

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

Leidy Bocanegra Galeano  
Laura Mojica Castellanos

Director: M. Sc. Carlos A. Díaz González

FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA INGENIERÍA EN ENERGÍA



unab

El presente trabajo de grado se realizó como requisito para optar al título de ingeniera en energía en el cual se planteo un problema de investigación enfocado a sistemas de gasificación a partir de biomasa como alternativa para las zonas no interconectadas de Colombia. Se escogió este recurso debido a su alta producción en la zona.

Se propuso realizar un estudio exergoambiental con el fin de analizar los impactos ambientales asociados a la energía útil en el sistema planteado. Se desarrollan simulaciones con el propósito de conocer el comportamiento del sistema. Posteriormente, se realizan balances energéticos y exergéticos para establecer los indicadores con los cuales se evalúa el rendimiento del sistema. Por último, se determinan los costos ambientales relacionados con la generación de energía eléctrica.

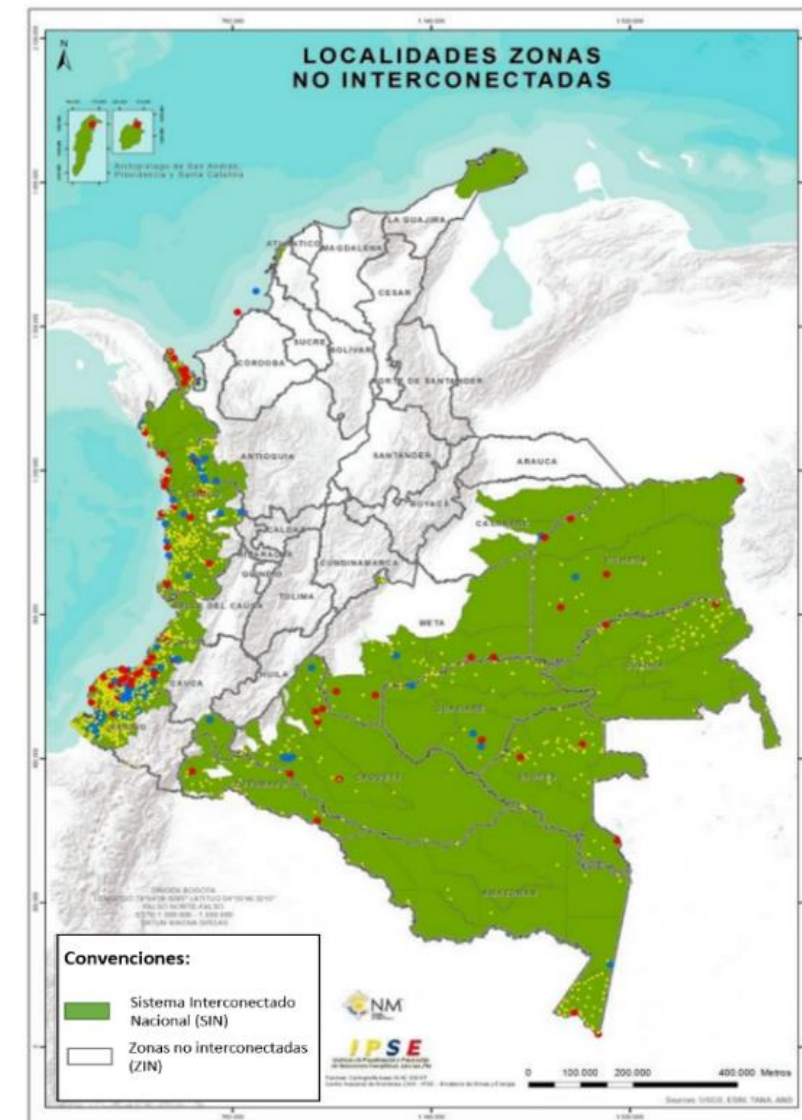
El 52% del territorio Colombiano no hace parte del Sistema Interconectado Nacional (SIN), debido a:

- Diversidad geográfica
- Zonas selváticas y de difícil acceso
- Conflicto armado

Por lo que han adoptado, en su mayoría, grupos electrógenos diésel como alternativa de abastecimiento de energía eléctrica en estas localidades. Pero no es una solución recomendable ya que tienen:

- Altas tasas de falla
- Elevados costos de O&M
- Daño medioambiental

Esto imposibilita que las condiciones de desarrollo de estas regiones mejoren a niveles que les permitan superar el umbral de pobreza.



