |
| P_3 | kPa | Presión en estado 3 |
| P_4 | kPa | Presión en estado 4 |
| T_1 | K | Temperatura estado 1 |
| T_2 | K | Temperatura estado 2 |
| T_3 | K | Temperatura estado 3 |
| T_4 | K | Temperatura estado 4 |
| V_h | m ³ | Cilindrada unitaria |
| V_c | m ³ | Volumen cámara de combustión |
| V_1 | m ³ | Volumen estado 1 |
| V_2 | m ³ | Volumen estado 2 |
| V_3 | m ³ | Volumen estado 3 |
| V_4 | m ³ | Volumen estado 4 |
| T_e | K | Temperatura de los gases de escape |
| h_e | kJ/kg | Entalpía de los gases de escape |
| Q_{in} | kJ/kg | Calor de entrada |
| Q_{sal} | kJ/kg | Calor de salida |
| W_{net} | kJ/kg | Trabajo neto |
| $\eta_{teórica}$ | - | Eficiencia teórica |
| η_{real} | - | Eficiencia real |
| W_{ef} | kW | Potencia efectiva |
| PME | kPa | Presión media efectiva |
| cps | s | Ciclos por segundo |
| $isfc$ | kg/kWh | Consumo indicado de combustible específico |
| $Z_{reemplazo}$ | % | Tasa de reemplazo |

| $E_{energ_{gs}}$ | kg _{gasdesintesis} /kg _{diesel} | Equivalencia energética del gas de síntesis |
|-------------------------|---|---|
| $\dot{V}_{gasificador}$ | m ³ /h | Flujo volumétrico de gas en el gasificador |
| \dot{V}_{motor} | m ³ /h | Flujo volumétrico de gas en el motor |
| \dot{V}_{tanque} | m ³ /h | Flujo volumétrico de gas en el tanque |
| W_{comp} | kW | Potencia del compresor |
| T_{comp} | K | Temperatura compresor |
| T_{amb} | K | Temperatura ambiente |
| ρ_{sg} | kg/m ³ | Densidad gas de síntesis |
| Cp_{sg} | kJ/kg-K | Calor específico gas de síntesis |

Fuente : Elaboración propia

Con los estados definidos, se calculó el calor que absorbe el sistema de enfriamiento, de acuerdo con el fabricante la temperatura en el escape T_e es 540 [K], entonces:

$$Q_{enf} = (1 + CA)(h_4 - h_e) \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (62)$$

$$h_e = f(T_e) \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (63)$$

Luego se calculó la energía entregada por la combustión de combustible y la que debe ir al sumidero de calor Q_{in} y Q_{sal} respectivamente.

$$Q_{in} = h_1 + (CA * PCI) \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (64)$$

$$Q_{sal} = (1 + CA) * h_e \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (65)$$

El balance de energía para calcular el trabajo neto entregado por el motor es:

$$W_{net} = Q_{in} - Q_{sal} - Q_{enf} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (66)$$

Eficiencias

La eficiencia teórica es necesaria para calcular la eficiencia real del motor, esta se calculó en función del trabajo neto entregado por el motor.

$$\eta_{teórica} = \frac{W_{net}}{(Q_{in} - h_1)} \quad (67)$$

Para calcular la eficiencia real de acuerdo con M.David Burghardt [7] se estimó de la siguiente manera.

$$\eta_{real} \cong \frac{W_{ef} * cps^{-1}}{m_{fuel} * PCI} \quad (68)$$

$$W_{ef} = PME * cilindrada * cps \quad [kW] \quad (69)$$

Conociendo el consumo de combustible dado por el fabricante y la presión media efectiva (ver Tabla 7), se calculó este valor de eficiencia cuando $A = 1$, para hacer uso correcto de la siguiente equivalencia.

$$\Delta\eta = \eta_{teórica} - \eta_{real} \quad (70)$$

Para los otros valores de $A = 0.99 : 0.2$, se asumió la siguiente relación:

$$\eta_{real} = \eta_{teórica} - \Delta\eta$$

Donde $\Delta\eta$ es constante, de esta manera se mantiene el comportamiento de la curva de eficiencia.

Lo siguiente fue calcular el consumo indicado específico de combustible para cada variación de A ; de acuerdo con H.N Gupta [6]:

$$isfc = \frac{1}{PCI * \eta_{real}} * 3600 \quad \left[\frac{kg}{kWh} \right] \quad (71)$$

Una vez calculado el $isfc$ lo siguiente es ver el comportamiento del motor con cada carga de la zona no interconectada, para cada variación de A , es decir, se mide la tasa de remplazo de combustible diésel.

$$Z_{reemplazo} = \frac{masa_{diesel_{st}} - masa_{diesel_{bifuel}}}{masa_{diesel_{st}}} * 100\% \quad (72)$$

$$masa_{diesel} = f(isfc, carga, A, E_{ener_{gs}}, \eta_{generador}) \quad (73)$$

$$\eta_{generador} = 0.9 \quad \rightarrow \text{Eficiencia del generador}$$

Para calcular su valor se siguió la metodología propuesta por el Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos , Energía, y Protección del Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Colombia.[39]

- Se calculó la densidad para cada combustible a condiciones atmosféricas.
- Se obtuvieron los valores del poder calorífico inferior para cada combustible.
- Se calculó la cantidad de energía por cada unidad de volumen para cada combustible.
- Se realizó el análisis dimensional para calcular el equivalente energético entre los dos combustibles en $[m^3_{gasdesintesis}/gal_{diesel}]$.

- Se realizó el análisis dimensional para tener el valor del equivalente energético en $[\text{kg}_{\text{gasdesintesis}}/\text{kg}_{\text{diesel}}]$.

Se estableció el valor máximo de remplazo, para luego calcular el consumo de combustible neto para cada carga, es decir, se asume que el sistema trabaja siempre para la tasa máxima de remplazo.

Una vez calculado el flujo neto de combustible, se calculó la masa de diésel y ,gas de síntesis; esto con el propósito de calcular el flujo volumétrico del tanque que garantiza siempre flujo estable del gas.

$$\dot{V}_{\text{tanque}} = \dot{V}_{\text{gasificador}} - \dot{V}_{\text{motor}} \quad (74)$$

Donde $\dot{V}_{\text{gasificador}} = 20 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$ este dato es fijo ya que el volumen máximo que llega a consumir el motor es de $15 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$; luego se calculó con este valor el trabajo que consume el compresor.

$$W_{\text{comp}} = \left(\frac{V_{\text{tanque}}}{3600}\right) * \rho_{\text{sg}} * C_{\text{p}_{\text{sg}}} * (T_{\text{comp}} - T_{\text{amb}}) \quad (75)$$

$$T_{\text{comp}} = T_{\text{amb}} * \left(\frac{P_{\text{tanque}}}{P_{\text{ambiente}}}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (76)$$

$$k = \frac{C_{\text{p}_{\text{sg}}}}{C_{\text{v}_{\text{sg}}}} \quad (77)$$

Una vez calculado el trabajo del compresor por cada hora, se suma nuevamente este valor junto con la carga, de tal manera que el motor genere para alimentar el compresor; para que el modelo no quede en un loop infinito, el sistema se restringe de la siguiente manera:

$$\Delta a_{\text{consumo}_{\text{combustible}}} \leq 0.5$$

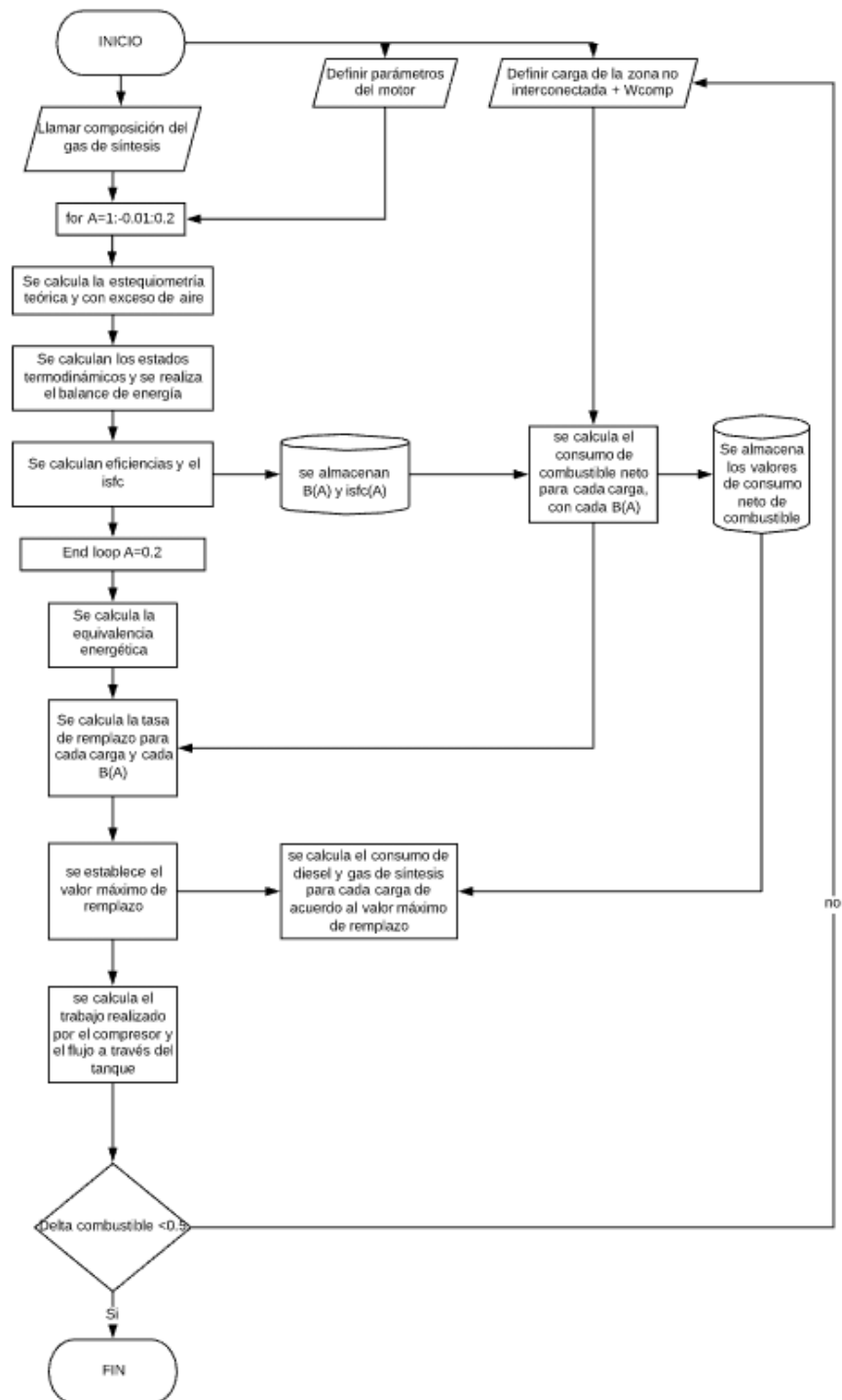
Si se cumple la condición el ciclo finaliza, de lo contrario se recalcula hasta que este se cierre.

Nota: Al momento de evaluar los diferentes escenarios, la carga del generador cambia debido a que la misma varía de acuerdo a la potencia generada por el sistema fotovoltaico (Ver sección 4.3). De tal manera que se puede establecer lo siguiente:

$$W_{\text{generador}} = \text{Carga}_{\text{zonanointerconectada}} + W_{\text{compresor}} - W_{\text{sistemafotovoltaico}} \quad (78)$$

Esto no afecta el modelo ya establecido, simplemente lo complementa. El algoritmo del modelo se presenta en la Figura 9.

Figura 9. Algoritmo modelo motor generador



Fuente: Elaboración propia.

4.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para el sistema fotovoltaico se trabajó con el modelo realizado por Juan David Hernández [9] para calcular la potencia real del panel. El modelo matemático se encuentra en el anexo uno.

Consideraciones

El sistema no tendrá almacenamiento, es decir, solo brindará energía útil cuando la radiación solar lo permita, la energía mínima entregada por el arreglo será de 0.112 kW.

Los valores de radiación solar fueron tomados de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma de Bucaramanga y se realizó un promedio anual de radiación hora a hora, para facilitar cálculos posteriores. La tabla 10 muestra las especificaciones del panel seleccionado.

