



Recibido  
03/09/2023

Aceptado  
09/11/2023

# Uso de la biomasa como alternativa de generación eléctrica en zona no interconectada del departamento del Cauca<sup>1</sup>

## Use of biomass as an alternative electric power generation in the non-interconnected area of the Cauca department

Mariana Rendón Leal<sup>2</sup>  
Elena Muñoz España<sup>3</sup>  
Francisco Franco Obando Díaz<sup>4</sup>

### Cómo citar:

Rendón M, Muñoz E, Obando, F.(2013). Use of biomass as an alternative electric power generation in the non-interconnected area of the Cauca Department. *Vía Innova*, 10 (1), 95-112.  
<https://doi.org/10.23850/2422068X.5864>

<sup>1</sup> Uso de la biomasa como alternativa de generación eléctrica en zona no interconectada del departamento del Cauca

<sup>2</sup> Mariana Rendón Leal. Ingeniera en automática industrial. (Universidad del Cauca). [marendon@unicauca.edu.co](mailto:marendon@unicauca.edu.co)

<sup>3</sup> Elena Muñoz España. Magister en electrónica y telecomunicaciones. (Universidad del Cauca). [elenam@unicauca.edu.co](mailto:elenam@unicauca.edu.co)

<sup>4</sup> Francisco Franco Obando Díaz. Magister en electrónica y telecomunicaciones. (Universidad del Cauca). [fobando@unicauca.edu.co](mailto:fobando@unicauca.edu.co)

## Resumen

Dentro del contexto de la estrategia denominada “Planes de Energización Rural Sostenible (PERS) Cauca”, una iniciativa liderada por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), la cual tiene como enfoque principal la creación de soluciones sostenibles que brinden servicios de energía a las regiones rurales desconectadas de la red eléctrica nacional, el Grupo de Investigación en Automática de la Universidad del Cauca ha concentrado sus esfuerzos en evaluar la viabilidad de uso de la biomasa residual agrícola generada en el proceso de producción de panela en el trapiche de la vereda López Adentro, ubicada en Caloto, municipio del departamento del Cauca. Para este estudio, se utilizó el software Homer Pro, donde se simuló el sistema propuesto en el cual se contrastaron las variables técnica y económica con respecto a la alternativa de conexión a la red eléctrica nacional. Los resultados indicaron que el sistema con biodigestor alimentado con el bagazo generado por el trapiche, es capaz de abastecer la demanda de la carga, y su implementación es un 37.8% más costosa que el valor de conexión a la red nacional.

**Palabras clave:** Biomasa, zonas no interconectadas, Homer Pro, generación eléctrica.

## Abstract

Within the context of the strategy known as “Sustainable Rural Electrification Plans (PERS) Cauca,” an initiative led by the Institute for Planning and Promotion of Energy Solutions (IPSE) and the Mining and Energy Planning Unit (UPME), which primarily focuses on creating sustainable solutions to provide energy services to disconnected rural regions from the national electrical grid. The Automation Research Group at the University of Cauca has concentrated its efforts on assessing the feasibility of using residual agricultural biomass generated in the panela production process at the sugar mill in the López Adentro hamlet, located in Caloto, Cauca Department. For this purpose, the Homer Pro software was used to simulate the proposed system, where technical and economic variables were compared with the alternative of connecting to the national electrical grid. The results indicated that the system with a biodigester fueled by the bagasse generated by the sugar mill is capable of meeting the load demand and its implementation is 37.8% more expensive than the cost of connecting to the national grid.

**Keywords:** Biomass, non-interconnected areas, Homer Pro, electric generation.

## 1. INTRODUCCIÓN

La energía y el desarrollo están estrechamente vinculados, los sistemas energéticos son fundamentales para respaldar procesos productivos y accesos a servicios básicos como el transporte, la educación o la salud (Muñoz-Arias, 2021).

Las condiciones actuales han evidenciado los grandes impactos de la falta de electrificación en los hogares de Zonas No Interconectadas (ZNI), como es el caso de la vereda López Adentro, ubicada en el municipio de Caloto al norte del departamento del Cauca, donde conviven indígenas del pueblo Nasa. La economía de este resguardo se centra en la explotación agrícola, principalmente, en el cultivo y transformación de la caña panelera. Para realizar dicho proceso, cuentan con un trapiche el cual ha sido operado desde hace varios años por la comunidad, sin embargo, el sistema no tiene la facultad de procesar la totalidad de caña proveniente de la región debido a la capacidad de los equipos, la antigüedad de los mismos y a la baja suficiencia de la red eléctrica. Por esta razón, los pobladores han optado por realizar conexiones irregulares, que no alcanzan a abastecer la demanda de la carga.

Este proyecto busca determinar la viabilidad del uso del bagazo de la caña panelera en un sistema de suministro eléctrico que permita interconectar el trapiche de la zona, contribuyendo al aumento de la productividad y a su vez, generando un aporte significativo en la mejora de la calidad de vida de los pobladores. El uso de estos residuos aporta en gran

medida a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y a la mitigación del cambio climático, al formarse por la interacción de elementos presentes en la naturaleza como dióxido de carbono, aire, agua, energía solar y tierra con material orgánico derivado de animales y plantas y además, no contribuye en la producción de dióxido de carbono adicional al que es generado en dicha interacción natural (Torres, 2017). Existe un gran interés en el desarrollo de tecnologías de conversión de la biomasa en energía y productos químicos, por tanto, los estudios se han centrado en el análisis de las diferentes fuentes, los procesos de transformación y los sistemas asociados (Deluque Pinto, 2022).