## OBJETIVO GENERAL

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

## OBJETIVO ESPECÍFICOS

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

**DESCRIPCIÓN DEL  
OBJETO DE ESTUDIO**

**01**

**02**

**PARÁMETROS DE  
FUNCIONAMIENTO  
PARA LOS PRINCIPALES  
EQUIPOS DEL SISTEMA.**

**ANÁLISIS EXERGÉTICO  
E INDICADORES DE  
DESEMPEÑO**

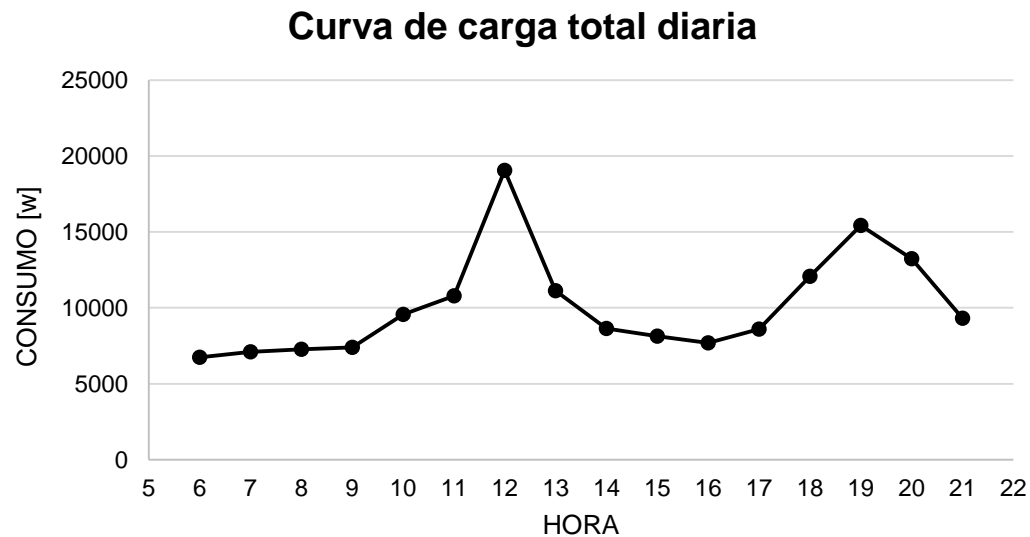
**04**

**03**

**SIMULACIÓN DEL  
SISTEMA**

## 1. DESCRIPCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO

### 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA



El caso estudio se desarrolla teniendo en cuenta la demanda total diaria de la localidad Cooperativa ubicada en el noroeste de la cabecera urbana del municipio de Mapiripán, Meta.

### 1.2 EVALUACIÓN DE LA BIOMASA

❖ Análisis Próximo Arundo Donax.