Tabla 10. Especificaciones panel solar

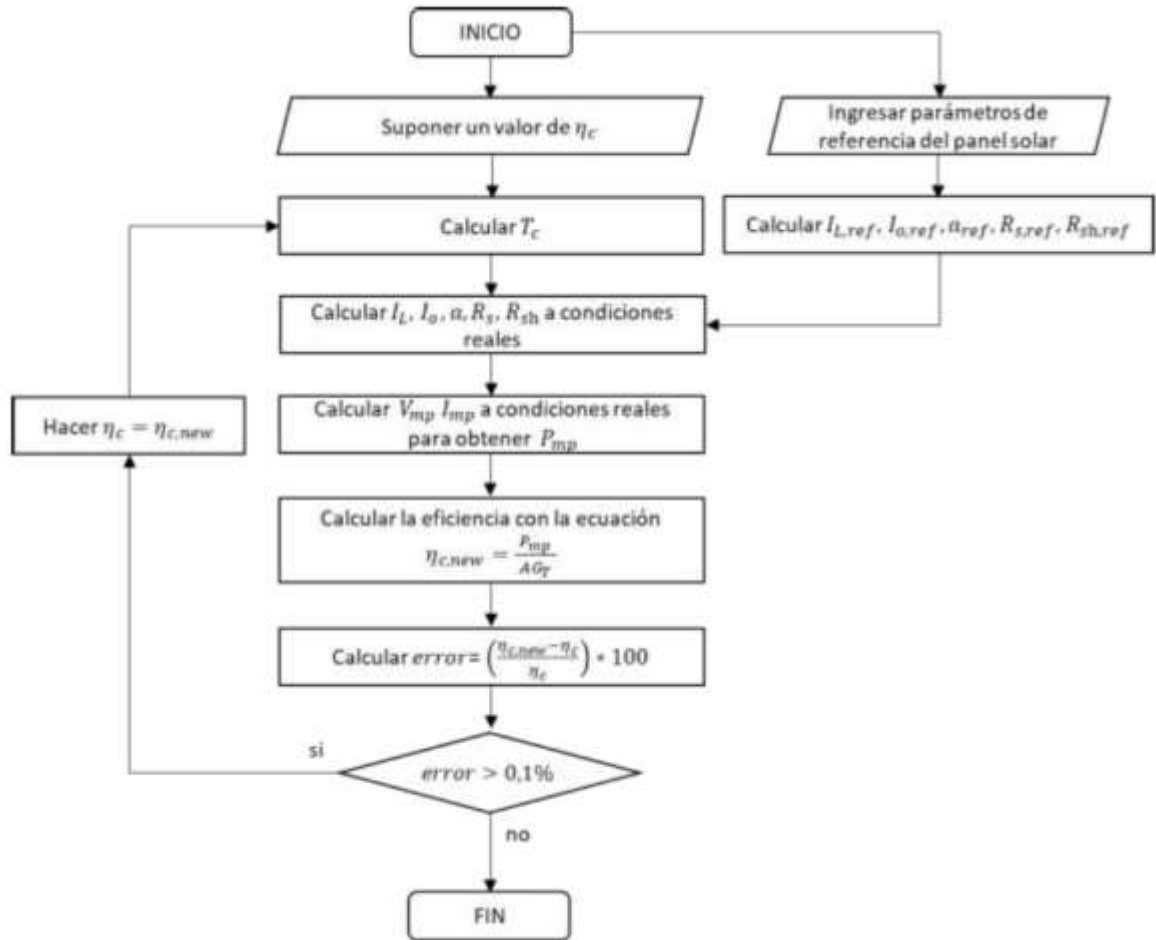
| Modelo | AS-6P-330W |
|--|-------------------|
| Celdas en serie | 72 |
| Área del panel (m²) | 1.9443 |
| Corriente corto circuito (A) | 9.26 |
| Voltaje circuito abierto (V) | 45.9 |
| Corriente de máxima potencia (A) | 8.85 |
| Voltaje de máxima potencia (V) | 37.3 |
| Coeficiente de temperatura para corriente de corto circuito | 0.0005 |
| Coeficiente de temperatura para voltaje de circuito abierto | -0.0031 |
| Radiación de referencia para los paneles (W/m²) | 1000 |
| Masa de aire de referencia | 1.5 |
| Espesor del vidrio (m) | 2e-3 |

Fuente: Green Energy

Algoritmo

El algoritmo para calcular la potencia real entregada por el panel se muestra a continuación, está en función de las condiciones ambiente que para el caso del estudio es la ciudad de Bucaramanga. La figura 10 muestra el algoritmo del modelo desarrollado por Juan David Hernández [9].

Figura 10. Algoritmo para el cálculo de potencia real del panel



Fuente: Juan David Hernández [9]

Una vez obtenida la potencia real entregada por el panel fotovoltaico, se establece la potencia que debe suplir el sistema, esta potencia se determinó para valores fijos del 20%, 40% y 60% del valor máximo de la carga en la zona no interconectada.

$$P_{sfv} = C_x * \max \text{Carga} \quad (79)$$

Donde C_x tiene valores fijos del 20%, 40% y 60% para cada escenario, P_{sfv} es la potencia pico que debe suplir el sistema y $\max \text{Carga}$ el valor máximo de la carga. Luego se determinó el número de paneles necesario para poder suplir esa carga.

$$N_{paneles} = \frac{\left(\frac{P_{sfv}}{\eta_{inversor}}\right)}{\max W_{p_{panel}}} \quad (80)$$

Donde $N_{paneles}$ es el número de paneles, $\eta_{inversor}$ la eficiencia del inversor estimada en 0.9, $\max W_{p_{panel}}$ la potencia pico real del panel obtenidas por el modelo [9]; los valores hora a hora se muestran a continuación.

Tabla 11. Potencia pico real del panel a condiciones ambiente de Bucaramanga

| Hora | Radiación [W/m ²] | Potencia Pico [kW] |
|-------|----------------------------------|-----------------------|
| 6:00 | 50,98 | 0.01897 |
| 7:00 | 195,6 | 0.059,89 |
| 8:00 | 285,7 | 0.08716 |
| 9:00 | 419,9 | 0.1268 |
| 10:00 | 538,6 | 0.1605 |
| 11:00 | 572,7 | 0.169 |
| 12:00 | 527 | 0.1543 |
| 13:00 | 430,7 | 0.1256 |
| 14:00 | 370,5 | 0.1083 |
| 15:00 | 236,4 | 0.06954 |
| 16:00 | 149 | 0.04393 |
| 17:00 | 25,56 | 0.007598 |
| 18:00 | 8,521 | 0.002732 |

Fuente: Adaptación de [9].

Lo siguiente fue calcular la potencia entregada hora a hora durante el día

$$W_{sfv} = W_{panel} * N_{paneles} \quad [kW] \quad (81)$$

4.4 FACTORES DE EMISIÓN (INDICADOR AMBIENTAL)

Los factores de emisión se calcularon de acuerdo a la metodología planteada por la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales para los factores de emisión de los combustibles colombianos (FECOC).[11]

$$E_{CO_2diesel} = X_{diesel} * \left(\frac{M_{CO_2}}{M_C}\right) \quad \left[\frac{kg_{CO_2}}{kg_{diesel}}\right] \quad (82)$$

$$X_{diesel} = \frac{moles C * M_C}{M_{diesel}} \quad (83)$$

Nota: Para los cálculos de emisión se siguió considerando el diésel como dodecano.

$$E_{CO_2_{gasdesintesis}} = \left((Y_{CO} + Y_{CH_4} + Y_{CO_2} * 0.001161) \right) * 16.0225 * \rho_{sg}^{-1} \left[\frac{kg_{CO_2}}{kg_{gasdesintesis}} \right] \quad (84)$$

Donde M_{CO_2}, M_C son los pesos moleculares del dióxido de carbono y el carbón respectivamente; $Y_{CO}, Y_{CH_4}, Y_{CO_2}$ representan la fracción molar presente de cada compuesto en el gas de síntesis y ρ_{sg} es la densidad del gas de síntesis.

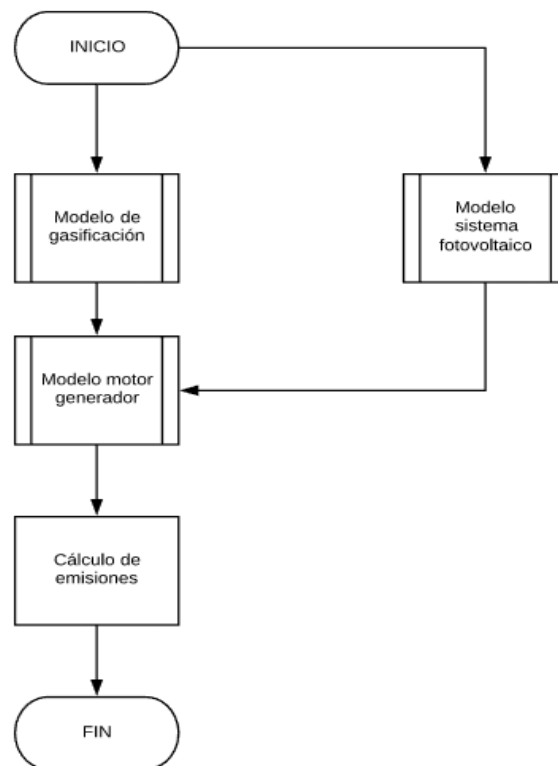
Para determinar los valores de emisión se multiplican las masas de diésel y gas de síntesis consumidos por cada hora del día.

$$E_{CO_2_{totales}} = masa_{diesel}(i) * E_{CO_2_{diesel}} + masa_{gasdesintesis}(i) * E_{CO_2_{gasdesintesis}} \quad (85)$$

Donde i representa cada punto del vector masa, sus valores son $i = 1: 24$, es decir, es un vector que representa cada consumo de masa por cada hora del día.

La figura 11 muestra el algoritmo general de los sistemas modelados, los bloques representan las funciones propias de cada modelo, para al final realizar el cálculo de emisiones.

Figura 11. Diagrama de flujo general de los sistemas modelados



Fuente: Elaboración propia.

4.5 COSTO NIVELADO DE ENERGÍA (INDICADOR ENERGÉTICO)

El costo nivelado de energía (LCOE) es el coste teórico de generar energía eléctrica, es un indicador muy completo debido a que permite analizar los costos durante todo el ciclo de vida de la tecnología. Está dado en unidades de Dinero/energía, normalmente USD/kWh o €/kWh.

$$LCOE = \left(\frac{LC_{fijo}}{kWh_{año\ nivelado}} + \frac{LC_{fuel}}{kWh_{año\ nivelado}} + \frac{LC_{OyM}}{kWh_{año\ nivelado}} \right) \quad (86)$$

$$LC_{fijo} = \sum(\text{Costos fijos} * \text{Factor de nivelación}) \quad (87)$$

$$LC_{fuel} = \sum(\text{Costos fuel} * \text{Factor de nivelación}) \quad (88)$$

$$LC_{OyM} = \sum(\text{Costos de Operación y Mantenimiento} * \text{Factor de nivelación}) \quad (89)$$

$$kWh_{año\ nivelado} = \sum(\text{Energía generada anual} * \text{Factor de nivelación}) \quad (90)$$

La vida útil de un generador eléctrico es aproximadamente de diez años antes de incluir costos de repotenciación [2]. En cuanto a la vida útil del sistema fotovoltaico, se consideró de diez años debido a la vida útil de los inversores, para poder calcular el LCOE en un sistema híbrido es necesario trabajar en el mismo lapso.

4.5.1 Costos fijos

Son la suma de los costos directos e indirectos, para el caso de los generadores en las zonas no interconectadas, de acuerdo con [2] son los siguientes:

Costos directos

- Grupo electrógeno.
- Cabina insonorizada.
- Transformadores, tableros y auxiliares.
- Tanques de almacenamiento de combustible.
- Transporte.
- Mano de Obra.
- Obras Civiles.

Costos indirectos

- Inspectoría RETIE, interventoría técnica, interventoría para lo administrativo y financiero.