Dentro de los aspectos más importantes de la investigación en biomasa se encuentra el estudio de sus fuentes. Se han identificado diferentes tipos, tales como la biomasa residual, la biomasa forestal, la biomasa agrícola, la biomasa urbana y la biomasa de cultivos energéticos (Chávez-Sifontes, 2019). Cada una de estas fuentes presenta diferentes características y requerimientos de manejo y conversión, lo que hace necesario estudiarlas detalladamente para su aprovechamiento.

## 2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo esta investigación, se implementó una metodología integral que abarca diversas etapas de análisis. En primer lugar, se realizó un levantamiento de información para caracterizar la zona y el proceso productivo del trapiche en la vereda López Adentro, con el fin de entender sus condiciones actuales y el

funcionamiento del sistema. Posteriormente se definieron aspectos generales del software y las variables objeto de análisis para las alternativas.

## 2.1 Caracterización de la zona

### 2.1.1 Demografía

Según la información consignada en el Plan de Desarrollo Municipal, la población de Caloto está compuesta por 30.216 habitantes, de los cuales 5.315 residen en la zona urbana y 24.901 en la zona rural, lo que equivale al 17,59% y 82,41% respectivamente. El municipio está dividido en una cabecera municipal, tres resguardos indígenas y cinco corregimientos (Alcaldía Municipal Caloto, 2020).

### 2.1.2 Economía

La economía del resguardo indígena López Adentro se centra en los cultivos de café, yuca, maíz, frijol, caña panelera, hortalizas, entre otros. El producto más representativo en la zona es el arroz, ya que cuenta con altos niveles de consumo. En los últimos años, se ha fortalecido la generación de productos derivados de la caña como la panela en sus distintas presentaciones y la miel; la capacidad productiva de la comunidad es estable, ya que se producen las cantidades necesarias para comercio y el autoconsumo de las familias, sin embargo, la productividad no ha presentado incrementos importantes debido a la falta de apoyo técnico y seguimiento continuo de los proyectos (Cabildo Indígena del Resguardo Paez de Corinto, 2019).

### 2.1.3 Servicios públicos

En relación a los servicios públicos, la cobertura de energía eléctrica de las viviendas de poblaciones indígenas del departamento del Cauca equivale al 87,1% frente al total nacional, de 96,3%. Con respecto al acueducto, su cobertura en hogares indígenas es del 41,6%, cerca de 817 viviendas del municipio de Caloto cuentan con el servicio de recolección de basuras, los hogares restantes utilizan mayoritariamente los residuos orgánicos como abono o fertilizantes de cultivos. Alrededor del 15% de la población perteneciente a la comunidad de López Adentro no cuenta con el servicio de energía eléctrica, especialmente aquellas zonas que se encuentran alejadas del centro poblado, debido a las condiciones geográficas de la zona, estas características han impedido la conexión total de las viviendas a la red eléctrica nacional (DANE, 2019).

### 2.1.4 Perfil de carga

De acuerdo al estudio realizado en la zona, se identificaron los componentes principales del trapiche del resguardo López Adentro con la finalidad de determinar las cargas potenciales del sistema; para ello, se calcularon las siguientes variables con ayuda de las fichas técnicas de cada dispositivo:

*N*: Número de dispositivos.

*P*: Potencia unitaria.

*Td*: Tiempo medido en horas de consumo por día.

*Tm*: Tiempo medido en días de utilización de la carga en un mes.

*Cd*: Consumo medio diario de la carga en Wh/día. Donde  $Cd = N * P * Td$ . (1)

*Cm*: Consumo medio mensual de una carga en Wh/mes. Donde  $Cm = Cd * T$  (2)

Tabla 1. Cuadro de cargas para al trapiche López Adentro

Componente	N	Potencia W (P)	Tiempo hora/día (Td)	Tiempo día/mes (Tm)	Consumo Wh/día (Cd)	Consumo Wh/mes (Cm)
Motor del molino	1	37285	20	25	745700	18642500
Luminarias	6	20	8	10	960	9600
Dispositivos de comunicación (Celulares)	4	4	2	3	32	96
Total	1	37309	30	38	746692	18652196

Fuente: elaboración propia

Como se evidencia en la Tabla 1, el consumo total diario del trapiche equivale aproximadamente a 746,69 kWh/día. Para determinar la cantidad máxima de energía eléctrica que el sistema de generación debe proporcionar, se realizó el cálculo de carga instalada total como lo muestra la Tabla 2, equivalente a 37,42 kW.

N: Número de dispositivos.

P: Potencia unitaria.

Ci: Carga instalada, donde  $Ci = N * P$ .

Tabla 2. Carga instalada para al trapiche López Adentro

N	P (W)	Ci (W)
1	37285	37285
6	20	120
4	4	16
	Total carga instalada	37421

Fuente: elaboración propia

## 2.2 Descripción del proceso productivo

En el trapiche objeto de estudio, los operarios son los encargados de realizar las actividades que componen todas las etapas del proceso,

desde la recepción de la materia prima hasta la unidad de empaçado.