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

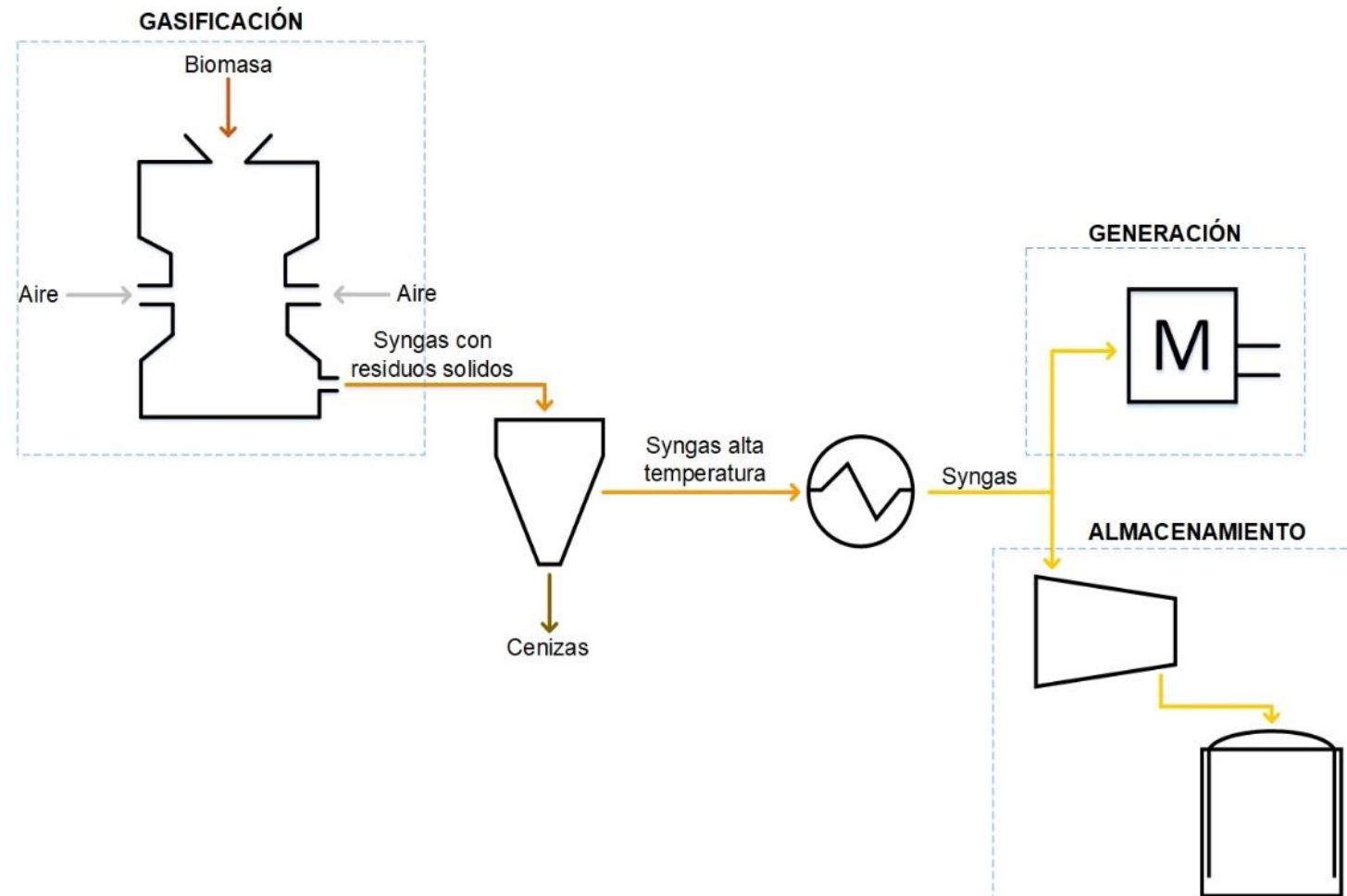
❖ Análisis ultimo Arundo Donax

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

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

## 1. DESCRIPCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO

### 1.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA



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

### 2.1 GASIFICACIÓN

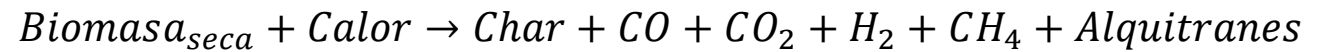
Especificaciones gasificador Downdraft KX-50S		
Consumo de material de alimentación	25	kg/h
Gas producido	50	m <sup>3</sup> /h
Poder calorífico del gas	4600 - 5200	kJ/h
Eficiencia	72%	-
Generación de energía	20	kW
Tamaño de la materia prima (longitud)	< 30	mm
Humedad de la materia prima	<20%	-

- ❖ Relación Aire-Combustible

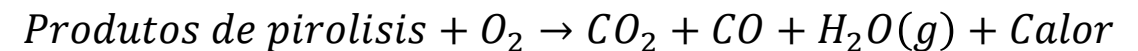
$$A/C = \frac{a_{real} * 4.76 * 28.84}{MM_{Biomasa}}$$

$$A/C = 1.332$$

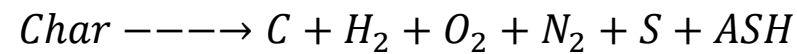
- ❖ Pirolisis



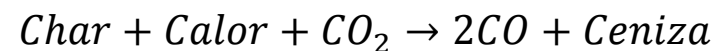
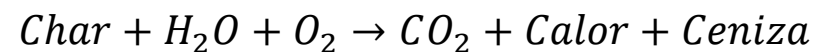
- ❖ Oxidación



- ❖ Descomposición del Char



- ❖ Reducción





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

### 2.1 MOTOR

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

- ❖ Relación Aire-Combustible

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

$$A/C = 1.53$$

#### Parámetros de Funcionamiento

- ❖ Flujo de masa admitida
- ❖ Relación aire-combustible

#### Parámetros Indicados

- ❖ Estados termodinámicos teóricos
- ❖ Trabajo indicado
- ❖ Potencia indicada
- ❖ Presión media Indicada

#### Parámetros Efectivos

- ❖ Par efectivo
- ❖ Trabajo efectivo
- ❖ Potencia efectiva
- ❖ Presión media efectiva
- ❖ Estados termodinámicos reales