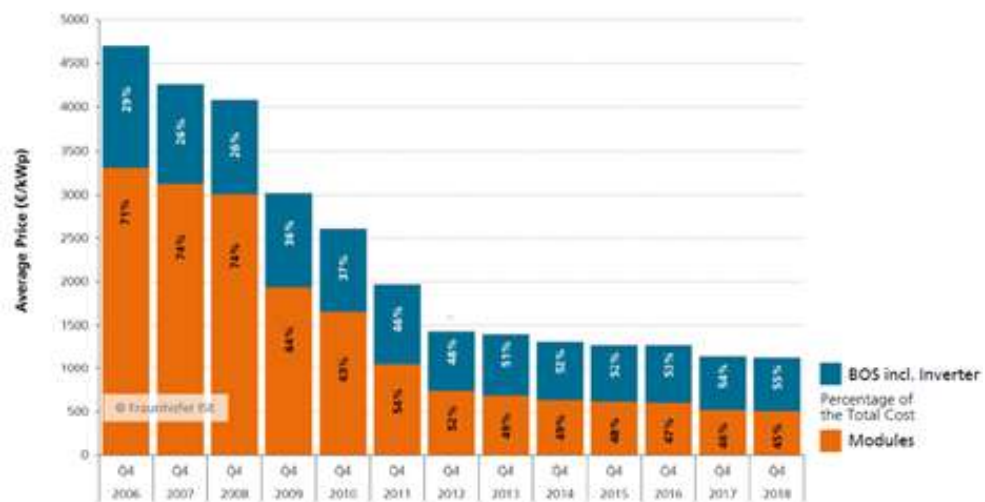
Tabla 12. Costos fijos de grupos electrógenos en zonas no interconectadas

| Item | | ACANDI | PIZARRO | GUAPI |
|---|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Capacidad | kW | 3000 | 1538 | 3900 |
| Costos de Inversión | | | | |
| Grupo electrogeno | | 811.834.483 | 422.659.337 | 634.538.851 |
| Cabina de insonorización | | 60.673.412 | 36.832.260 | 65.679.971 |
| Transformador | | 82.074.240 | 34.367.760 | 165.441.240 |
| Tanque de combustible | | 14.883.750 | 110.565.000 | 227.934.000 |
| Tableros de sincronismo | | 142.505.488 | 74.191.571 | 111.383.873 |
| Seguros | | 22.239.427 | 13.572.319 | 24.099.559 |
| Transporte | | 12.690.906 | 25.187.774 | 49.841.722 |
| Obras civiles | | 524.658.632 | 328.168.944 | 585.051.014 |
| Montaje electromecánico | | 288.344.158 | 129.517.879 | 210.379.252 |
| Sub total | | 1.959.904.498 | 1.175.062.843 | 2.074.349.480 |
| IVA | 16% | 313.584.720 | 188.010.055 | 331.895.917 |
| Total Costos Directos (instalacion y puesta en servicio) | 16,0% | 2.273.489.217 | 1.363.072.898 | 2.406.245.397 |
| Inspección RETE | 1,5% | 34.102.338 | 20.446.093 | 36.093.681 |
| Interventoría Técnica | 6,0% | 136.409.353 | 81.794.374 | 144.374.724 |
| Interventoría Admon y Financiero | 4,5% | 101.852.317 | 61.065.696 | 107.799.794 |
| Total Costos Indirectos | 12,0% | 272.364.008 | 163.296.133 | 288.268.199 |
| Costo Total de Inversión de la planta | \$ | 2.545.853.225 | 1.526.369.031 | 2.694.513.596 |
| Costo de Inversión por kW instalado | USD/kW | 471 | 551 | 384 |

Fuente: UPME [2].

Para el sistema solar fotovoltaico, se tomó como referencia [40], donde los precios fijos están dados por la siguiente gráfica.

Figura 12. Costo fijo de sistemas fotovoltaicos rooftop sin baterías



Fuente: Photovoltaics Report.[40]

4.5.2 Costos operación y mantenimiento

De acuerdo con la literatura [2], los costos de operación y mantenimiento se dividen en componente fijo y componente variable.

Componente fijo anual

- Administración y funcionamiento
- Tiquetes y viáticos
- Arrendamiento de Computadores y compra
- Comunicaciones(internet y telefonía)
- Vigilancia
- Otros costos
- Pólizas
- Personal
- Dotación personal e implementos de seguridad industrial
- Equipos de monitoreo
- Repuestos y herramientas

Componente variable anual

- Apoyo técnico
- Apoyo técnico ambiental
- Costo plan de manejo ambiental
- Consultorías, asesorías y estudios
- Overhaul
- Mantenimiento correctivo
- Mantenimiento preventivo
- Mejoras en la central

Tabla 13.Costos OyM para zonas no interconectadas

| KW | FIJOS | VARIABLES | | | | | | |
|----|------------|-----------|---------|---------|------------|------------|---------|--------------|
| | | ACANDI | PIZARRO | GUAPI | PTO INRIDA | MIRAFLORES | MITÚ | PTO LEGUZAMO |
| | USD/kW.año | USD/kWh | USD/kWh | USD/kWh | USD/kWh | USD/kWh | USD/kWh | USD/kWh |
| 5 | 119,7 | 0,0405 | 0,0436 | 0,0466 | 0,0466 | 0,0485 | 0,0405 | 0,0485 |
| 10 | 119,7 | 0,0391 | 0,0421 | 0,0451 | 0,0451 | 0,0470 | 0,0391 | 0,0470 |
| 20 | 119,6 | 0,0378 | 0,0408 | 0,0436 | 0,0436 | 0,0454 | 0,0378 | 0,0454 |
| 25 | 119,5 | 0,0374 | 0,0403 | 0,0432 | 0,0432 | 0,0449 | 0,0374 | 0,0449 |
| 30 | 119,4 | 0,0371 | 0,0400 | 0,0428 | 0,0428 | 0,0445 | 0,0371 | 0,0445 |

Fuente: UPME.[2]

En cuanto al sistema fotovoltaico de acuerdo con el informe generado por la UPME, (Costos indicativos de generación eléctrica en Colombia) , los sistemas fotovoltaicos no tienen componente variable de operación y mantenimiento.[10]

Componente fijo OyM sistema fotovoltaico

Equivale al costo realizado por limpieza de los módulos fotovoltaicos, se encuentra en un rango de 0 a 200 USD₂₀₁₃/kW, el valor mínimo es cuando el mantenimiento lo ejecuta el propio inversionista y el valor máximo cuando es ejecutado por un externo.

4.5.3 Costos de combustible

Para el caso de este proyecto, los costos de combustible incluyen tanto el costo por galón de diésel como el costo por gas de síntesis usado. Se determinó el costo de combustible diésel con base a las proyecciones brindadas por la UPME en su informe (Proyección de precios de los energéticos para generación eléctrica).[41]

Tabla 14. Variación del precio del galón de combustible diésel

| AÑO | USD/gal |
|------------|----------------|
| 1 | 3.716 |
| 2 | 3.962 |
| 3 | 4.163 |
| 4 | 4.113 |
| 5 | 4.063 |
| 6 | 3.929 |
| 7 | 3.979 |
| 8 | 3.979 |
| 9 | 3.996 |
| 10 | 4.046 |

Fuente: Adaptación de UPME [41]

Para el costo asociado al consumo de gas de síntesis, se asumió que se contaba con un cultivo energético, se realizó un ponderado de acuerdo con [42] y los precios para producción de caña flecha se pueden aproximar a los mostrados en la tabla 15.

La producción de caña de azúcar por hectárea es de 120 toneladas.[43] se asume la misma relación para la caña flecha.

Tabla 15. Costo de la biomasa

| Costos cultivo energético | COP/ha año | COP/tonelada | COP/kg |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| Terreno | 200.657,53 | 1.672,15 | 1,67 |
| Acondicionamiento de terreno | 695.077,70 | 5.792,31 | 5,79 |
| Insumos | 1.605.260,27 | 13.377,17 | 13,38 |
| mano de obra | 802.630,13 | 6.688,58 | 6,69 |
| Total | 3.303.625,63 | 27.530,21 | 27,53 |

Fuente : Adaptación de [42], [43]

De acuerdo con el catálogo del gasificador el consumo de biomasa por un flujo medio de 20(m³/h) de gas de síntesis, es de 10 (kg/h), las tablas 16 y 17 muestran los costos asociados del gasificador y consumo de biomasa.

Tabla 16. Costo gasificador

| Costo gasificador | USD | COP | kg/h |
|-------------------|------|---------|------|
| | 3000 | 9000000 | 10 |

Fuente: Adaptación del catálogo del gasificador

Tabla 17. Costo de la biomasa asociada al gasificador

| | | |
|---------------------------|---------------|---------|
| Costo de syngas | 2.411.646,71 | COP/año |
| Costo syngas+ Gasificador | 11.411.646,71 | COP/año |
| | 3803,88 | USD/año |

Fuente: Elaboración propia

Luego se asoció el costo del compresor al costo del combustible, de la siguiente manera.

$$\text{Costo compresor} = 91562 * \left(\frac{W_{comp}}{455} \right)^{0.67} \quad [USD] \quad (91)$$

W_{comp} , equivale a la potencia máxima consumida por el compresor para cada configuración.

Los costos del compresor y del gasificador se prorratan con el PWF (valor presente).

$$PWF = \left(\frac{1}{(1+i)^n} \right) \quad (92)$$

Donde i es la tasa de retorno, estimada en 11% y n corresponde al año en que se evalúa. Por lo tanto, el costo de combustible quedó:

$$Costo_{combustible} = Costo_{diesel} + Costo_{gasificador+gasdesintesis} + Costo_{compresor} \quad (93)$$

Nota: Ya que los costos para la generación con grupos electrógenos en zonas no interconectadas están dados para capacidades superiores, se escalaron las potencias, primero se traen los dólares del 2013 a dólares del 2019 de la siguiente manera:

$$Valor_{2019} = Valor_{2013} * \frac{IPC_{2019}}{IPC_{2013}} \quad (94)$$

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^\alpha \quad \rightarrow \text{Ecuación para escalar potencias} \quad (95)$$

Dónde α es una constante que depende de la tecnología a evaluar, para este caso se tomó de 0.15, con base en literatura.

También es importante aclarar que el cargo fijo para las tecnologías que utilizan biomasa es aproximadamente del 25%. [12] Mientras que para el sistema fotovoltaico se encuentra en un valor aproximado de 25% a 30%. [12]

$$\text{Factor de nivelación} = \frac{PWF}{\sum PWF} \quad (96)$$

Para una revisión detallada de los cálculos de costo nivelado de energía se recomienda revisar los anexos, ahí se encuentran todas las tablas de cálculo desarrolladas.

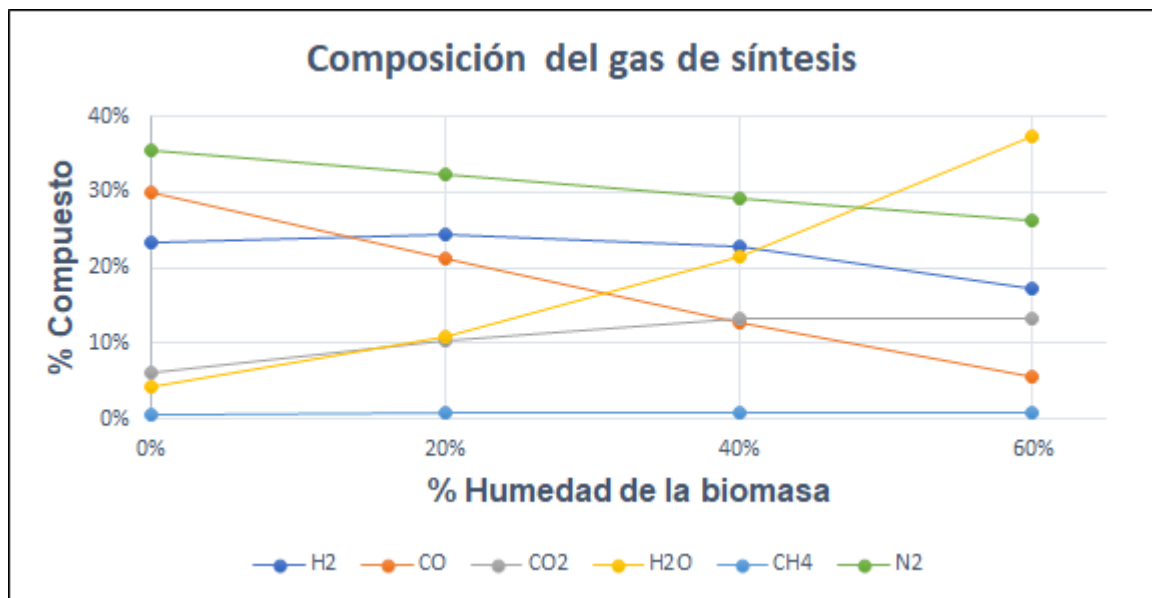
5. RESULTADOS

Para cada escenario se obtuvieron datos de consumo específico por energía generada, emisiones contaminantes por hora durante un día de carga promedio y costo nivelado de energía.

5.1 VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación consta de dos partes, la primera corresponde a la gasificación y la segunda al grupo motor generador. La figura 13 muestra la composición del gas de síntesis obtenido para diferentes porcentajes de humedad en la biomasa.

Figura 13. Composición del gas de síntesis



Fuente: Elaboración propia.

La composición del gas de síntesis varía de acuerdo al modelo en función de la humedad presente en la biomasa, la figura 13 muestra como la fracción molar de CO y H₂O presentan un cambio considerable, mientras que los otros compuestos tienen una variación menor, manteniéndose más estables.