### 2.2.1 Elementos que componen el sistema actual

Un trapiche es un sistema agroindustrial utilizado para la extracción de jugo de la caña de azúcar, la producción de panela y otros derivados (Biblioteca Rural Itinerante Alejandro Chesnaje, s.f.). Los equipos que componen un trapiche desempeñan funciones específicas en el proceso de transformación de la caña de azúcar en productos finales. En la Tabla 3, se describen los elementos que hacen parte del trapiche de la comunidad López Adentro.

**Tabla 3.** Descripción funcional de componentes del proceso

Equipo	Funcionalidad
Molino motorizado	Su función es desfibrar la caña de azúcar, rompiendo la estructura de la fibra para facilitar la extracción del jugo. Esta máquina está equipada con rodillos que giran y presionan la caña para obtener una pasta fibrosa. También cuenta con una tolva dealimentación sobre el molino donde se carga la caña de azúcar.
Tanques	Almacenan el jugo para la fase de limpieza.
Calderas	Tienen como función calentar el jugo de caña extraído para eliminar impurezas y evaporar parte del agua presente, concentrando el líquido en un almíbar espeso. Este almíbar es el precursor de la panela y otros productos derivados.
Gaveras	Una vez alcanzada la concentración adecuada del almíbar, este se vierte en moldes prensadores para darle forma a la panela. Los moldes permiten obtener bloques compactos y uniformes de panela que luego son desmoldados y secados.
Cucharones	Se utilizan para mezclar y agitar el jugo de caña de azúcar en diferentes etapas del proceso de producción de la panela.

Fuente: elaboración propia

### 2.2.2 Estimación de los residuos generados

Se realizó la estimación de la cantidad de biomasa generada en el trapiche, basados en los datos suministrados por la comunidad. La información obtenida se encuentra consolidada en la tabla 4.

**Tabla 4.** Biomasa residual generada

Ítem	Valor
Caña procesada diariamente	Entre 12 y 15 toneladas
Bagazo generado diariamente	Entre 3 y 5 toneladas
Capacidad de procesamiento del trapiche	50 hectáreas por año
Caña obtenida en una hectárea sembrada	130 toneladas
Caña sembrada anualmente	700 hectáreas

Fuente: elaboración propia

La información recopilada fue utilizada para alimentar la plataforma de simulación Homer Pro, con la cual se realizaron análisis y modelamientos para estimar la demanda energética del trapiche y determinar la viabilidad técnica y económica de implementar una alternativa basada en un sistema con biodigestor, y otra

realizando una conexión directa a la red eléctrica nacional.

### 2.3 Evaluación sistema de aprovechamiento del bagazo en Homer Pro

Homer Pro es una herramienta de simulación que permite modelar sistemas de energía. Al ingresar datos sobre la demanda energética de la planta panelera en relación al perfil de carga a lo largo del tiempo, el software puede evaluar cómo el sistema se integra y afecta el suministro energético global de la instalación. Además, permite simular diferentes escenarios, ajustando parámetros como el tamaño de los componentes, la fuente y la eficiencia del proceso. El software permite evaluar la viabilidad económica y técnica del sistema biodigestor. El análisis del perfil de cargas proporciona información sobre cómo el biodigestor puede cubrir la demanda energética del trapiche. Además, es posible determinar si el biogás producido será suficiente para abastecer la demanda energética durante las épocas de mayor consumo.

Igualmente, se evalúan los costos asociados con la implementación y operación del biodigestor, así como los posibles beneficios económicos a largo plazo. Es necesario estructurar el sistema de aprovechamiento mediante un esquema para identificar el módulo que será entrada para el perfil de cargas en Homer Pro, como se muestra en la ilustración 1 y 2.

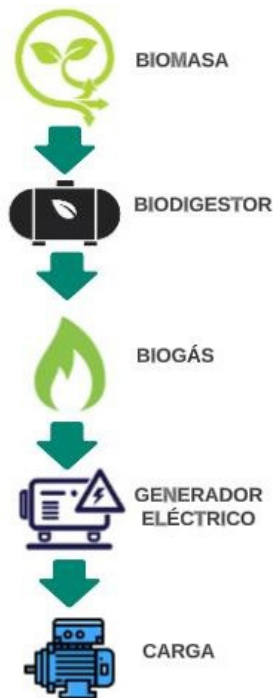


Ilustración 1. Diagrama del sistema de aprovechamiento  
Fuente: elaboración propia

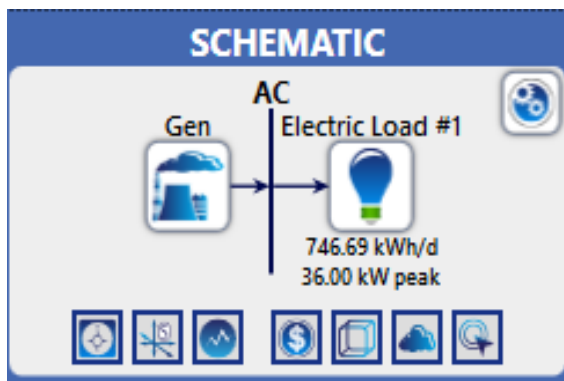


Ilustración 2. Esquema generado en Homer Pro  
Fuente: elaboración propia

El dimensionamiento de un sistema de aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar mediante la herramienta software Homer Pro implica una serie de pasos para determinar la capacidad y eficiencia del sistema biodigestor.