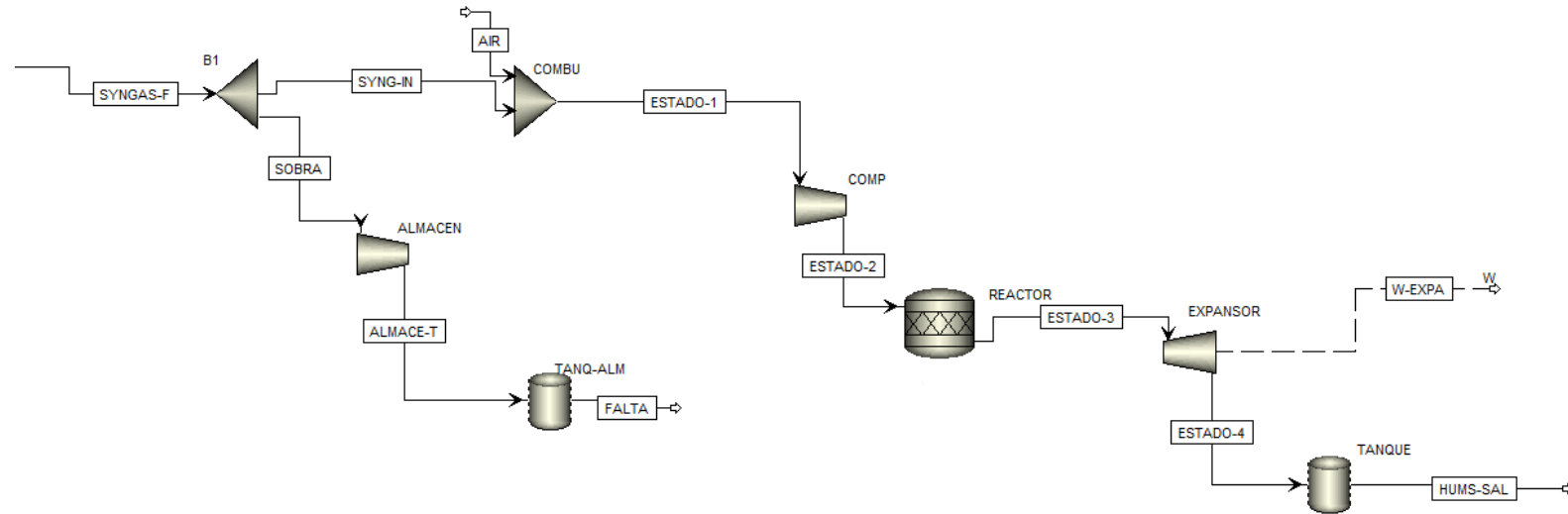
## 3.1.2 MOTOR-GENERADOR.

### Características del Syngas

Temperatura	873	K
Presión	101,325	kPa
Densidad	0,282044	kg/m <sup>3</sup>
PCI	7579	kJ/kg
Cp	0.3143	kJ/kg*K
Cv	0.2297	kJ/kg*K
Masa Molar	19,4	kg/kmol
Flujo másico	0,0130496	kg/seg
Flujo volumétrico	54,265898	m <sup>3</sup> /seg

### Compuesto Fracción Molar

O <sub>2</sub>	0,033993
N <sub>2</sub>	0,443054
CO	0,053561
H <sub>2</sub>	0,350527
CO <sub>2</sub>	0,059711
H <sub>2</sub> S	0,006702
CH <sub>4</sub>	0,052452



### ❖ Condiciones de entrada al Motor-Generador

Temperatura	298	K
Presión	101,325	kPa
A/C <sub>MOTOR</sub>	1,5	-

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

## 3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA

### 3.2 SIMAPRO

Volumen de control del sistema



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

#### 3.2.1 GASIFICADOR.

$$m_{Biomasa1[kW]} = \frac{\dot{m}_{Biomasa22[kW]}}{\dot{V}_{Syngas_{Total}}}$$

$$V_{Aire\ Gasificador1[kW]} = \frac{\dot{V}_{Aire\ Gasificador22[kW]}}{\dot{V}_{Syngas_{Total}}}$$

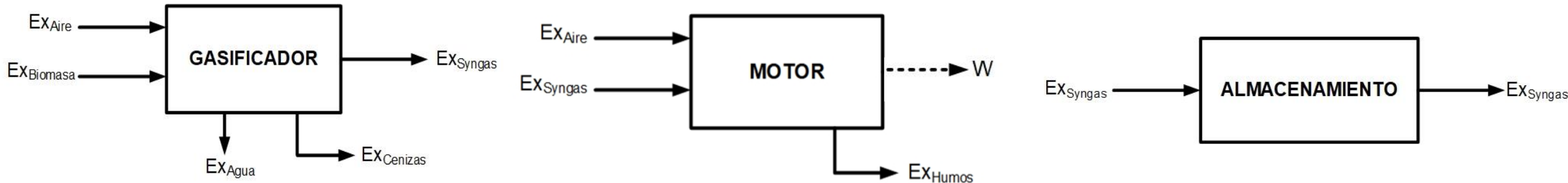
#### 3.2.2 MOTOR-GENERADOR.