Al no tener datos experimentales de la gasificación de caña flecha, se comparan los resultados obtenidos de este modelo con otros resultados publicados para una biomasa similar a la caña flecha (19%)CO, (22%)H₂, (12%) CO₂, (0.2%)CH₄, (45%)N₂.Bhaduri [5]

Tabla 18. Comparación de la composición del gas de síntesis

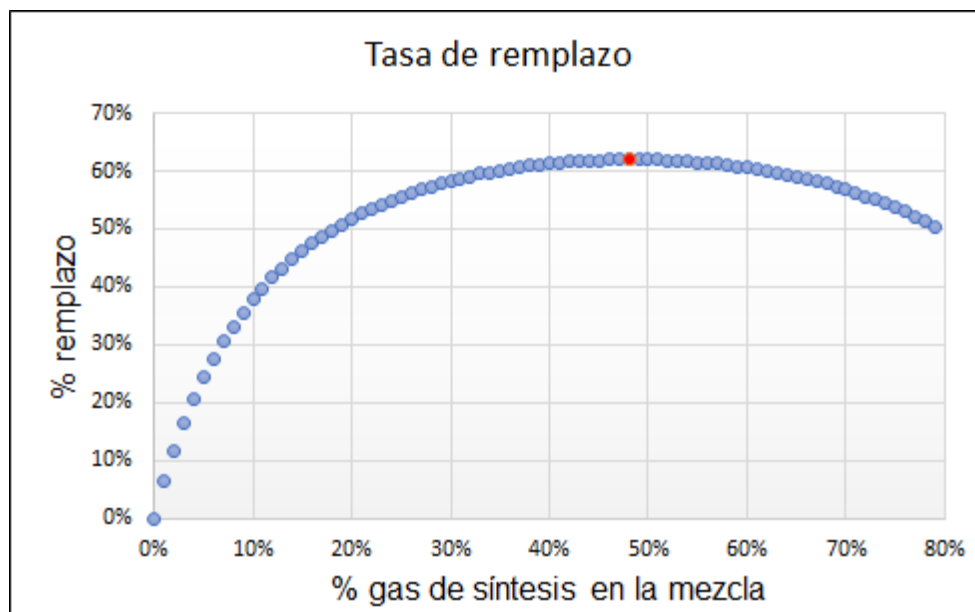
| Compuesto | Fracción molar | |
|------------------|----------------|---------|
| | Modelo | Bhaduri |
| H ₂ | 0.23 | 0.22 |
| CO | 0.3 | 0.19 |
| CO ₂ | 0.06 | 0.12 |
| CH ₄ | 0.01 | 0.02 |
| H ₂ O | 0.04 | 0 |
| N ₂ | 0.36 | 0.45 |

Fuente: Adaptado de [5]

La tabla 18 muestra la composición obtenida por el modelo sin tener en cuenta la humedad de la biomasa, pero sí la humedad relativa del ambiente, comparándola con resultados previamente publicados [5]. Para los cálculos del grupo motor generador se utilizó la composición de gas de síntesis con un porcentaje de humedad en la biomasa del 20%. [4]

En las figuras 14 a 16 se muestra la tasa de remplazo máxima que se alcanza en el modelo, junto con la curva de eficiencia y el poder calorífico para cada variación de fracción molar del gas de síntesis en la mezcla.

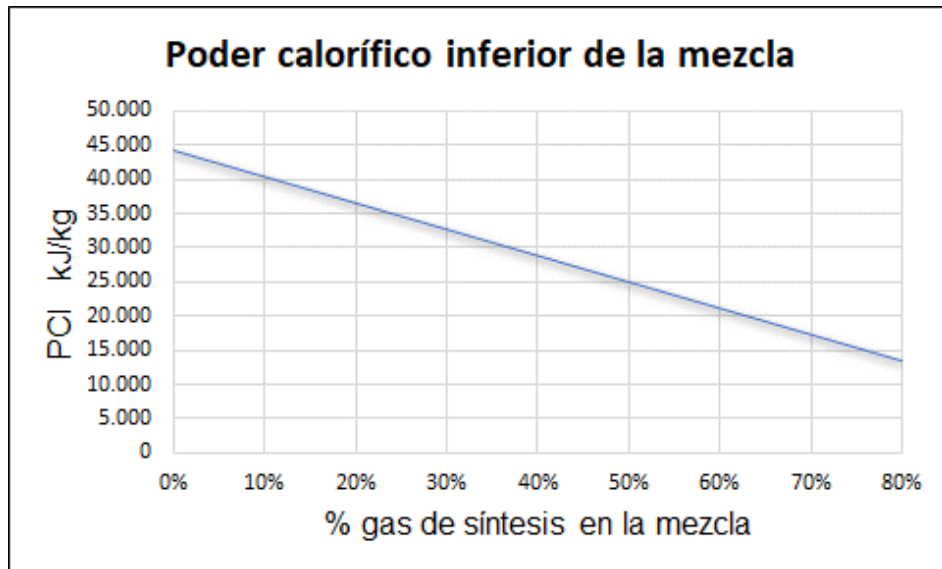
Figura 14. Tasa de remplazo de combustible diésel



Fuente: Elaboración propia.

La tasa máxima de remplazo calculada para el motor trabajando con un exceso de aire del 50%[7], es de 61.99% y corresponde a un valor de 48% en fracción molar de la mezcla de combustible para el gas de síntesis. Este valor se encuentra dentro del margen presentado por investigaciones anteriores que llegan a presentar una tasa de remplazo de hasta un 80%.[44]

Figura 15. Poder Calorífico de la mezcla

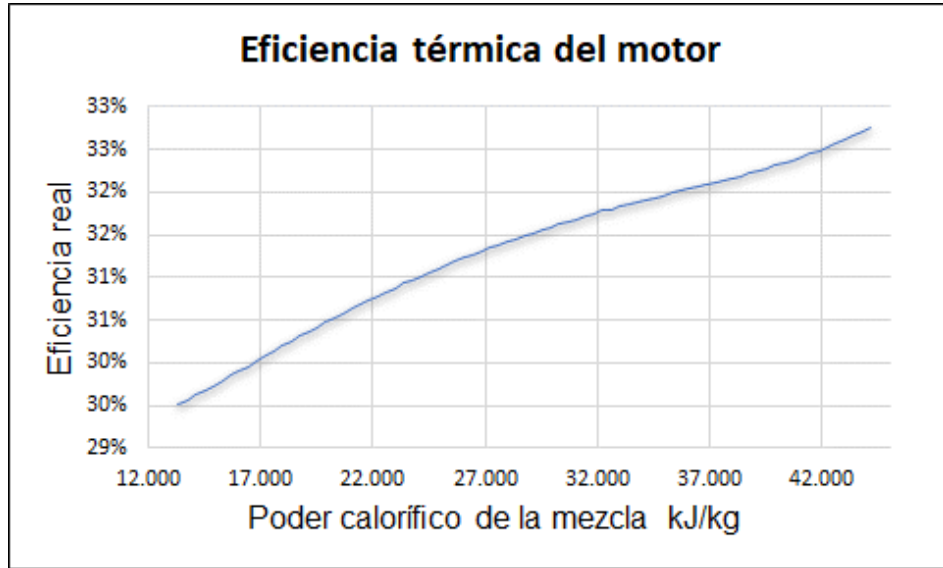


Fuente: Elaboración propia.

La figura 15 muestra el poder calorífico de la mezcla, el comportamiento es lineal debido a que es directamente proporcional a la fracción molar de cada componente, al aumentar la fracción molar del gas de síntesis, la del diésel disminuye y este último tiene un poder calorífico superior, por ende, va a tener una pendiente negativa analizándolo desde el porcentaje del gas de síntesis. El valor calculado para la tasa de remplazo máxima es de 25667 [kJ/kg] y para el escenario standalone diésel es de 44147 [kJ/kg].

La figura 16 muestra el comportamiento de la eficiencia térmica en función de la variación del poder calorífico de la mezcla, como se esperaba en la sección 4.2.1 la eficiencia real mantiene el mismo comportamiento de la eficiencia teórica (Ver anexos), el valor de la eficiencia térmica para la tasa máxima de remplazo es de 31.19%, la eficiencia disminuye cuando el porcentaje de gas de síntesis en la mezcla aumenta, lo cual corresponde a observaciones realizadas en trabajos ya publicados.[44], [45]

Figura 16. Eficiencia térmica del motor



Fuente: Elaboración propia.

5.2 COMPARACIÓN DE LOS ESCENARIOS

A continuación, se presentan los resultados para cada escenario evaluado. La tabla 19 muestra los escenarios y consideraciones de cada caso,

Tabla 19. Escenarios y consideraciones de cada caso

| Escenarios | Diesel | Bi-fuel | Bi-fuel - SFV 20% | Bi-fuel - SFV 40% | Bi-fuel - SFV 60% |
|------------------------|--------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Tasa de retorno | 11% | 11% | 11% | 11% | 11% |
| Cargo fijo | 15% | 25% | 25 y 30% | 25 y 30% | 25 y 30% |
| Vida útil | | | 10 años | | |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados de todos los escenarios en forma de comparación.

La tabla 20 muestra la reducción de emisiones contaminantes (kg CO₂ diario) para cada escenario propuesto, el resultado muestra una reducción considerable del 57% con el sistema operando únicamente en modo bi-fuel; por su parte los sistemas que implementan generación fotovoltaica logran disminuciones superiores del 62,64

y 66%, esto se debe a que las emisiones son directamente proporcionales al consumo de combustible diésel del generador.

Tabla 20. Disminución de emisiones para cada escenario

| Escenarios | Diesel | Bi-fuel | Bi-fuel - SFV 20% | Bi-fuel - SFV 40% | Bi-fuel - SFV 60% |
|------------------------------|---------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Emisiones diarias | 378,885 | 161,159 | 145,863 | 135,260 | 128,370 |
| Reducción kg CO ₂ | 0 | 217,7258 | 233,022 | 243,6247 | 250,5148 |
| % Reducción | 0% | 57% | 62% | 64% | 66% |

Fuente: Elaboración propia.

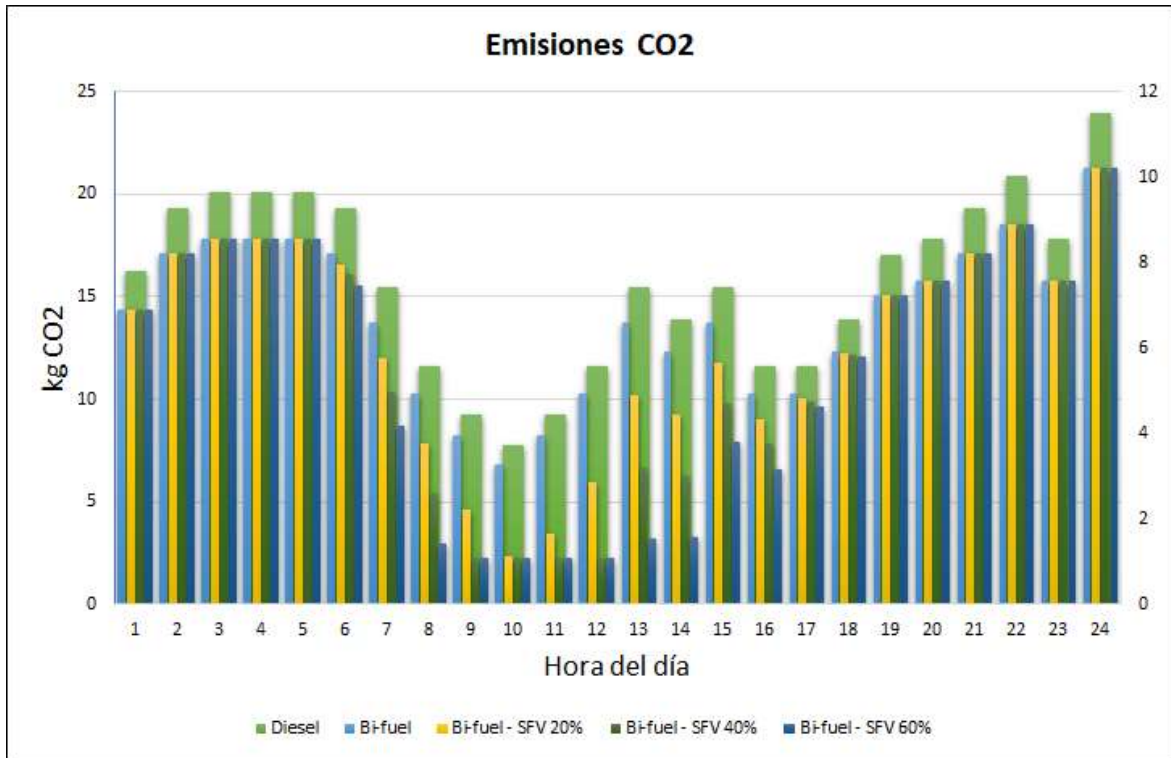
La figura 17 muestra las emisiones contaminantes en kg CO₂ para un día de consumo promedio, donde los escenarios son:

- **Diesel** (Sistema standalone consumo full diésel)
- **Bi-fuel**(sistema stand alone consumo bi-fuel)
- **Bi-fuel-SFV 20%**(sistema bi-fuel con sistema fotovoltaico con potencia pico del 20 % de la carga máxima)
- **Bi-fuel-SFV 40%**(sistema bi-fuel con sistema fotovoltaico con potencia pico del 40 % de la carga máxima)
- **Bi-fuel-SFV 60%**(sistema bi-fuel con sistema fotovoltaico con potencia pico del 60 % de la carga máxima)

Los kg CO₂ para el primer escenario están escalados con el eje principal, los demás escenarios vienen escalados con el eje secundario. El mayor consumo de energía se presenta en la noche y madrugada, esto incrementa las emisiones respecto al resto del día, lo cual corresponde al comportamiento de la gráfica.

Se puede observar que para la carga máxima está el valor pico de emisiones sin importar el escenario, el valor de este pico es el mismo para los escenarios que trabajan con bi-fuel, ya que se da a media noche y al no contar con un sistema de almacenamiento los paneles solo aportan a esta reducción en sus horas útiles de generación, que van desde las seis de la mañana hasta las seis de la tarde.