### 2.3.1 Parámetros Iniciales en Homer Pro

Homer Pro precisa algunos datos generales y económicos de entrada sobre el proyecto que se quiere evaluar. Inicialmente se indica la ubicación geográfica del lugar donde se desarrolla el proyecto, en este caso se ingresan las coordenadas de la vereda López Adentro del municipio de Caloto. Luego se asigna un nombre para identificar el proyecto y su respectivo autor, esto acompañado de una breve descripción general. Para los aspectos económicos se requieren cuatro parámetros descritos a continuación y consignados en la Tabla 5 (Homer Pro 3.11, s.f.):

Tasa de descuento (%): la tasa de descuento en Colombia puede variar dependiendo del contexto y del tipo de proyecto o análisis económico que se esté realizando. En general, la tasa de descuento utilizada en proyectos de inversión y evaluación económica en Colombia suele basarse en la Tasa Interna de Retorno (TIR) o la Tasa de Interés de Referencia (TIR) que está influenciada por la tasa de interés de la economía. En la actualidad se maneja el criterio de un 12% priorizando el consumo presente sobre el futuro. Tasa de inflación (%): es un indicador económico que puede cambiar con el tiempo debido a diversos factores, como cambios en la economía, políticas gubernamentales y eventos



globales. La inflación total en el país presenta una desaceleración progresiva que supone un porcentaje del 5.2% para diciembre del 2023. Capacidad anual de desabastecimiento (%): este indicador representa el porcentaje de escasez de energía que se puede presentar en el sistema. Para obtener resultados distintos para diferentes escenarios de desabastecimiento, se fija la variable de sensibilidad en dos valores: 0% para el primer caso y 10% para el segundo. En el apartado de Restricciones en la ventana de proyecto, se fijó una máxima capacidad de escasez anual para evitar que el valor propuesto al inicio sea mayor al máximo permitido para que el sistema sea interpretado como viable (Homer Pro 3.11, s.f.).

Tiempo de vida del proyecto (años): el estimado de tiempo de vida útil del sistema es de 20 años.

Tabla 5. Parámetros iniciales de diseño

Parámetro	Valor	Sensibilidad
Tasa de descuento (%)	12.00	Ninguna
Tasa de inflación (%)	5.20	Ninguna
Capacidad anual de desabastecimiento (%)	0.00	0.00/10.00
Tiempo de vida del proyecto (años)	20.00	Ninguna

Fuente: elaboración propia

### 2.3.2 Caracterización de la biomasa

Las propiedades del bagazo generado en el proceso de molienda, tienen una relación directa con el valor del potencial de generación de biogás (Peña Beltrán, 2020). Particularmente, la herramienta Homer Pro cuenta con un módulo de biomasa que permite modelar sistemas que se ejecutan de forma similar para las distintas fuentes de materias primas trans-

formadas en biomasa empleadas en procesos de gasificación. Para que el módulo funcione, se debe especificar la disponibilidad y el costo de la biomasa. Esto incluye el costo de adquisición, el transporte y el almacenamiento de la biomasa. Además, se puede especificar el área disponible para su almacenamiento y cómo se gestionará el suministro continuo para el generador. El software hace una cuantificación precisa de la cantidad de biogás que el gasificador puede generar para la alimentación de uno o más generadores con base en la disponibilidad de biomasa en el sistema simulado. Los valores a ingresar, se pueden introducir directamente en el apartado Biomass Resource o importar un archivo con los valores de disponibilidad por unidad de tiempo, que para Homer Pro están fijados en días. El número de toneladas de biomasa generadas diariamente representa un dato muy importante para el escalado del promedio anual, ya que Homer utiliza este valor en el cálculo de un factor común para cada uno de los datos numéricos. En este caso, ese factor es igual a 1, ya que el valor predeterminado que fija el software, es el mismo que se introduce como referencia para interpretar que hay recursos de biomasa disponibles. Si este factor es 0, Homer deduce que no hay recursos de biomasa (Homer Pro 3.11, s.f.).

Las propiedades que se definen para la obtención del análisis son las siguientes:

El costo promedio por tonelada de la materia prima de biomasa 0\$/t. El contenido de carbono de la materia prima de biomasa como porcentaje basado en la masa: 43.48% (Galán, 2012). La equivalencia entre la biomasa con-

sumida por el gasificador y el biogás generado: 0.18128 kg/kg.

El valor calorífico inferior del biogás producido por el gasificador: 16.95 MJ/kg. El costo de producción de la biomasa, al ser un subproducto resultado de la molienda de la caña de azúcar y no requerir energía adicional para su posterior tratamiento, es cero (Resano, 2022). En la Tabla 6 se especifican los parámetros de configuración mencionados.