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

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

## 4. ANÁLISIS EXERGOAMBIENTAL E INDICADORES DE DESEMPEÑO

### 4.1 INDICADORES DE DESEMPEÑO



Calculo de entalpías y entropías

Calculo de exergías químicas

Obtención de exergía física de las Corrientes

Irreversibilidades

$$\eta_i = \zeta_{pi} * I_i$$

**Eficiencias energética y exergéticas**

$$S_{i(T,P)} = \sum S_{Compuesto} * Y_{Compuesto}$$

Eficiencias energéticas

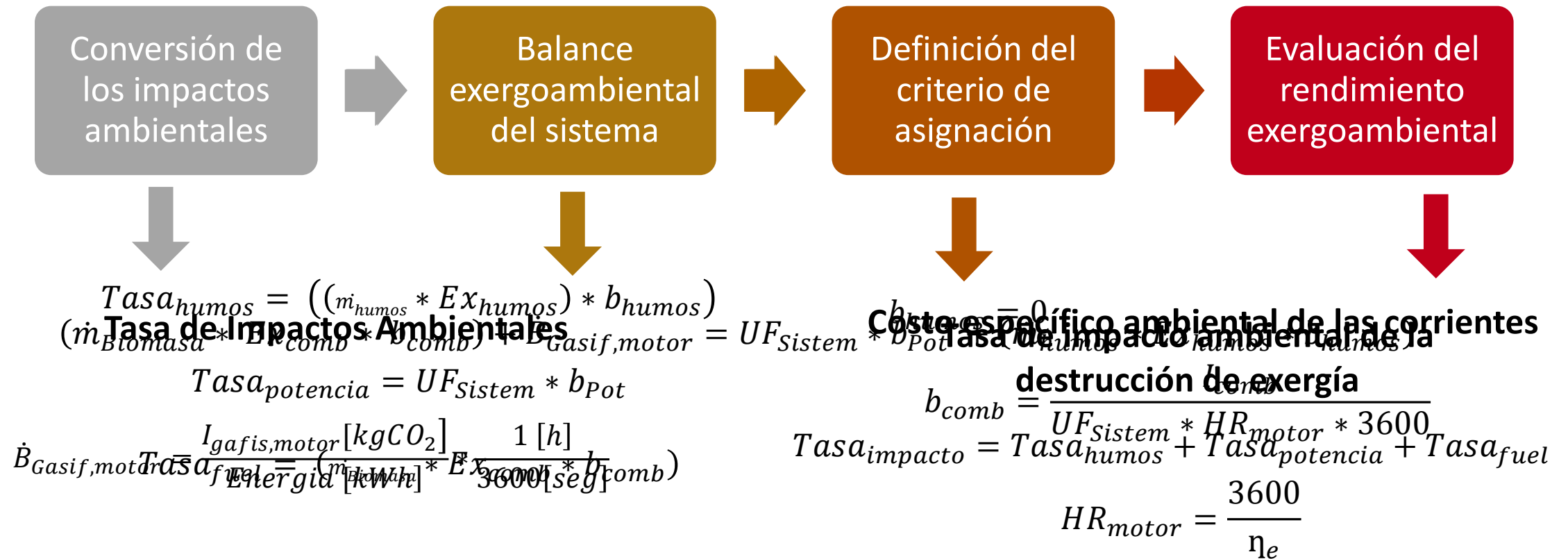
$$\eta_e = \frac{\sum \dot{m}_{i_{productos}} * h_{i_{productos}}}{\sum \dot{m}_{i_{sumintro}} * h_{i_{sumintro}}}$$

Eficiencias exergéticas

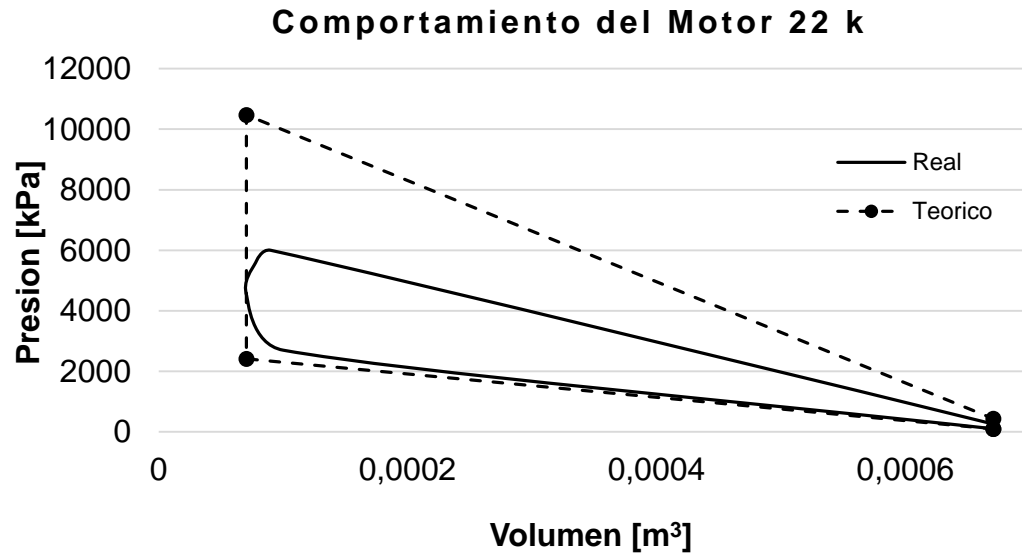
$$\eta_{Ex} = \left( \frac{\sum Ex_{i_{salida}}}{\sum Ex_{i_{entrada}}} \right)$$