Figura 17. Emisiones



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Costo nivelado de energía para los diferentes escenarios

| Escenarios | Diésel | Bi-fuel | Bi-fuel-SFV 20% | Bi-fuel-SFV 40% | Bi-fuel-SFV 60% |
|------------|---------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|
| USD/kWh | 0,435 | 0,269 | 0,279 | 0,2798 | 0,2756 |
| COP/kWh | 1305,41 | 807,95 | 837,61 | 839,58 | 826,89 |

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 21 se muestra el costo nivelado de energía por escenario evaluado, el escenario que presenta un costo superior al resto es el sistema stand alone diésel, por distribución de costos (ver sección 5.3) se relaciona directamente el costo del combustible como el factor dominante; el escenario de operación bi-fuel tiene un costo nivelado de energía más bajo, esto se debe a que no implementa el costo extra del sistema fotovoltaico y tiene un ahorro de combustible diésel por el uso de gas síntesis como combustible secundario.

Tabla 22. Consumo específico de combustible

| Escenarios | Diésel | Bi-fuel | Bi-fuel-SFV 20% | Bi-fuel-SFV 40% | Bi-fuel-SFV 60% |
|------------------------|--------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Isfc kg/kWh | 0.249 | 0.4497 | 0.4497 | 0.4497 | 0.4497 |

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 22 muestra el consumo específico de combustible por cada kWh generado de cada escenario. El valor correspondiente para el primer escenario es bajo debido a que le poder calorífico de combustible es superior respecto a los otros escenarios. Para los otros escenarios el valor se mantiene constante ya que el modelo de simulación trabaja en función del valor máximo de la tasa de remplazo (61.99%) y este valor de Isfc corresponde a la misma.

5.3 ESCENARIO STAND ALONE, DIESEL

En este escenario el sistema trabaja únicamente con combustible diésel y está sometido a la carga de la zona no interconectada.

Tabla 23. Costo nivelado de energía sistema stand alone diésel

| Energía nivelada kWh | LC Fuel [USD/año] | LC fijo [USD/año] | LC O&M [USD/año] |
|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 178850 | 62.946,40 | 4255,231338 | 10622,80454 |
| LCOE | 0,435138039 | | USD/kWh |
| | 1305,414118 | | COP/kWh |

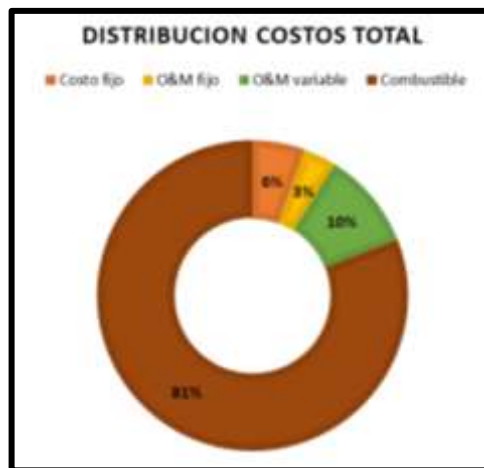
Fuente: Elaboración propia

El costo nivelado de energía se muestra en la tabla 23, la generación nivelada corresponde a 178850 kWh durante toda la vida útil del sistema, el costo del combustible es el mayor y corresponde al 81% del costo total (ver Figura 18).

En la figura 18 se muestra la distribución de costos para la vida útil del sistema. Los costos de operación y mantenimiento fijos equivalen al 13%, los costos fijos son del 6% y el costo predominante corresponde al combustible con un 81% del costo total.

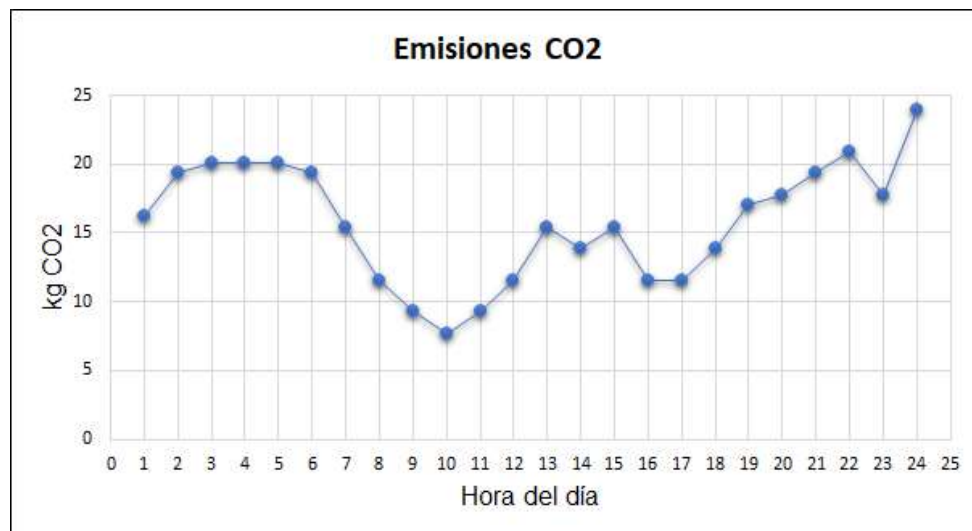
La figura 19 muestra las emisiones del sistema dadas en kg CO₂. El comportamiento de la gráfica corresponde al mismo comportamiento de la carga (ver Figura 7), esto se debe a que las emisiones contaminantes son directamente proporcionales al consumo de combustible y este último a la carga.

Figura 18. Distribución de costos sistema Stand alone diésel vida útil



Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Emisiones de CO₂ sistema stand alone diésel



Fuente: Elaboración propia.

5.4 ESCENARIO STAND ALONE, BI-FUEL

El sistema trabaja con dos combustibles, uno primario que corresponde al diésel y el secundario gas de síntesis. Está sometido a la carga de la zona no interconectada y la carga del compresor.

Tabla 24. Costo nivelado de energía para sistema stand alone bi-fuel

| Energía nivelada kWh | LC Fuel [USD/año] | LC fijo [USD/año] | LC O&M [USD/año] |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 187587,9175 | 32.286,76 | 7092,05223 | 11141,79358 |
| LCOE | 0,269316948 | | USD/kWh |
| | 807,950845 | | COP/kWh |

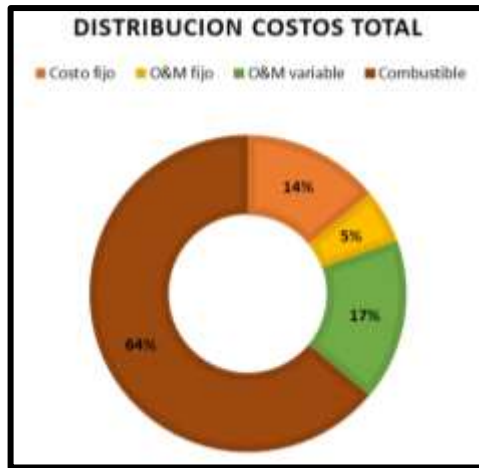
Fuente: Elaboración propia.

El costo nivelado de energía para el sistema bi-fuel se muestra en la tabla 24, la energía generada es mayor respecto al primer escenario, esto se debe a que el sistema debe tener la carga de la zona no interconectada y el compresor. Se reduce el costo de combustible casi a la mitad, a pesar de que la carga es mayor; a su vez se aumentan los costos fijos junto con los de operación y mantenimiento ya que la tecnología está asociada al consumo de biomasa.

En la figura 20 se muestra la distribución de costos para la vida útil del sistema, el costo asociado a combustibles es de 64%, los costos asociados a operación y mantenimiento son de 22% y finalmente los costos fijos del 14%. Respecto al primer escenario se observa un ahorro en costo de combustibles, pero un aumento en costos fijos y de operación y mantenimiento. A pesar de ese aumento el costo nivelado de energía se reduce un 38%.

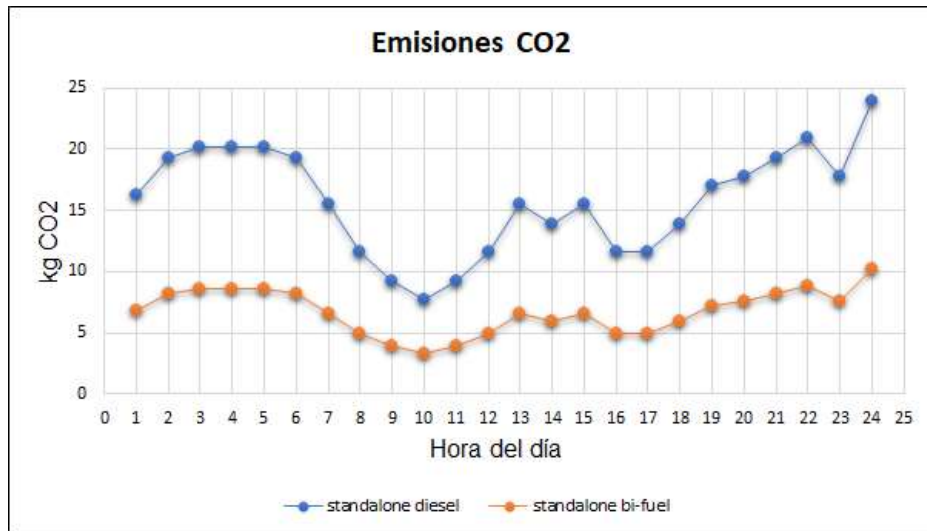
En cuanto a las emisiones contaminantes (kg CO₂) , se graficó la cantidad de emisiones por hora en un día promedio junto con las del primer escenario (ver figura 21), la relación emisión-carga se mantuvo; se reduce cerca del 57% de las emisiones contaminantes (ver sección 5.2).

Figura 20. Distribución de costos sistema stand alone bi-fuel vida útil



Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Emisiones de CO2 sistema stand alone diésel y bi-fuel



Fuente: Elaboración propia.

5.3 BI-FUEL, SISTEMA FOTOVOLTAICO CON 20% CARGA (6.21 kW)

El sistema trabaja con dos combustibles, el primario es combustible diésel, el secundario gas de síntesis, tiene como soporte un sistema fotovoltaico que está dimensionado para suplir un 20% de la carga pico, es decir, 6.21 kW.

Tabla 25. Costo nivelado de energía generador bi-fuel

| Energía nivelada kWh | LC Fuel [USD/año] | LC fijo [USD/año] | LC O&M [USD/año] |
|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 171282,3455 | 29.993,33 | 7092,05223 | 10173,32333 |
| LCOE | 0,275911137 | | USD/kWh |
| | 827,7334117 | | COP/kWh |

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 25 muestra el resultado obtenido para el costo nivelado de energía del generador, se puede ver como la energía generada disminuye, esto se debe a que el sistema fotovoltaico apoya al generador durante cerca de 12 horas, sin embargo, el generador debe seguir entregando un mínimo de energía para cumplir con la carga que consume el compresor y la zona no interconectada. El costo nivelado de energía es superior debido a que se está generando menos energía para el mismo periodo de tiempo. La tabla 26 corresponde al costo nivelado de energía del sistema fotovoltaico, la energía entregada durante una vida útil de 10 años del sistema fotovoltaico equivale a un 5.9% de la energía total entregada por el sistema híbrido. El costo nivelado de energía para un sistema híbrido depende principalmente de la energía generada por cada tecnología, de tal manera que es el costo ponderado de ambos.

Tabla 26. Costo nivelado de energía Sistema fotovoltaico al 20% carga

| Energía nivelada kWh | LC fijo [USD/año] | LC O&M [USD/año] |
|----------------------|----------------------|---------------------|
| 10744,61385 | 2351,689056 | 1212,621817 |
| LCOE | 0,331730011 | USD/kWh |
| | 995,1900341 | COP/kWh |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Costo nivelado de energía del sistema híbrido SFV 20%

| Energía nivelada total kWh | % Grupo generador | % SFV |
|-----------------------------|-------------------|---------|
| 182026,9593 | 94.09 | 5.9 |
| LCOE sistema híbrido | 0,279205991 | USD/kWh |
| | 837,6179735 | COP/kWh |

Fuente: Elaboración propia.