**Tabla 6.** Caracterización de la biomasa

Propiedad	Valor	Sensibilidad
Biomasa disponible (ton/día)	3.00	Ninguna
Costo por tonelada de biomasa (\$/ton)	0.00	Ninguna
Contenido de carbono (%)	43.48	Ninguna
Equivalencia biomasa consumida y biogás generado (kg/kg)	0.18	Ninguna
LHV de biogás	16.95	Ninguna

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3 Configuración del generador

A través del cuadro de cargas para el trapiche López Adentro se puede constatar que la capacidad en kW que debe soportar el generador a base de biogás, debe ser de 45 kW aproximadamente. Homer Pro ofrece una variedad de generadores con distintas características como la capacidad del generador en kW o el tipo de combustible. Teniendo en cuenta estos criterios, se elige el generador Autosize Genset que es un grupo electrógeno de tamaño automático ajustable a las necesidades de fuente de combustible y capacidad de carga. Las tablas 7, 8 y 9 muestran las características sobre las cuales

va a funcionar el generador.

**Tabla 7.** Valores fijos de emisiones del generador

Emisiones	Valor
CO (g/kg)	16.50
HC no quemados (g/kg)	0.72
Partículas (g/kg)	0.10
Azufre del combustible convertido en MP (%)	2.20
Óxido de nitrógeno (g/kg)	15.50

Fuente: elaboración propia

**Tabla 8.** Costos del generador

Costos	Valor
Capital inicial (\$)	500.00
Reemplazo (\$)	500.00
O&M (\$/op. hora)	0.030
Precio del combustible	1.00

Fuente: elaboración propia

**Tabla 9.** Especificaciones del sitio

Propiedad	Valor
Radio de carga mínima (%)	25.00
Tiempo de operación mínima (minutos)	0.00
CHP Relación de recuperación de calor (%)	0.00
Tiempo de vida útil (horas)	15000.00
Tipo de carga	AC

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.4 Modelado de carga eléctrica en el sistema biodigestor

El módulo de carga en Homer Pro es una parte esencial de la herramienta que se utiliza para representar y simular la demanda de energía eléctrica de un sistema o una instalación. El módulo de carga tiene en cuenta la variación de la demanda eléctrica a lo largo del tiempo. Esto permite realizar simulaciones horarias, diarias o incluso anuales para analizar cómo la demanda cambia en diferentes momentos y condiciones como el tipo escenario, que para el caso del trapiche es de tipo industrial. El consumo de energía en kW por hora y por día que realiza el sistema, son los datos de entrada para simular la carga. La variabilidad aleatoria (Random Variability) es un parámetro que ayuda a simular los cambios de consumo que se presentan en el sistema mientras está en funcionamiento ya que, al ser un proceso industrial, los componentes eléctricos que representan la carga tienen distintas frecuencias de uso a lo largo del día. La molienda de la caña de azúcar es un proceso continuo con poca variabilidad en el ritmo de trabajo y por consiguiente, en el motor empleado para el funcionamiento del trapiche, por ello se fija un porcentaje del 3% de variación. Para los valores de carga por hora durante los meses del año, se fija el valor de 37.420 kW. Los valores de referencia por métrica se encuentran consignados en la Tabla 10.

Tabla 10. Características de modelado de carga

Métrica	Referencia	Escalado
Promedio (kWh/día)	696.08	746.69
Promedio	37.42	746.69
Pico(kW)	43.29	
Factor de carga (%)	86	746.69
Año para modelar (año)	2023	Ninguno
Tipo de carga	AC	Ninguno

Fuente: elaboración propia

## 2.4 Valoración de carga eléctrica enlazada al Sistema Interconectado Nacional en Homer Pro

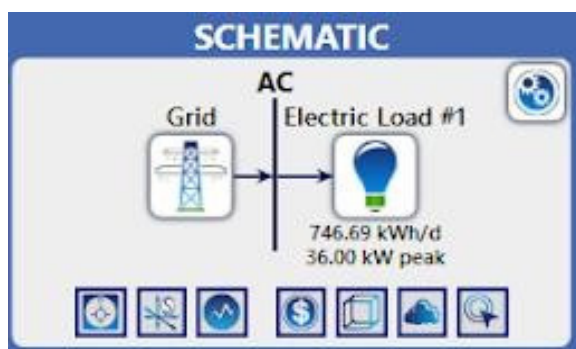
El Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia es el conjunto de infraestructuras, instalaciones y redes de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica que abarca todo el territorio nacional (Arango-Aramburo, 2020). Este sistema tiene como objetivo principal asegurar el suministro de energía eléctrica a todos los usuarios y sectores de la economía del país. A través de un enfoque integral y basado en datos, Homer Pro permite tomar decisiones informadas para observar la demanda desde el trapiche, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales en el contexto del SIN.

### 2.4.1 Configuración de parámetros económicos iniciales en Homer Pro

Para evaluar los factores económicos y ambientales que se derivan de la conexión de la carga a la red eléctrica pública, y establecer valores comparativos con el sistema de aprovechamiento basado en un biodigestor previamente modelado, se precisa realizar el análisis bajo el mismo perfil de cargas que se estableció para

la conexión con el biodigestor. El esquema modelado se muestra en la Ilustración 3.

Además de los datos que se configuraron previamente en el sistema de aprovechamiento para el biodigestor, se debe verificar otro parámetro crucial para contrastar los resultados económicos que se obtienen en los cálculos realizados por Homer Pro. Este parámetro es el tipo de moneda que se emplea durante la simulación del sistema de carga conectado a la red eléctrica pública.