## 4. ANÁLISIS EXERGOAMBIENTAL E INDICADORES DE DESEMPEÑO

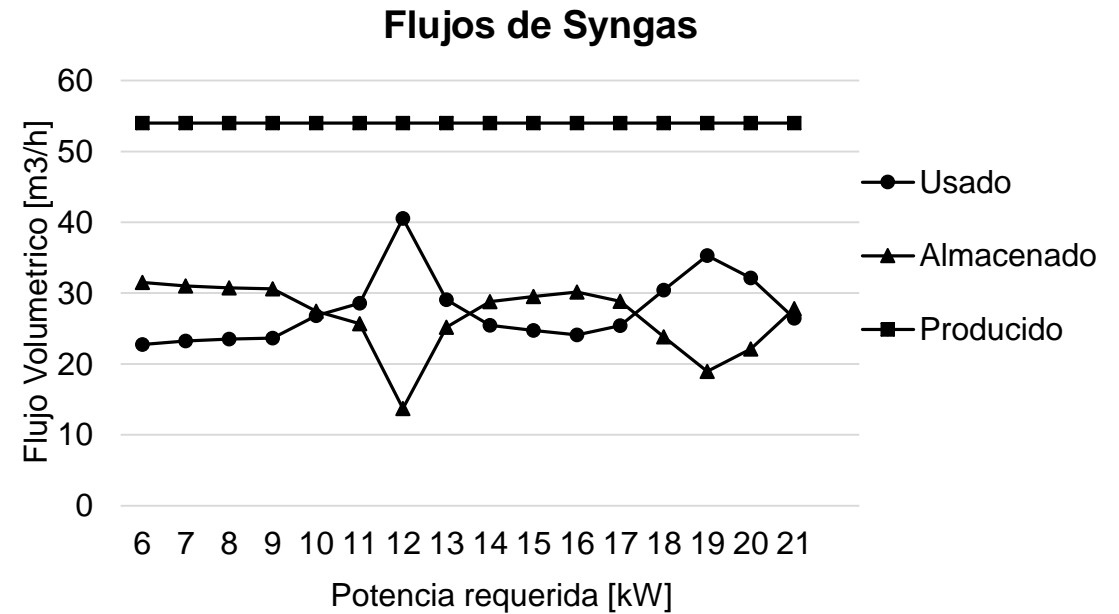
### 4.2 ANÁLISIS EXERGOAMBIENTAL



## Comportamiento del Motor en Términos de presión

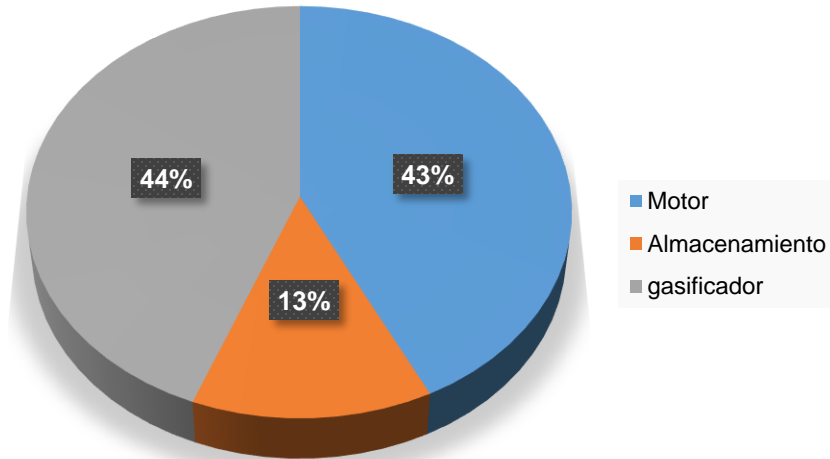


## Flujos de Syngas en los diferentes equipos a diferentes