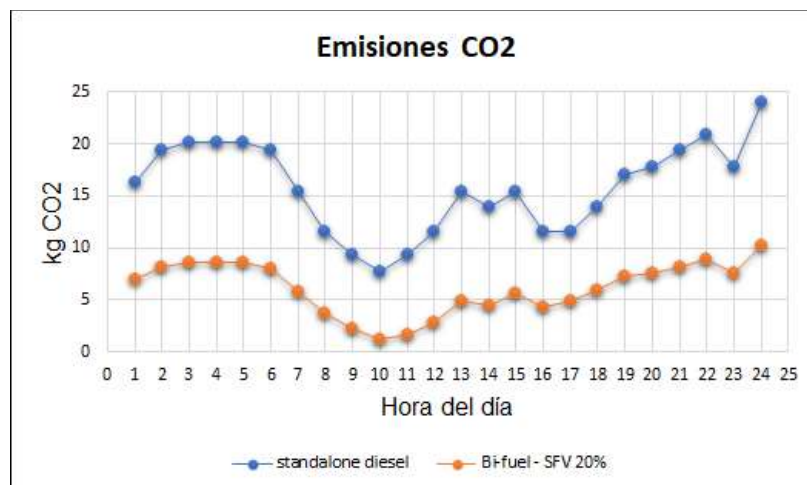
La distribución de costos se muestra en la figura 22, los costos de combustible disminuyen a un 57%, es decir, siete puntos menos que el sistema bi-fuel sin generación fotovoltaica. Los costos fijos aumentan debido a la inversión extra en el sistema fotovoltaico al igual que los costos de operación y mantenimiento. Sin embargo, a pesar de los costos de inversión extra, el costo nivelado de energía se reduce en un 35.8% respecto al primer escenario. La figura 23 muestra las emisiones (kg CO₂) del sistema, estas emisiones se reducen en un 62% (ver sección 5.2), la relación emisión-carga se mantuvo.

Figura 22. Distribución de costos sistema híbrido SFV 20% carga



Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Emisiones de CO₂ para sistema híbrido SFV 20% carga



Fuente: Elaboración propia.

5.4 BI-FUEL, SISTEMA FOTOVOLTAICO CON 40% CARGA (12.5 kW)

El sistema trabaja con dos combustibles, el primario es combustible diésel, el secundario gas de síntesis, tiene como soporte un sistema fotovoltaico que está dimensionado para suplir un 40% de la carga pico, es decir, 12.4722 kW. El sistema está sometido a la carga de la zona no interconectada y el compresor.

Tabla 28. Costo nivelado de energía generador bi-fuel

| Energía nivelada kWh | LC Fuel [USD/año] | LC fijo [USD/año] | LC O&M [USD/año] |
|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 159979,4635 | 28.248,72 | 7092,05223 | 9501,988096 |
| LCOE | 0,280303228 | | USD/kWh |
| | 840,9096835 | | COP/kWh |

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 28 muestra el resultado obtenido para el costo nivelado de energía del generador, la energía generada disminuye respecto a los escenarios anteriores, esto se debe a que el sistema fotovoltaico apoya al generador durante cerca de 12 horas, sin embargo, el generador debe seguir entregando un mínimo de energía, equivalente al 15% de carga para cumplir con la demanda de la zona no interconectada y el compresor. El costo nivelado de energía es superior debido a que se está generando menos energía para el mismo periodo de tiempo.

La tabla 29 corresponde al costo nivelado de energía del sistema fotovoltaico, la energía entregada durante una vida útil de 10 años del sistema fotovoltaico equivale a un 11.88% de la energía total entregada por el sistema híbrido.

Tabla 29. Costo nivelado de energía para el sistema fotovoltaico al 40% carga

| Energía nivelada kWh | LC fijo [USD/año] | LC O&M [USD/año] |
|----------------------|----------------------|---------------------|
| 21579,54473 | 3533,061918 | 2435,436688 |
| LCOE | 0,276581303 | USD/kWh |
| | 829,7439097 | COP/kWh |

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 30 muestra el costo nivelado de energía del sistema híbrido, el cuál es menor respecto al primer escenario (ver sección 5.2).

Tabla 30. Costo nivelado de energía del sistema hibrido para SFV 40% carga

| Energía nivelada total kWh | % Grupo generador | % SFV |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------|
| 181559,0082 | 0,881143079 | 0,11885692 |
| LCOE sistema hibrido | 0,279860851 | USD/kWh |
| | 839,582554 | COP/kWh |

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de costos se muestra en la figura 24, los costos de combustible disminuyen a un 53%, es decir, once puntos por debajo del segundo escenario. El costo nivelado de energía se reduce en un 35.68% respecto al primer escenario (ver sección 5.2).

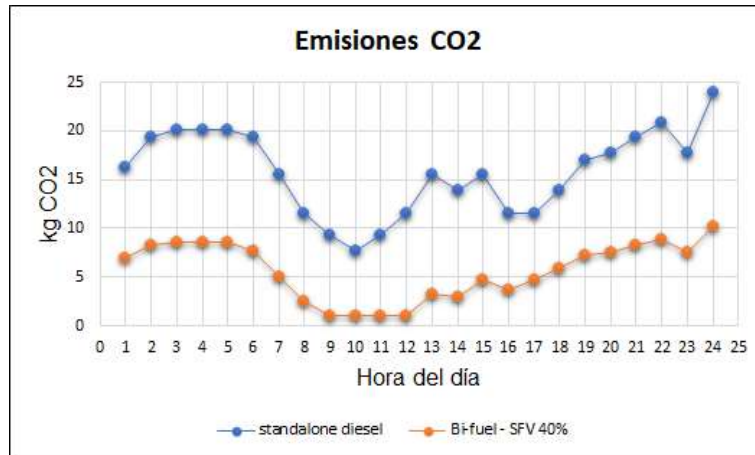
La figura 25 muestra las emisiones (kg CO₂), se reducen en un 64% respecto al primer escenario, se mantiene la relación emisión-carga. Las emisiones que se logran reducir están directamente relacionadas a las doce horas de generación fotovoltaica.

Figura 24. Distribución de costos sistema hibrido SFV 40% carga



Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Emisiones de CO2 para sistema hibrido SFV 40% carga



Fuente: Elaboración propia.

5.5 BI-FUEL, SISTEMA FOTOVOLTAICO CON 60% CARGA (18.54 kW)

El sistema trabaja con dos combustibles, el primario es combustible diésel, el secundario gas de síntesis, tiene como soporte un sistema fotovoltaico que está dimensionado para suplir un 60% de la carga pico, es decir, 18.54 kW.

Tabla 31. Costo nivelado de energía generador bi-fuel

| Energía nivelada kWh | LC Fuel [USD/año] | LC fijo [USD/año] | LC O&M [USD/año] |
|----------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 152634,751 | 25.882,40 | 7092,05223 | 9065,748536 |
| LCOE | 0,275430097 | | USD/kWh |
| | 826,2902908 | | COP/kWh |

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 31 muestra el resultado obtenido para el costo nivelado de energía del generador, la energía generada disminuye, esto se debe a que el sistema fotovoltaico apoya al generador durante cerca de 12 horas, sin embargo, el generador debe seguir entregando un mínimo de energía, equivalente al 15% de carga del generador para cumplir con la demanda de la zona no interconectada y el compresor. El costo nivelado de energía es superior debido a que se está generando menos energía para el mismo periodo de tiempo.

La tabla 32 muestra el costo nivelado de energía del sistema fotovoltaico, la energía entregada durante una vida útil de 10 años del sistema fotovoltaico equivale a un 17.36% de la energía total entregada por el sistema híbrido (ver tabla 33).

Tabla 32. Costo nivelado de energía para el sistema fotovoltaico al 60% carga

| Energía nivelada kWh | LC fijo [USD/año] | LC O&M [USD/año] |
|----------------------|-------------------|------------------|
| 32078,12249 | 5251,917702 | 3620,291223 |
| LCOE | 0,276581303 | [USD/kWh] |
| | 829,7439097 | [COP/kWh] |

Fuente: Elaboración propia.

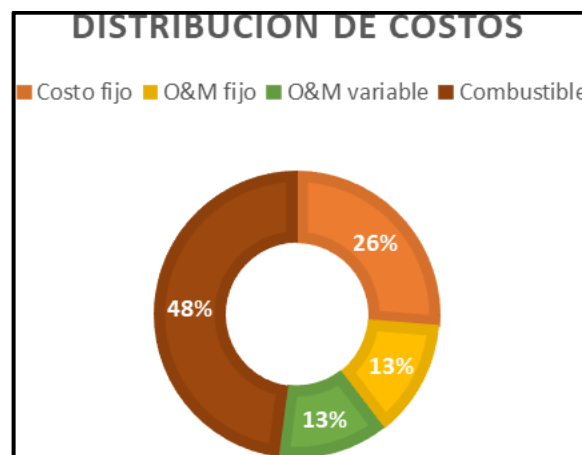
En la tabla 33 se muestra el costo nivelado de energía del sistema híbrido, este es 36.4% más económico respecto al primer escenario.

Tabla 33. Costo nivelado de energía del sistema híbrido para SFV 60% carga

| Energía nivelada total kWh | % Grupo generador | % SFV |
|-----------------------------|-------------------|------------|
| 184712,8735 | 0,826335209 | 0,17366479 |
| LCOE sistema híbrido | 0,275630021 | USD/kWh |
| | 826,8900628 | COP/kWh |

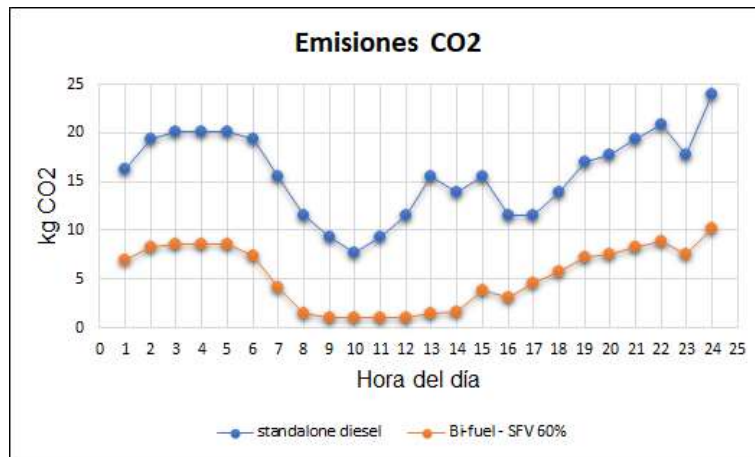
Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Distribución de costos sistema híbrido SFV 60% carga



Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Emisiones de CO2 para sistema hibrido SFV 60% carga



Fuente: Elaboración propia.

La distribución de costos se muestra en la figura 26, los costos de combustible disminuyen a un 48%. La figura 27 muestra las emisiones (kg CO₂), se reducen en un 64% respecto al primer escenario, se mantiene la relación emisión-carga. Las emisiones que se logran reducir están directamente relacionadas a las doce horas de generación fotovoltaica.

6. CONCLUSIONES

Se realizó la simulación del sistema híbrido, para las mismas condiciones de carga (zona no interconectada y compresor). Logrando modelar el proceso de gasificación para la obtención del gas de síntesis, teniendo una reducción de las emisiones contaminantes entre un 57 y 66%.

Para el grupo motor-generador, el consumo de combustible diésel tiene una tasa de remplazo del 61.99% cuando el sistema trabaja en operación bi-fuel, con un consumo de combustible (diésel y gas de síntesis) de 0.4497 kilogramos de combustible por cada kWh generado.

Aunque todos los escenarios diferentes al base (stand alone diésel) presentan costos nivelados de energía entre los 807.95 y 839.58 COP/kWh, el escenario que resulta más viable es el escenario stand alone bi-fuel, ya que cuenta con una reducción de emisiones del 57% y un LCOE de 807.95 COP/kWh.

Al analizar los escenarios en los cuales el sistema fotovoltaico tiene una capacidad de 20,40 y 60% de la carga máxima de la ZNI, las emisiones se reducen 62, 64 y 66% respectivamente, sin embargo, los costos nivelados de energía son superiores en comparación al escenario dos (sistema stand alone bi-fuel).

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar un sistema de control para el mecanismo de alimentación del motor, logrando un comportamiento más cercano al real de los sistemas high fuel Operation (dual fuel). De esta manera se calcula la tasa de remplazo obteniendo resultados más precisos.

Para abordar con mayor profundidad el sistema se recomienda modelar y dimensionar el gasificador de biomasa en estado dinámico junto con el grupo motor generador.

También se recomienda integrar el sistema como tipo micro red para futuros trabajos, es decir, teniendo en cuenta, cableado, transformadores, generación, almacenamiento, cargas, interruptores, protecciones y sistema de control para analizar el comportamiento.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] (). Instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para zonas no interconectadas. Available: www.ipse.gov.co/ipse/quienes-somos.
- [2] I. USAENE LLC, "Determinación de Inversiones y Gastos de Administración, Operación y Mantenimiento para la actividad de Generación en Zonas No Interconectadas con Plantas Térmicas," "", 2013.
- [3] IPSE-GI-F06, "Informe mensual de telemetría," .
- [4] Z. A. Zainal *et al*, "Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials," *Energy Conversion and Management*, vol. 42, (12), pp. 1499-1515, 2001. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890400000789>. DOI: 10.1016/S0196-8904(00)00078-9.
- [5] S. Bhaduri *et al*, "HCCI engine operated with unscrubbed biomass syngas," *Fuel Processing Technology*, 2017. Available: <http://hdl.handle.net/2078.1/183119>. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.10.011.
- [6] H.N. Gupta, *H.N. Gupta Fundamentals of Internal Combustion Engines Prentice Hall of India Pvt.Ltd *; 2006.
- [7] M. David Burghardt, James A. Harbach, *Engineering Thermodynamics HarperCollins College*. 1993.
- [8] M. David Burghardt, *Ingeniería Termodinámica*. (segunda ed.) 1984.
- [9] J. D. Hernández Morales, "Evaluación Técnica Y Financiera Para La Implementación De Un Sistema Solar Fotovoltaico En El Servicio Nacional De Aprendizaje Sena, Sede Floridablanca." , Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2019.
- [10] UPME, "Costos indicativos de generación eléctrica en Colombia," 2003.
- [11] Academia Colombia De Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), "factores de emisión de los combustibles colombianos," .
- [12] National Renewable Energy Laboratory, "Cost and performance data for power generation technologies," 2012.