**Ilustración 3.** Esquema generado en Homer Pro  
Fuente: elaboración propia

### 2.4.2 Modelado de carga eléctrica en sistema conectado a la red pública

Homer Pro permite crear perfiles de consumo que describen cómo varía la demanda de energía eléctrica a lo largo del tiempo. Como se mencionó anteriormente, el objetivo de la valoración es hacer una comparación de eficiencia con el sistema de biodigestor, por lo que se deben ingresar exactamente los mismos parámetros que se configuraron para ese tipo de suministro energético y fijando la misma variabilidad aleatoria (Random Variability) como variable de sensibilidad que caracteriza el cambio de frecuencia de uso de la carga eléctrica a lo largo del día. Al coincidir la repre-

sentación espectral y los datos necesarios para completar el perfil de cargas con el presentado en la simulación del sistema biodigestor, se omite la representación gráfica.

### 2.4.3 Representación de la red eléctrica pública

El componente “Grid” (Red Eléctrica) es una parte fundamental del sistema de simulación. La inclusión de este componente es esencial para evaluar cómo interactúa la energía entre el sistema local y la red eléctrica, así como para analizar la viabilidad económica y técnica de operar en modo de conexión a la red o en modo aislado. El componente cuenta con cuatro variantes principales de las cuales se selecciona la que mejor se adapte a las necesidades de simulación. El modo Tarifas Simples permite fijar un precio de kW/h constante y un precio de reventa de kW/h. También se puede seleccionar si se desea emplear la medición neta de costos o establecer los factores de emisión asociados con la red eléctrica que se ingresa. La variante de Tarifas Simples tiene dos apartados: el primero, son los parámetros con precios y opciones de medición neta, y el segundo, son los factores de emisión. Teniendo en cuenta los resultados de subasta de cierre para la venta y comercialización de potencia eléctrica en Colombia desde el 2022 hasta el 2024 (Sandoval, 2023), se ajusta la variable de sensibilidad con los valores para el año 2023 y 2024 haciendo la respectiva conversión de peso colombiano a dólar americano como se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Resultados de la convocatoria de subasta de energías eléctricas

Año	Precio de compra (\$/kWh)	Precio de venta (\$/kWh)	Volumen adjudicado (GWh)
2023	234.00	269.00	4.32
2024	220.00	240.00	-

Fuente: (Sandoval, 2023).

Como factor principal en las emisiones que inciden en el ambiente, se tiene al monóxido de carbono: un gas de efecto invernadero derivado de la generación eléctrica del Sistema Interconectado Nacional. Este factor se fija en un valor de 164.38 g/kWh (Ministerio de Minas y Energía, 2020). Para ingresar los valores de compra y reventa de la potencia eléctrica, es conveniente hacer una conversión de divisas con valores actualizados a la fecha de la simulación, los cuales se encuentran descritos en la Tabla 12; lo anterior, busca tener una mejor estimación de las diferencias en los aspectos económicos entre el sistema biodigestor y el sistema conectado a la red.

**Tabla 12.** Configuración de tarifas para el grid

Tarifas simples	Precio
Precio de potencia en la red (\$/kWh)	0.057
Precio de reventa de potencia en la red (\$/kWh)	0.065

Fuente: elaboración propia

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resultados del sistema biodigestor

El resultado por coste para el sistema se evalúa a lo largo de la vida útil del proyecto al igual que los costos por componente. Como resulta-

do de la elección de un generador *autosize*, se obtuvo un generador eléctrico AC con capacidad de 40kW cuyo único combustible es el biogás producido por la fuente de biomasa. En la Tabla 13 y 14, se destacan los resultados de los cálculos generados por el software.

**Tabla 13.** Resultados del sistema biodigestor A

Característica	Valor	Unidades
Horas de operación	8.760	Horas/año
Números de inicios	1.00	On/año
Vida de operación	1.71	Año
Factor de capacidad	77.80	%
Costo fijo de generación	2.53	\$/hora
Costo marginal de generación	0	\$/kWh

Fuente: elaboración propia

**Tabla 14.** Resultados del sistema biodigestor B

Característica	Valor	Unidades
Producción eléctrica	272,542.00	kWh/año
Salida Eléctrica	31.10	kW
Salida Eléctrica mínima	25.7	kW
Salida Eléctrica máxima	36.00	kW
Consumo de combustible	466.00	Ton/año
Consumo específico	0.308.00	kg/kWh
Entrada de energía combustible	395,023.00	kWh/año
Eficiencia eléctrica	69.00	%

Fuente: elaboración propia

Las emisiones generadas por el sistema biodigestor presentadas en la tabla 15, revelan una alta presencia de dióxido de carbono como consecuencia de la combustión del biogás donde el metano y otros gases presentes se oxidan y se liberan en forma de dióxido de carbono (Caballero, 2017).