cargas



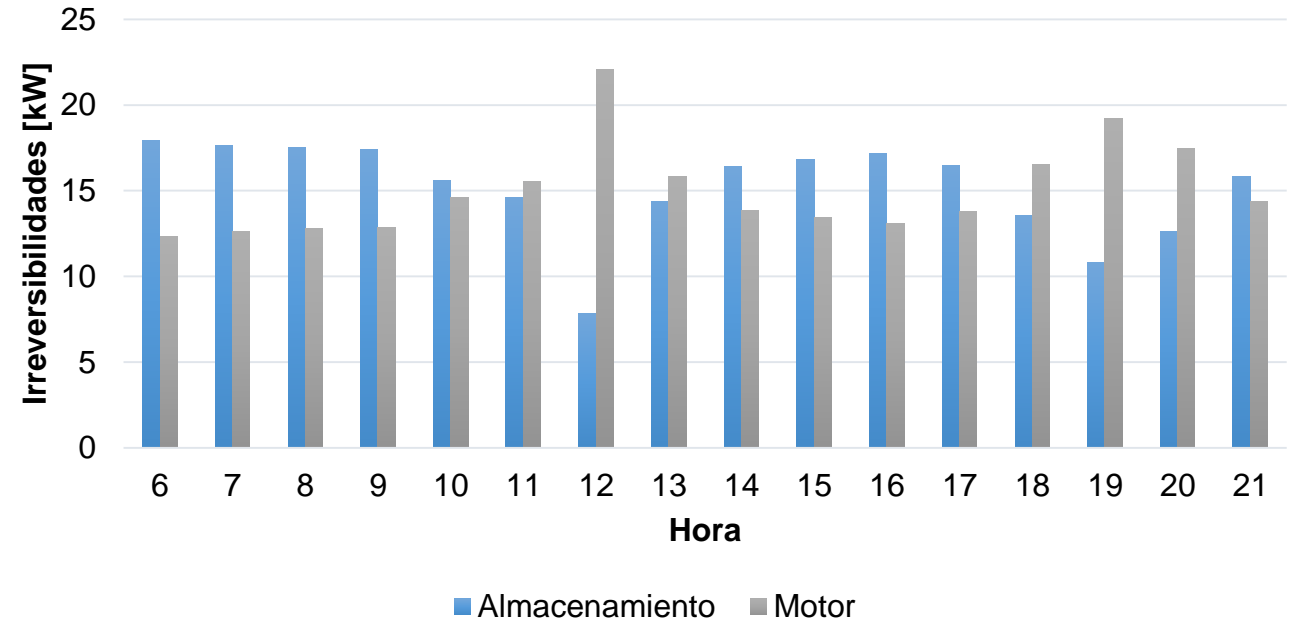
## Indicadores de desempeño

### Irreversibilidades a plena carga



Equipo	Eficiencia	
	Exergética	Energética
Motor	0.3751	0.2885
Sistema	0.2205	0.2458

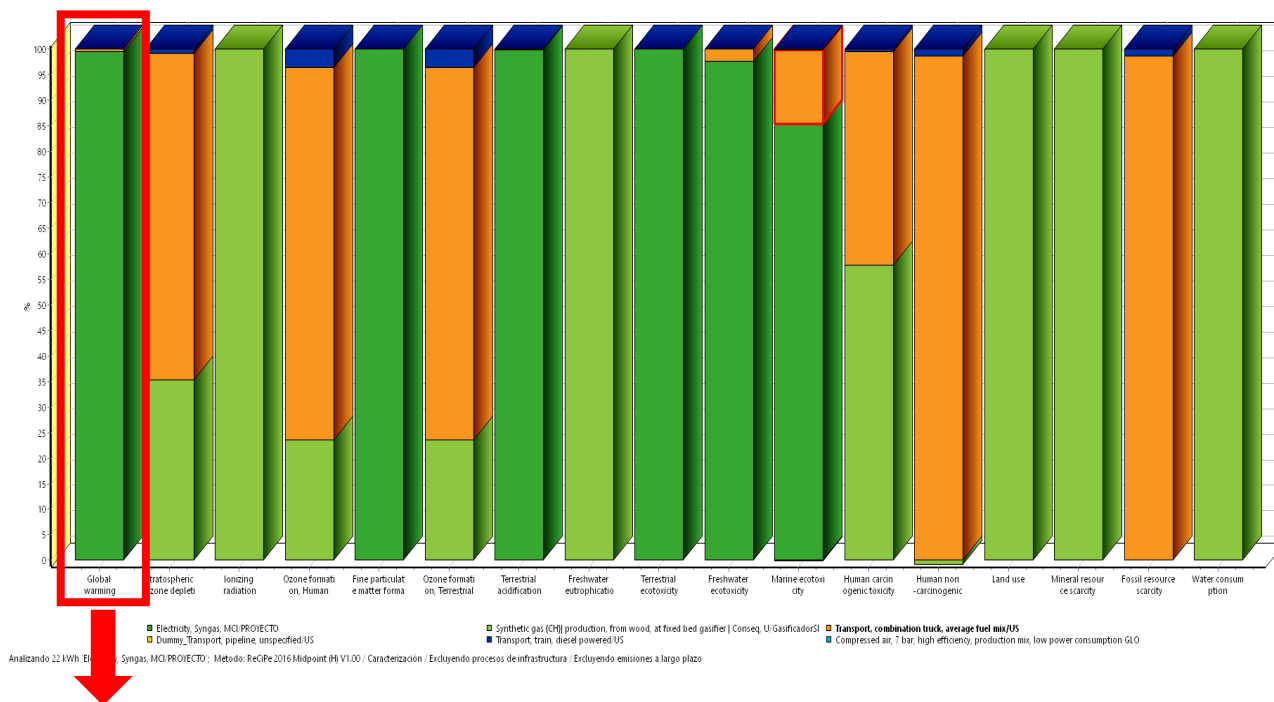
### Irreversibilidades a diferentes cargas



