

SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EMPLEANDO BIODIGESTIÓN

HADER SANTIAGO SIERRA ECHEVERRI

JUAN ANDRES BARBARAN GUISAO

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2023

SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EMPLEANDO BIODIGESTIÓN

HADER SANTIAGO SIERRA ECHEVERRI

JUAN ANDRES BARBARAN GUISAO

ASESORES

Jortin de Jesús Vargas

Mc. En educación e ingeniero Electricista

Guilda Viviana Dávila Durán

Mc. En educación e Ingeniera Ambiental y de saneamiento.

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2023

Agradecimientos

Quisiéramos expresar nuestro sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera invaluable a la realización de este trabajo de grado. En primer lugar, a nuestros asesores por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. A los profesores que a lo largo de la carrera nos han impulsado a avanzar cada día en la búsqueda de nuevos conocimientos. Además, agradecemos a nuestras familias y amigos por su apoyo emocional y motivación constante. Este logro no habría sido posible sin el respaldo de todos ustedes, y estamos profundamente agradecidos por su dedicación y confianza en nosotros.

Contenido

Introducción	9
1. Planteamiento del problema.....	10
1.1. Descripción	10
1.2. Formulación	11
2. Justificación	12
3. Objetivos.....	13
3.1. Objetivo general.....	13
3.2. Objetivos específicos.....	13
4. Referentes teóricos.....	14
4.1. Biodigestor	15
4.1.1. Tipos de biodigestores	16
4.1.1.1. Biodigestores de flujo discontinuo.....	16
4.1.1.2. Biodigestores de flujo semi - continuo.....	17
4.1.1.3. Biodigestor de mezcla completa	18
4.1.1.4. Biodigestor de flujo pistón	19
4.1.1.5. Producción y consumo de biogás	20
4.1.2. Generador eléctrico.....	20
5. Metodología	23
5.1. Tipo de Proyecto:	23
6. Resultados	24
7. Conclusiones.....	34
8. Referencias.....	35
Anexos	38

Lista de figuras

Figura 1. Estructura de un biodigestor.....	16
Figura 2. Estructura de un biodigestor de flujo continuo	17
Figura 3. Estructura de un biodigestor de flujo semi - discontinuo.....	18
Figura 4. Estructura de un biodigestor de mezcla completa	19
Figura 5. Estructura de un biodigestor de flujo piston.....	20
Figura 6. Componentes de un generador eléctrico	21
Figura 7. Ciclo gas.....	22
Figura 8. Poderes caloríficos de las principales fuentes energéticas	25
Figura 9. Esquema de funcionamiento del sistema de generación	26
Figura 10. Esquema final del proceso de transformación y generación de energía eléctrica	28
Figura 11. Instructivo para el diseño de sistemas de generación eléctrica mediante el proceso de biodigestión.....	33

Lista de anexos

Anexo A. Instructivo para diseñar una planta de generación eléctrica empleando el proceso de biodigestión

Resumen

SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EMPLEANDO BIODIGESTIÓN

HADER SANTIAGO SIERRA ECHEVERRI

JUAN ANDRÉS BARBARÁN GUISAO

En el presente trabajo se plantea la viabilidad de implementar un sistema de generación eléctrica a través de la biodigestión. Actualmente, los residuos orgánicos generados en la institución son destinados a diversas prácticas de compostaje, como Earth Green, compostaje de paleo a cielo abierto y pacas biodigestoras Silva. Sin embargo, hasta el momento, no se ha observado ninguna aplicación orientada a la producción de energía eléctrica a partir de estos residuos. Esta propuesta busca contribuir significativamente a la reducción de la huella de carbono, al disminuir la dependencia de fuentes externas de energía eléctrica y promover prácticas sostenibles dentro de la Institución Universitaria Pascual Bravo. El enfoque de biodigestión se presenta como una alternativa eficiente y respetuosa con el medio ambiente para aprovechar al máximo los recursos orgánicos disponibles y, al mismo tiempo, fortalecer el compromiso de la institución con prácticas ambientales responsables. Este estudio se centrará en analizar las posibilidades técnicas y ambientales de la implementación de dicho sistema, explorando sus beneficios potenciales y destacando la importancia de una gestión energética sostenible en el contexto de la institución educativa.

Palabras claves: biogás, materia orgánica, energía eléctrica, combustión, diseño industrial.