**Tabla 15. Resultados de emisiones del sistema biodigestor**

Característica	Valor	Unidades
Dióxido de carbono	730.00	kg/año
Monóxido de carbono	7.69	kg/año
HC no quemados	0.336	kg/año
Partículas	0.0466	kg/año
Dióxido de azufre	0	kg/año
Óxido de nitrógeno	7.22	kg/año

Fuente: elaboración propia

En los resultados económicos se obtuvieron indicadores que ayudan a pronosticar la viabilidad y sostenibilidad económica del proyecto expuestos en la Tabla 16. Como principales efectos se tienen los siguientes rubros:

**NPC (\$):** El costo actual neto hace referencia

al costo de vida útil del proyecto basado en los costos actuales de instalación y operación del componente Generador, menos el valor actual de los ingresos económicos que genera el proyecto.

**LCOE (\$/kWh):** Homer Pro delimita el costo nivelado de energía como el valor medio por kWh de energía eléctrica utilizable que se produce en el sistema.

**Operating cost (\$/yr):** valor de los costos de operación e ingresos anuales a excepción de los costos iniciales de capital. **Ren Frac (%):** porcentaje en fracción de la energía que se suministra a la carga a través del generador eléctrico.

**Tabla 16. Resultados económicos del sistema biodigestor**

Capacidad de desabastecimiento (%)	NPC (\$)	LOE (\$/kWh)	Costo de operación (\$/año)	Costo de O&M (\$/año)	Costo de Combustible (\$/año)
0	\$256,691.00	\$0.0852	\$21,420.00	\$10,512.00	\$0.00
10.00	\$256,691.00	\$0.0852	\$21,420.00	\$10,512.00	\$0.00
5.00	\$256,691.00	\$0.0852	\$21,420.00	\$10,512.00	\$0.00

Fuente: elaboración propia

### 3.2 Resultados del sistema conectado a la red eléctrica pública

Los resultados del costo de suministro de la red eléctrica se calculan con base en los rubros económicos configurados inicialmente y la longevidad del sistema de carga, el cual tiene la misma vida útil del sistema biodigestor para efectos comparativos. Como resultado de este diseño, se obtuvo un Grid de 1 GW para simular el soporte de la red a la demanda de carga.

Los resultados económicos obtenidos para

este sistema reflejados en la Tabla 17 no tienen en cuenta una capacidad de desabastecimiento como en el sistema del biodigestor, ya que los costos de operación y mantenimiento asociados al sistema solo dependen de la energía consumida por la carga eléctrica. Los costos de reemplazo son nulos ya que una vez se realiza la vinculación al SIN, no se requiere renovar la conexión cableada, a excepción del dispositivo metrológico que, según los lineamientos legales, se debe cambiar cada 15 años. Para la

duración estimada del proyecto se supone un solo cambio del dispositivo metrológico, que se asume como un costo de operación y mantenimiento.

**Tabla 17. Resultados económicos del sistema conectado a la red**

Componente	Capital (\$)	Reemplazo (\$)	Costo de operación (\$/año)	Costo de O&M (\$)	Costo de Combustible (\$/año)
Grid	\$0.00	\$0.00	\$14,445.00	\$159,616.00	\$0.00
Sistema	\$0.00	\$0.00	\$14,445.00	\$159,616.00	\$0.00

Fuente: elaboración propia

Los resultados para el dióxido de carbono arrojaron 44800 kg/año como se visualiza en la Tabla 18, teniendo como base para el cálculo de este valor el factor fijado en la simulación de las emisiones de dicho gas. Al solo tener información precisa del dióxido de carbono en cuanto a emisiones producidas por el SIN, el monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados y material particulado, no reciben valores de entrada. Por otra parte, el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno sí cuentan con un valor de entrada que se fija por defecto con base en la capacidad que debe tener el Grid. Esta aproximación se llevó al cálculo de emisiones para simular el impacto ambiental que origina la quema de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica (Ure, 2021).

**Tabla 18. Resultados de emisiones del sistema conectado a la red**

Característica	Valor	Unidades
Dióxido de carbono	44,790.00	kg/año
Monóxido de carbono	0.00	kg/año
HC no quemados	0.00	kg/año
Partículas	0.00	kg/año
Dióxido de azufre	747.00	kg/año
Óxido de nitrógeno	365.00	kg/año

## 4. CONCLUSIONES

Al comparar los valores económicos más representativos y los resultados de emisiones contaminantes entre el sistema alimentado por un generador a base de biomasa procedente del bagazo de caña de azúcar y el sistema conectado a la red, se obtienen algunas conclusiones con base en las tablas comparativas 19 y 20. Cabe mencionar que los parámetros económicos para la configuración del generador autosize fueron calculados por el software partiendo de la capacidad requerida y el tipo de combustible de entrada.

**Tabla 19. Comparación económica de sistemas**

Sistema	NPC (\$)	Operating cost (\$/yr)	LCOE (\$/kWh)
Conectado a la red	159,616.90	14,444.72	0.0530
Biodigestor	256,669.00	21,420.00	0.0852

Fuente: elaboración propia

Tabla 20. Comparación de emisiones entre sistemas

Sistema	Dióxido de carbono (kg/año)	Monóxido de carbono (kg/año)	Hidrocarburos no quemados (kg/año)	Material particulado (kg/año)	Dióxido de azufre (kg/año)	Óxido de nitrógeno (kg/año)
Biodigestor	730	7.69	0.336	0.0466	0	7.22
conectado a la red	44790	0	0	0	747	367

Fuente: elaboración propia

La implementación de un generador alimentado por biogás producido en un biodigestor a base de biomasa residual de la caña de azúcar para suplir la demanda energética del proceso de molienda, es un 37.8% más costosa que realizar la conexión de la carga eléctrica al SIN, debido al incremento del costo presente neto del sistema generador al tener más componentes que requieren capital económico a lo largo de la vida útil del sistema.