- [13] (). *Comisión de regulación de energía y gas - Zonas no interconectadas*. Available: <http://www.creg.gov.co/index.php/es/sectores/energia/zni-energia>.
- [14] Ernesto Torres Quintero, "Investigación en pequeñas centrales en Colombia," .
- [15] Prabir Basu, *Biomass Gasification*. 2010.
- [16] M. C. Sáiz Manzanares, "Unidad 1," 2018.
- [17] T. Khatib *et al*, "Optimal sizing of building integrated hybrid PV/diesel generator system for zero load rejection for Malaysia," *Energy & Buildings*, vol. 43, (12), pp. 3430-3435, 2011. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811003963>. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.09.008.
- [18] K. K. C. K. Perera *et al*, "Converting existing Internal Combustion Generator (ICG) systems into HESs in standalone applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 74, pp. 237-248, 2013. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413002823>. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.05.022.
- [19] D. Tsuanyo *et al*, "Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications," *Energy*, vol. 86, pp. 152-163, 2015. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215004776>. DOI: 10.1016/j.energy.2015.03.128.
- [20] A. L. Galindo Noguera *et al*, "Optimum design of a hybrid diesel-ORC / photovoltaic system using PSO: Case study for the city of Cujubim, Brazil," *Energy*, vol. 142, pp. 33-45, 2018. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421731681X>. DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.012.
- [21] Superintendencia de servicios públicos y domiciliarios, "Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica," 2018.
- [22] Departamento Nacional de Planeación, "CONPES 3805," *Documento*, "May 10, ", 2014.
- [23] Ministerio de Minas y Energía, "Decreto 1623 2015," "Aug 11, ", 2015.
- [24] Rama legislativa, "Ley 1819 2016," *Diario Oficial*, "Dec 29, ", 2016.
- [25] Ministerio de Minas y Energía, "Decreto 348 2017," "Mar 01, ", 2017.

- [26] Ministerio de agricultura y desarrollo rural, "Decreto 893 2017," "May 28, ", 2017.
- [27] Ministerio de hacienda y crédito público, "Decreto 1915 2017," "Nov 22, ", 2017.
- [28] Ministerio de hacienda y crédito público, "Decreto 413 2018," "Mar 02, ", 2018.
- [29] Ministerio de Minas y Energía and Comisión de Regulación de Energía y Gas, "CREG 027 2014," 2014.
- [30] Ministerio de Minas y Energía and Comisión de Regulación de Energía y Gas, "CREG 038 2014," "Mar 20, ", 2014.
- [31] Ministerio de Minas y Energía and Comisión de Regulación de Energía y Gas, "CREG 076 2016," "May 25, ", 2016.
- [32] Ministerio de Minas y Energía and Comisión de Regulación de Energía y Gas, "CREG 154 2017," "Nov 10, ", 2015.
- [33] Ministerio de Minas y Energía and Comisión de Regulación de Energía y Gas, "CREG 038 2018," "May 04, ", 2018.
- [34] Ministerio de Minas y Energía and Comisión de Regulación de Energía y Gas, "CREG 087 2018," "Aug 02, ", 2018.
- [35] Ministerio de Minas y Energía, "Resolución 180961," 2004.
- [36] Aponte and Gordillo, "Wild cane potential to produce gaseous fuels via air-steam thermal gasification," 2013.
- [37] John R. Howell, Richard O. Buckius, *Principios De Termodinámica Para Ingeniería*. McGraw Hill, 1990.
- [38] NIST. (). *Dodecane*, National institute of Standars and Technology. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C112403&Mask=200>.
- [39] Universidad Nacional de Colombia and Grupo de Investigación en Combustibles Alternativos , Energía, y Protección del Medio Ambiente, "Equivalencia Energética, GNV-Diésel. Anexo A,".
- [40] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, "Photovoltaics report," *Report*, 2019.
- [41] UPME, "Proyección de precios de los energéticos para generación eléctrica," 2016.

- [43] FINAGRO, "Producción de caña," .
- [44] S. Pérez Súa, "Influencia de los parámetros de ajuste de un sistema "dual-fuel" sobre la operación y el desempeño de un motor diésel usado para generación en un campo petrolero," 2015.
- [45] C. A. Rinaldini *et al*, "Modeling and optimization of industrial internal combustion engines running on Diesel/syngas blends," *Energy Conversion and Management*, vol. 182, pp. 89-94, 2019. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418314158>. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.12.070.
- [46] N. J. R. Ballesteros, "Análisis exegético de un motor de combustión interna Diésel." Unpublished, 2013.
- [47] W. N. W. Mansor, "Dual fuel engine combustion and emissions an experimental investigation coupled with computer simulation," UFZ, Leipzig, 2014.
- [48] E. A. N. Anaya and J. S. G. Quintero, "Evaluación del desempeño de diferentes configuraciones para un sistema de generación de potencia con base en motor de combustión interna integrado a un sistema de gasificación de biomasa." 2017.
- [48] J. Lasocki, M. Bednarski, and M. Sikora, "Simulation of ammonia combustion in dual-fuel compression-ignition engine," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 214, p. 12081, 2019.
- [49] R. Budhathoki, "Three zone modeling of downdraft biomass gasification: equilibrium and finite kinetic approach." 2013.
- [50] J. K. Ratnadhariya and S. A. Channiwala, "Three zone equilibrium and kinetic free modeling of biomass gasifier – a novel approach," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1050–1058, 2009.
- [51] S. Vakalis, C. Caligiuri, K. Moustakas, D. Malamis, M. Renzi, and M. Baratieri, "Modeling the emissions of a dual fuel engine coupled with a biomass gasifier-supplementing the Wiebe function," *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 25, no. 36, pp. 35866–35873, 2018.
- [52] M. Abou Al-Sood, M. Ahmed, and Y. Abdel-Rahim, "Rapid thermodynamic simulation model for optimum performance of a four-stroke, direct-injection, and variable-compression-ratio diesel engine," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–13, 2012.
- [53] F. Königsson, *On combustion in the CNG-diesel dual fuel engine*, vol. 2014:08. Stockholm: Industrial Engineering and Management KTH Royal Institute of Technology Stockholm, 2014.

- [54] F. O. C. González, “avaliação do desempenho de um sistema integrado motor ciclo otto/gaseificador co-corrente utilizando modelagem matemática.” 2010.
- [55] M. Sadeghi, A. Chitsaz, S. M. S. Mahmoudi, and M. A. Rosen, “Thermoeconomic optimization using an evolutionary algorithm of a trigeneration system driven by a solid oxide fuel cell,” *Energy*, vol. 89, pp. 191–204, 2015.
- [56] N. D. Kaushika, A. Mishra, and A. K. Rai, *Solar Photovoltaics: Technology, System Design, Reliability and Viability*. Cham: Springer, 2018.

ANEXOS

ANEXO 1

A continuación, se muestran las ecuaciones generales para el desarrollo del modelo matemático del sistema fotovoltaico. Todas las ecuaciones fueron recuperadas del trabajo realizado por Juan David Hernández.[9]

Razón de radiación solar absorbida efectiva

$$\frac{S}{S_{ref}} = M \left(\frac{G_b}{G_{ref}} R_b K_{\tau\alpha,b} + \frac{G_d}{G_{ref}} K_{\tau\alpha,d} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \frac{G}{G_{ref}} \rho K_{\tau\alpha,g} \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \right) \quad (1)$$

Donde:

- M : Masa de aire modificada.
- G_b : Irradiancia directa.
- G_{ref} : Irradiancia solar de referencia, $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.
- R_b : Razón entre la radiación directa en superficies inclinadas y la radiación directa en superficies horizontales.
- $K_{\tau\alpha,b}$: Modificador del ángulo de incidencia a un ángulo de incidencia directo.
- G_d : Irradiancia difusa.
- $K_{\tau\alpha,d}$: Modificador del ángulo de incidencia a un ángulo de incidencia difuso.
- β : Ángulo de inclinación del panel solar.
- G : Irradiancia global (directa más difusa).
- ρ : Reflectancia, para el suelo es 0,2.
- $K_{\tau\alpha,g}$: Modificador del ángulo de incidencia a un ángulo de incidencia provenientes del suelo.

A continuación, se muestra como hallar la masa de aire modificada[9]:

$$M = \sum_0^4 a_i (AM)^i \quad (2)$$

Donde:

- a_i : Constantes de la ecuación.
- AM : Masa de aire.

Por otra parte, la masa de aire se calcula de la siguiente manera[9]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

Donde:

- θ_z : Ángulo zenit.

El ángulo zenit se puede hallar con la siguiente expresión[9]:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (4)$$

Donde:

- ϕ : Latitud.
- δ : Declinación solar.
- ω : Ángulo horario.
-

TEMPERATURA DE LA CELDA EN EL PANEL

$$\frac{T_c - T_a}{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}} = \frac{G_T}{G_{NOCT}} \frac{9,5}{(5,7 + 3,8v)} \left[1 - \frac{\eta_c}{(\tau\alpha)} \right] \quad (55)$$

Donde:

- T_c : Temperatura de la celda.
- T_a : Temperatura del ambiente.
- G_T : Radiación en un plano inclinado.
- T_{NOCT} : Temperatura de la celda a condiciones NOCT, 45 – 49 [°C].
- $T_{a,NOCT}$: Temperatura del ambiente a condiciones NOCT, 20 [°C].
- G_{NOCT} : Radiación incidente a condiciones NOCT, 800 $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.
- v : Velocidad del viento en m/s .
- η_c : Eficiencia de la Celda.
- $\tau\alpha$: Transmitancia-absorbencia, 0,9.

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA CELDA O UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Para hallar la corriente de salida, se escribe la siguiente expresión[9]:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (66)$$

Donde:

- I_L : Corriente generada por la incidencia de radiación solar.
- I_D : Corriente que pasa por el diodo.
- I_{sh} : Corriente que pasa por la resistencia Shunt.

Donde:

- I_o : Corriente de saturación del diodo.
- V_D : Voltaje en el diodo.
- n : Factor de idealidad el cual puede tener un valor de 1 para diodos ideales y entre 1 y 2 para diodos reales.
- V_T : Constante que depende de la temperatura del diodo.

Con lo anterior, la ecuación principal del circuito equivalente queda de la siguiente manera[9]:

$$I = I_L - I_o \left(e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

En esta ecuación se encuentran los siguientes 5 parámetros[9]:

- I_L : Corriente generada por la incidencia de radiación solar.
- I_o : Corriente de saturación del diodo.
- a : Variable dependiente del factor de idealidad y la temperatura de la celda.
- R_s : Resistencia serie del circuito equivalente.
- R_{sh} : Resistencia shunt del circuito equivalente.

Dichos parámetros se pueden hallar por medio de los datos de referencia del panel solar y definiendo ciertas condiciones para conseguir un sistema de 5 ecuaciones con 5 incógnitas. Los datos necesarios del panel solar son los siguientes[9]:

- V_{oc} : Voltaje de circuito abierto.
- V_{mp} : Voltaje de máxima potencia.
- I_{sc} : Corriente de corto circuito.
- I_{mp} : Corriente de máxima Potencia.
- $\mu_{V_{oc}}$: Coeficiente de temperatura para el voltaje de circuito abierto (muestra como el voltaje es afectado por la temperatura).
- $\mu_{I_{sc}}$: Coeficiente de temperatura para la corriente de corto circuito (muestra como la corriente es afectada por la temperatura).

Nota: estos datos de referencia se toman a una irradiancia de $1.000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, temperatura de la celda de $25 [^{\circ}C]$ y una masa de aire igual a $1,5 [Adm.]$.

ANEXO 2

Tablas de cálculo para el LCOE (Escenario 1, Sistema standalone diésel)

| Año | Carga | Módulo | Carga (MW) | Datos de planta | | | | | Costos | | | | | Energía | | | | | Emissiones | | | | | |
|-----|-------|--------|------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | | Capacidad (MW) | Horas de operación (h/año) | Factor de capacidad (%) | Costo de inversión (USD/kWh) | Costo de operación (USD/kWh) | Costo de combustible (USD/kWh) | Costo de mantenimiento (USD/kWh) | Costo de depreciación (USD/kWh) | Costo de financiamiento (USD/kWh) | Costo total (USD/kWh) | Energía generada (MWh/año) | Energía no generada (MWh/año) | Costo de combustible (USD/año) | Costo de operación (USD/año) | Costo de mantenimiento (USD/año) | Costo de depreciación (USD/año) | Costo de financiamiento (USD/año) | Costo total (USD/año) | CO2 (t/año) | NOx (t/año) | SO2 (t/año) |
| 1 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 2 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 3 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 4 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 5 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 6 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 7 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 8 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 9 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 10 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 11 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 12 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 13 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 14 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 15 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 16 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 17 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 18 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 19 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 20 | 100% | 100% | 100 | 100 | 8760 | 100 | 10000000 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |

Fuente: Elaboración propia.