Abstract

The present work proposes the feasibility of implementing a power generation system through biodigestion. Currently, the organic waste generated at the institution is directed towards various composting practices, such as Earth Green, open-air paleo composting, and Silva biodigester bales. However, until now, no application focused on electricity generation from these waste materials has been observed. This proposal aims to significantly contribute to reducing the carbon footprint by decreasing dependence on external sources of electrical energy and promoting sustainable practices within the Institución Universitaria Pascual Bravo. Biodigestion is presented as an efficient and environmentally friendly approach to maximize the utilization of available organic resources while simultaneously strengthening the institution's commitment to responsible environmental practices. This study will focus on analyzing the technical and environmental possibilities of implementing such a system, exploring its potential benefits, and emphasizing the importance of sustainable energy management within the educational institution context.

Keywords: Biogas, organic matter, electric power, combustion, industrial design.

Introducción

Es importante reconocer que la Institución Universitaria Pascual Bravo desde el año 2019 se piensa como un campus verde, inteligente e inclusivo, planteado desde el plan de desarrollo 2019-2022, donde se evidencian múltiples iniciativas desde la sostenibilidad. En términos de aprovechamiento del material orgánico producido en la institución, esta cuenta con diferentes sistemas de compostaje, tales como Earth Green, compostaje de paleo a cielo abierto y pacas biodigestoras Silva; al encontrar que semanalmente se producen 80 kg de materia orgánica (70 kg en cafetería y 10 de zonas verdes), permitió a los autores la posibilidad de aplicar las competencias adquiridas durante el proceso de formación académica mediante el diseño de un sistema de generación eléctrica a pequeña escala empleando el proceso de biodigestión.

Un sistema de biodigestión, permite complementar los sistemas de compostaje existentes en la institución. Cerdá (2012), expone que, un posible uso de la energía producida con biomasa, es la generación de electricidad, lo que, motivó a los autores a materializar este proyecto, trazando una ruta de trabajo que inicia con el estado del arte y termina en el diseño del sistema de generación eléctrica basado en la biodigestión, buscando proveer electricidad para posibles usos dentro de la Institución Universitaria Pascual Bravo, como aquellas actividades que lo requieran dentro del “vivero”.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción

La generación de energía mediante biodigestores ofrece numerosas ventajas, ya que no solo constituye una fuente de energía renovable, sino que también reduce la dependencia de los combustibles fósiles. Además, contribuye a combatir el cambio climático al capturar el metano, un poderoso gas de efecto invernadero, y genera fertilizantes orgánicos de alta calidad como subproductos. Los biodigestores tienen aplicaciones en diversas industrias, incluyendo la agricultura, la ganadería y el tratamiento de aguas residuales.

Este estudio se centró en el diseño de un sistema de generación eléctrica empleando biodigestión que permitiría a los futuros usuarios su posible implementación. Se convirtieron eficientemente los residuos orgánicos, como desechos de alimentos y materiales vegetales, en biogás, una fuente de energía renovable. Es importante resaltar que el biogás resultante se podría usar para la generación de electricidad, contribuyendo así a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero a pequeña escala.

Para llevar a cabo esta investigación, se realizaron visitas de campo y se recolectaron datos para conocer la cantidad y la composición de los residuos orgánicos generados dentro de la universidad, también se evidenció que el uso que se le da a estos residuos no es aprovechado para la generación de energía eléctrica, teniendo en cuenta que la universidad fomenta el uso de energías renovables. Además, se evaluaron las tecnologías de biodigestión disponibles y su idoneidad para nuestra institución. El propósito fundamental de este estudio fue proporcionar un instructivo completo sobre cómo implementar un sistema de generación eléctrica mediante el proceso de biodigestión, y a su vez, se obtuvieron conjeturas sobre los beneficios para la institución universitaria Pascual Bravo.

1.2. Formulación

Uno de los objetivos de este trabajo es dar respuesta a la pregunta ¿Cómo diseñar una planta de generación eléctrica aplicando la biodigestión en la Institución Universitaria Pascual Bravo?, para así contribuir en el desarrollo de energías renovables que beneficien a la institución y con ella a todos los que la integran.

2. Justificación

Según el Banco Mundial (2019), en América Latina y el Caribe se generan aproximadamente un kilogramo de residuos diariamente, lo que equivale a unos 231 millones de toneladas de desechos al año. Más del cincuenta por ciento de estos desechos consiste en alimentos.

Esta situación motiva el aprovechamiento de estos residuos mediante el proceso de biodigestión con el fin de generar energía eléctrica. Es fundamental tener en cuenta que a nivel mundial existe un compromiso claro reflejado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible -ODS (2019). Estos objetivos buscan una transición en las prácticas humanas, apoyándose en el conocimiento y las tecnologías, para crear procesos que sean inclusivos y sostenibles. El ODS número 17, denominado "Energía asequible y no contaminante", engloba dos factores cruciales que son de especial relevancia en este estudio: la sostenibilidad en la generación de energía y la posibilidad de aumentar la disponibilidad de esta en comunidades donde actualmente es escasa.