El generador y el biodigestor requieren un mantenimiento y operación cuidadosos para asegurar su eficiencia y confiabilidad a lo largo del tiempo. Los costos asociados con el mantenimiento y la gestión de biomasa pueden aumentar la complejidad y los gastos en comparación con una conexión al SIN, que generalmente se basa en infraestructuras establecidas y mantenidas por entidades especializadas. Aunque la generación de energía eléctrica a partir de biogás es una alternativa sostenible y renovable, la combustión del biogás todavía produce emisiones de dióxido de carbono (Gutiérrez, 2021), pero sólo representa el 1.6% de la cantidad generada en la obtención de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles.

El costo de operación para el sistema conectado a la red es aproximadamente un 33% más

económico que el costo de operación del sistema biodigestor ya que no requiere gastos de reemplazo, solo debe suplir un capital inicial para el proceso de instalación y conexión al SIN.

Las incidencias ambientales son divergentes en ambos sistemas: por un lado, el SIN necesita emplear varias fuentes de energía como la térmica a base de carbón, e hidrocarburos que generan una considerable cantidad de material particulado, gases de efecto invernadero y gases tóxicos como el monóxido de carbono por la quema parcial de materia orgánica y polímeros. Por parte del sistema biodigestor, se presenta poco material particulado y niveles a menor escala de gases tóxicos como el monóxido de nitrógeno producido por el generador.

La conexión al SIN proporciona un suministro eléctrico constante y predecible, lo que puede ser ventajoso para el proceso de molienda que necesita una fuente de energía confiable. El generador a base de biogás puede estar sujeto a variaciones en la producción de biomasa, lo que podría impactar la disponibilidad de energía y su confiabilidad. Los generadores a base de biogás y los biodigestores pueden tener un mejor desempeño en términos de costo por unidad de energía producida



cuando se utilizan a mayor escala. En proyectos medianos y pequeños, los costos fijos de construcción y operación pueden representar una parte significativa de los costos totales, lo que podría aumentar la viabilidad económica al conectarse a una red eléctrica ya existente.

## 5. REFERENCIAS

- Alcaldía Municipal Caloto. (2020). Plan de desarrollo comunitario. Caloto.
- Arango-Aramburo, S. V. E. (2020). Implicaciones de política del Acuerdo de París en la planeación del sistema eléctrico de Colombia.
- Biblioteca Rural Itinerante Alejandro Chesnaje. (s.f.). biblioteca nacional. Obtenido de <https://bit.ly/3EqyHII>
- Cabal, B. &. (2017). Revisión de emisiones de Co2 en Colombia por la generación energética eléctrica para el sistema interconectado nacional en época de fenómeno del niño entre los años 1990- 2016.
- Cabildo Indígena del Resguardo Paez de Corinto. (2019). Plan de vida y desarrollo resguardos indígenas de López Adentro, municipio Caloto, Cauca 2016-2019. Caloto.
- Chávez-Sifontes, M. (2019). La biomasa—fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. Anales de Química de la RSEQ.
- DANE. (16 de Septiembre de 2019). dane. Obtenido de <https://bit.ly/3L7tw4e>
- Deluque Pinto, A. P. (2022). Sistema de gestión de energía para una microrred que considera la generación de electricidad a partir de biomasa. .
- Galán, D. (2012). Gasificación de bagazo de caña de azúcar con aire y vapor para la producción de bio-combustible
- Gutiérrez, A. (2021). Fuentes De Energía Renovable, Recursos Energéticos Distribuidos Y Almacenamiento En Colombia: Una Revisión De La Normatividad (Renewable Energy Sources, Distributed Energy Resources And Energy Storage In Colombia: A Review Of Regulations). PSN: Renewable Resources & Energy.
- Homer Pro 3.11. (s.f.). Homer Energy. Obtenido de <https://bit.ly/44D9iWQ>
- Ministerio de Minas y Energía. (06 de Febrero de 2020). xm. Obtenido de <https://bit.ly/45CNQ5I>
- Muñoz-Arias, C. V.-V.-Á.-C. (2021). Estudio socio-técnico del uso de energías renovables como alternativa de iluminación en las comunidades de las zonas no interconectadas. Revista UIS Ingenierías, 15–28.
- Peña Beltrán, L. E. (2020). Diseño de un biodigestor a partir del aprovechamiento del bagazo de la caña panelera y boñiga de caballo para la generación de biogás en un trapiche ubicado en Guavatá, Santander.
- Resano, D. G. (2022). Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción. Información tecnológica.
- Sandoval, Y. (13 de Julio de 2023). Derivex. Obtenido de <https://bit.ly/3sE9gRq>
- Torres, J. G. (2017). Estudio Comparativo

Entre Las Diferentes Fuentes De Energía Eléctrica En Colombia Y La Generación De Electricidad A Partir De Biomasa.

Ure, J. (2021). Estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por los embalses de las centrales hidroeléctricas del Perú.