*Irreversibilidad gasificador = 23kW*



## ANÁLISIS EXERGOAMBIENTAL

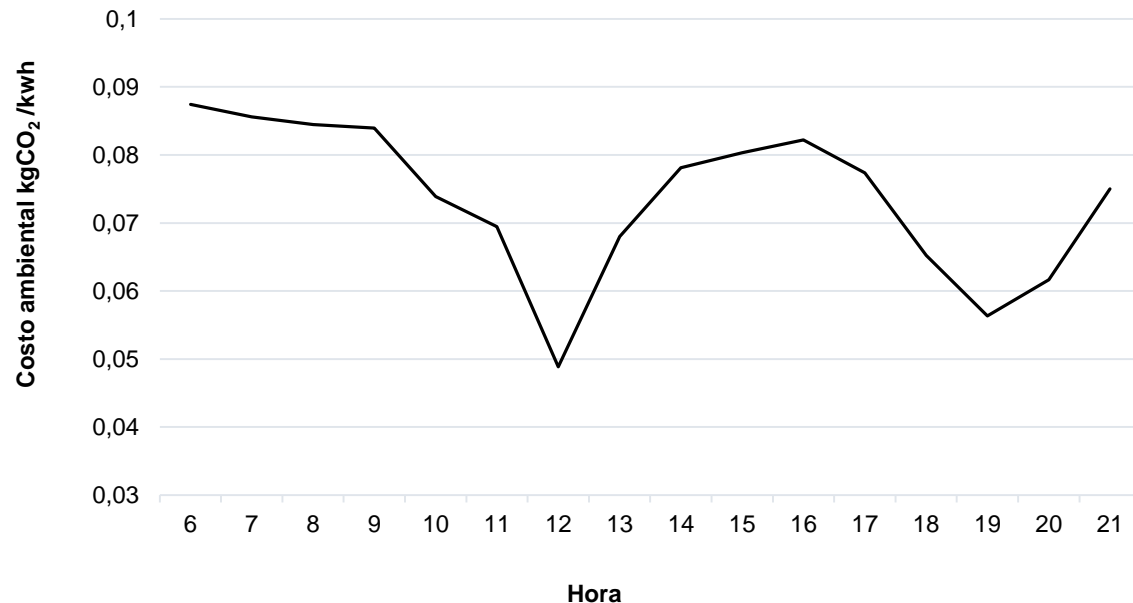


### CATEGORIA DE IMPACTO

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

## ANÁLISIS EXERGOAMBIENTAL

### Costo ambiental de la energía eléctrica.



Sistema de generación a partir de gasificación de biomasa

**48**  
KgCO<sub>2</sub>/MWh

Sistema de generación a partir de Co-firing

**1230**  
KgCO<sub>2</sub>/MWh

Sistema de generación a partir de una central térmica

**274**  
KgCO<sub>2</sub>/MWh

En el caso del pico de demanda con una potencia de 19.048 kW para la población y 2.267 kW para el compresor se requieren 40.53 m<sup>3</sup>/h, el compresor direcciona los 13 m<sup>3</sup>/h de syngas que no son usados por el motor hacia el tanque de almacenamiento. Por otro lado se tiene que el requerimiento mínimo se da a las seis de la mañana con una potencia de 6.75 kW para la población y 5.206 kW para el compresor de tal forma que se necesita 22.737 m<sup>3</sup>/h de syngas, almacenando 31.529 m<sup>3</sup>/h es decir que por cada hora de generación eléctrica producida se almacena en promedio un 49 % de syngas. De esta manera se concluye que el gasificador entrara en operación día de por medio ya que se logra almacenar la cantidad suficiente para suplir el requerimiento energético de la localidad durante un día.

# CONCLUSIONES



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

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

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

# CONCLUSIONES



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

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