Tablas de cálculo para el LCOE (Escenario 3, parte bi-fuel)

| COSTOS DE INVERSIÓN | | | | COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO | | | | | | | | | | COSTOS DE FUEL | | | COSTOS DE GENERACIÓN | | | | | COSTOS DE DISTRIBUCIÓN | | | COSTOS DE TRANSFORMACIÓN | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------|----------|--------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|
| Planta | Equipo | Material | Mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | Costo de mano de obra | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 47 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 48 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 49 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tablas de cálculo para el LCOE (Escenario 4, parte bi-fuel)

| Código | Estrategia | Parámetros de entrada | | | | Cálculos intermedios | | | | | | | | | | Resultados finales | | | |
|--------|------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Parámetro 1 | Parámetro 2 | Parámetro 3 | Parámetro 4 | Variable 1 | Variable 2 | Variable 3 | Variable 4 | Variable 5 | Variable 6 | Variable 7 | Variable 8 | Variable 9 | Variable 10 | Variable 11 | Variable 12 | Variable 13 | Variable 14 |
| 1 | 1.1 | 1.1.1 | 1.1.2 | 1.1.3 | 1.1.4 | 1.1.5 | 1.1.6 | 1.1.7 | 1.1.8 | 1.1.9 | 1.1.10 | 1.1.11 | 1.1.12 | 1.1.13 | 1.1.14 | 1.1.15 | 1.1.16 | 1.1.17 | 1.1.18 |
| | 1.2 | 1.2.1 | 1.2.2 | 1.2.3 | 1.2.4 | 1.2.5 | 1.2.6 | 1.2.7 | 1.2.8 | 1.2.9 | 1.2.10 | 1.2.11 | 1.2.12 | 1.2.13 | 1.2.14 | 1.2.15 | 1.2.16 | 1.2.17 | 1.2.18 |
| | 1.3 | 1.3.1 | 1.3.2 | 1.3.3 | 1.3.4 | 1.3.5 | 1.3.6 | 1.3.7 | 1.3.8 | 1.3.9 | 1.3.10 | 1.3.11 | 1.3.12 | 1.3.13 | 1.3.14 | 1.3.15 | 1.3.16 | 1.3.17 | 1.3.18 |
| | 1.4 | 1.4.1 | 1.4.2 | 1.4.3 | 1.4.4 | 1.4.5 | 1.4.6 | 1.4.7 | 1.4.8 | 1.4.9 | 1.4.10 | 1.4.11 | 1.4.12 | 1.4.13 | 1.4.14 | 1.4.15 | 1.4.16 | 1.4.17 | 1.4.18 |
| | 1.5 | 1.5.1 | 1.5.2 | 1.5.3 | 1.5.4 | 1.5.5 | 1.5.6 | 1.5.7 | 1.5.8 | 1.5.9 | 1.5.10 | 1.5.11 | 1.5.12 | 1.5.13 | 1.5.14 | 1.5.15 | 1.5.16 | 1.5.17 | 1.5.18 |
| | 1.6 | 1.6.1 | 1.6.2 | 1.6.3 | 1.6.4 | 1.6.5 | 1.6.6 | 1.6.7 | 1.6.8 | 1.6.9 | 1.6.10 | 1.6.11 | 1.6.12 | 1.6.13 | 1.6.14 | 1.6.15 | 1.6.16 | 1.6.17 | 1.6.18 |
| | 1.7 | 1.7.1 | 1.7.2 | 1.7.3 | 1.7.4 | 1.7.5 | 1.7.6 | 1.7.7 | 1.7.8 | 1.7.9 | 1.7.10 | 1.7.11 | 1.7.12 | 1.7.13 | 1.7.14 | 1.7.15 | 1.7.16 | 1.7.17 | 1.7.18 |
| | 1.8 | 1.8.1 | 1.8.2 | 1.8.3 | 1.8.4 | 1.8.5 | 1.8.6 | 1.8.7 | 1.8.8 | 1.8.9 | 1.8.10 | 1.8.11 | 1.8.12 | 1.8.13 | 1.8.14 | 1.8.15 | 1.8.16 | 1.8.17 | 1.8.18 |
| | 1.9 | 1.9.1 | 1.9.2 | 1.9.3 | 1.9.4 | 1.9.5 | 1.9.6 | 1.9.7 | 1.9.8 | 1.9.9 | 1.9.10 | 1.9.11 | 1.9.12 | 1.9.13 | 1.9.14 | 1.9.15 | 1.9.16 | 1.9.17 | 1.9.18 |
| | 1.10 | 1.10.1 | 1.10.2 | 1.10.3 | 1.10.4 | 1.10.5 | 1.10.6 | 1.10.7 | 1.10.8 | 1.10.9 | 1.10.10 | 1.10.11 | 1.10.12 | 1.10.13 | 1.10.14 | 1.10.15 | 1.10.16 | 1.10.17 | 1.10.18 |

Fuente: Elaboración propia.

Tablas de cálculo para el LCOE (Escenario 4, parte sistema fotovoltaico 12.5 kW)

| Módulo | DATOS GENERALES | | | | | | | | | | EJEMPLO | | | MÓDULO | | | |
|--------|-----------------|------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Forma | Modelo año | Usos (W/m²) | Material | Material | Material | Material | Material | Material | Material | Material | Material | Material | Material | Material | Material | Material |
| 1 | 1 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 2 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 3 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 4 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 6 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 7 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 8 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 9 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 2 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 3 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 4 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 6 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 7 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 8 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 9 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 2 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 3 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 4 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 6 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 7 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 8 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 9 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 2 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 3 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 4 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 6 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 7 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 8 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 9 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 2 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 3 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 4 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 5 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 6 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 7 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 8 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 9 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 2019 | 100 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Fuente: Elaboración propia.

Tablas de cálculo para el LCOE (Escenario 5, parte bi-fuel)

| ID | Nombre | Parámetros de Entrada | | | | | | | | | | Cálculos Intermedios | | | | | | | | | | Resultados Finales | | | | | | |
|----|--------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| 1 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 3 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 4 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 5 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 6 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 7 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 8 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 9 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 10 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Fuente: Elaboración propia.

Tablas de cálculo para el LCOE (Escenario 5, parte sistema fotovoltaico 18.54 kW)

| Módulo | Código | Marca | Modelo | Características técnicas | | | | Especificaciones | | | Condiciones de operación | | | Datos de rendimiento | | | | |
|--------|--------|-------|----------|--------------------------|--------------|-----------|-----------|------------------|--------|------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | | | | Longitud (mm) | Anchura (mm) | Área (m²) | Peso (kg) | Material | Color | Temperatura (°C) | Humedad (%) | Velocidad del viento (m/s) | Temperatura ambiente (°C) | Temperatura solar (°C) | Temperatura de la célula (°C) | Temperatura del módulo (°C) | Temperatura del aire (°C) | Temperatura del suelo (°C) |
| 1 | 010001 | 001 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 010002 | 002 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 010003 | 003 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 010004 | 004 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 010005 | 005 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 010006 | 006 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 010007 | 007 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 010008 | 008 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 010009 | 009 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 010010 | 010 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 2 | 020001 | 001 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 020002 | 002 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 020003 | 003 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 020004 | 004 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 020005 | 005 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 020006 | 006 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 020007 | 007 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 020008 | 008 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 020009 | 009 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 020010 | 010 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 3 | 030001 | 001 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 030002 | 002 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 030003 | 003 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 030004 | 004 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 030005 | 005 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 030006 | 006 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 030007 | 007 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 030008 | 008 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 030009 | 009 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| | 030010 | 010 | 18.54 kW | 18540 | 1000 | 18.54 | 1000 | Aluminio | Blanco | 25 | 100 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |

Fuente: Elaboración propia.

Potencia consumida por el compresor

| HORA | POTENCIA [Kw] | | | |
|------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Bi-fuel | Bi-fuel - SFV 20% | Bi-fuel - SFV 40% | Bi-fuel - SFV 60% |
| 1 | 0,9745 | 0,9745 | 0,9745 | 0,9745 |
| 2 | 0,8167 | 0,8167 | 0,8167 | 0,8167 |
| 3 | 0,7773 | 0,7773 | 0,7773 | 0,7773 |
| 4 | 0,7773 | 0,7773 | 0,7773 | 0,7773 |
| 5 | 0,7773 | 0,7773 | 0,7773 | 0,7773 |
| 6 | 0,8167 | 0,8474 | 0,8781 | 0,9080 |
| 7 | 1,0139 | 1,1080 | 1,2076 | 1,3021 |
| 8 | 1,2111 | 1,3520 | 1,4930 | 1,6305 |
| 9 | 1,3294 | 1,5345 | 1,6725 | 1,6725 |
| 10 | 1,4083 | 1,6678 | 1,6725 | 1,6725 |
| 11 | 1,3294 | 1,6027 | 1,6725 | 1,6725 |
| 12 | 1,2111 | 1,4606 | 1,6725 | 1,6725 |
| 13 | 1,0139 | 1,2170 | 1,4201 | 1,6182 |
| 14 | 1,0928 | 1,2679 | 1,4430 | 1,6139 |
| 15 | 1,0139 | 1,1264 | 1,2388 | 1,3485 |
| 16 | 1,2211 | 1,2821 | 1,3532 | 1,4225 |
| 17 | 1,2111 | 1,2234 | 1,2357 | 1,2477 |
| 18 | 1,0928 | 1,0972 | 1,1016 | 1,1059 |
| 19 | 0,9350 | 0,9350 | 0,9350 | 0,9350 |
| 20 | 0,8956 | 0,8956 | 0,8956 | 0,8956 |
| 21 | 0,8167 | 0,8167 | 0,8167 | 0,8167 |
| 22 | 0,7379 | 0,7379 | 0,7379 | 0,7379 |
| 23 | 0,8956 | 0,8956 | 0,8956 | 0,8956 |
| 24 | 0,5801 | 0,5801 | 0,5801 | 0,5801 |

Fuente: Elaboración propia.

Costos del compresor

| HORA | COSTO INVERSION [USD] | | | |
|---------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Bi-fuel | Bi-fuel - SFV 20% | Bi-fuel - SFV 40% | Bi-fuel - SFV 60% |
| 1 | 1490,4982 | 1490,4982 | 1490,4982 | 1490,4982 |
| 2 | 1324,1267 | 1324,1267 | 1324,1267 | 1324,1267 |
| 3 | 1280,9791 | 1280,9791 | 1280,9791 | 1280,9791 |
| 4 | 1280,9791 | 1280,9791 | 1280,9791 | 1280,9791 |
| 5 | 1280,9791 | 1280,9791 | 1280,9791 | 1280,9791 |
| 6 | 1324,1267 | 1357,2720 | 1390,0234 | 1421,5599 |
| 7 | 1530,6094 | 1624,3861 | 1720,8227 | 1809,9198 |
| 8 | 1724,1627 | 1856,1028 | 1983,6621 | 2104,2754 |
| 9 | 1835,2572 | 2020,4377 | 2140,4394 | 2140,4394 |
| 10 | 1907,5389 | 2136,4075 | 2140,4394 | 2140,4394 |
| 11 | 1835,2572 | 2080,1691 | 2140,4394 | 2140,4394 |
| 12 | 1724,1627 | 1954,7157 | 2140,4394 | 2140,4394 |
| 13 | 1530,6094 | 1729,7858 | 1918,2328 | 2093,6265 |
| 14 | 1609,4219 | 1777,9297 | 1938,9030 | 2089,8974 |
| 15 | 1530,6094 | 1642,4105 | 1750,4852 | 1852,8820 |
| 16 | 1733,6881 | 1791,2463 | 1857,2064 | 1920,4043 |
| 17 | 1724,1627 | 1735,8753 | 1747,5491 | 1758,9012 |
| 18 | 1609,4219 | 1613,7606 | 1618,0937 | 1622,3228 |
| 19 | 1449,7443 | 1449,7443 | 1449,7443 | 1449,7443 |
| 20 | 1408,5234 | 1408,5234 | 1408,5234 | 1408,5234 |
| 21 | 1324,1267 | 1324,1267 | 1324,1267 | 1324,1267 |
| 22 | 1237,1033 | 1237,1033 | 1237,1033 | 1237,1033 |
| 23 | 1408,5234 | 1408,5234 | 1408,5234 | 1408,5234 |
| 24 | 1052,9180 | 1052,9180 | 1052,9180 | 1052,9180 |
| Valor máximo | 1907,5389 | 2136,4075 | 2140,4394 | 2140,4394 |

Fuente: Elaboración propia.