La discusión y consideración de la generación de energía a través de biodigestores en Antioquia y el Valle de Aburrá se justifica debido a la abundancia de recursos orgánicos disponibles en la región, la necesidad de abordar problemas ambientales y la oportunidad de diversificar la matriz energética hacia fuentes más sostenibles. Esta iniciativa se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, específicamente el ODS 7 ("Energía asequible y no contaminante"), y ofrece una solución integral para la gestión de residuos y la promoción de prácticas ambientalmente responsables en el contexto regional.

La implementación de esta investigación en la Institución Universitaria Pascual Bravo es relevante debido a su compromiso con la sostenibilidad, la oportunidad de aprovechar eficientemente los recursos orgánicos disponibles, reducir residuos y contribuir a la generación de energía renovable. Esto no solo beneficia a la institución en términos de eficiencia energética, sino que también demuestra su liderazgo en prácticas ambientales responsables y ofrece una solución sostenible para sus necesidades energéticas.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Diseñar una planta de generación eléctrica de biodigestión mediante cálculos analíticos para el aprovechamiento de residuos orgánicos en la Institución Universitaria Pascual Bravo.

3.2. Objetivos específicos

Analizar recursos bibliográficos, que permitan conocer los sistemas de generación eléctrica empleando biodigestores, para determinar la viabilidad de este proceso en la Institución Universitaria Pascual Bravo.

Dimensionar los equipos de la planta de generación eléctrica mediante cálculos analíticos para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de generación eléctrica.

Elaborar un instructivo para el diseño de la planta de generación de energía eléctrica mediante el proceso de biodigestión basado en los cálculos analíticos hallados que permitan al usuario una posterior materialización (prototipo)

4. Referentes teóricos

A continuación, se realiza una revisión de los referentes teóricos que abordan el tema de los biodigestores. Los generadores de energía han experimentado un desarrollo continuo a lo largo de los años, desde sus primeros experimentos hasta su adopción generalizada en la actualidad. Como dice Chandra, Takeuchi, Hasegawa, otros. (2012), su evolución ha sido impulsada por la necesidad de aprovechar los recursos orgánicos de manera más eficiente y sostenible, así como por la creciente conciencia sobre la importancia de las fuentes de energía renovable.

Según Santiago Muñoz Machado (1998), Los sistemas eléctricos se consideran como un conjunto de herramientas encargadas de la distribución y generación de energía eléctrica; es así como hoy es posible la navegación en internet, el uso de electrodomésticos en los hogares y las luminarias distribuidas por la ciudad. A los sistemas eléctricos capaces de distribuir energía se les llama "Sistemas eléctricos de potencia," el cual está compuesto, a grandes rasgos, por tres aspectos principales según Mutalic (2003). Estos aspectos son la transmisión, que es la parte encargada de transmitir la energía desde los centros de producción a los centros de consumo; la distribución, que consiste en enviar la energía desde los centros de consumo a cada uno de los consumidores, y, por último, la generación, que es la que se encarga de convertir la energía primaria en energía eléctrica a través del principio de conversión electromecánica de energía. Es este aspecto el que ha permitido a la humanidad el avance tecnológico que se evidencia en la actualidad.

Ahora bien, según Antonio Colino Martínez y Rafael Caro (2010), existen diferentes tipos de generación de energía y estos se clasifican según la fuente de energía primaria utilizada. Es así como se obtienen varios tipos de generación de energía: Hidráulica, eólica, solar, biomasa, geotérmica, nuclear. La energía hidráulica es la producida a partir del movimiento del agua, la eólica es la energía producto del movimiento de las palas de un aerogenerador por acción del viento, la solar es aquella que proviene del aprovechamiento de la radiación electromagnética del sol, la de biomasa es la obtenida a partir de la combustión de materia orgánica, la geotérmica es la producida a partir del aprovechamiento del calor interior de la tierra y la nuclear es la energía eléctrica que se produce a partir de la energía que une a los neutrones y protones.

Por otro lado, la energía de biomasa o bioenergía es la encargada de generar energía eléctrica a partir de residuos de la agricultura y la forestación. Su funcionamiento proviene de la combustión de estos productos, pues este proceso genera la liberación de gases como el CO₂. Este nivel de CO₂ liberado es el mismo consumido por estos residuos, lo que mantiene un nivel constante de CO₂ atmosférico, trayendo muchos beneficios medioambientales. La energía que produce este proceso de generación, depende del tipo de biomasa utilizada y su uso está clasificado en calefacción, generación eléctrica y producción de biocombustibles Édgar (Santoyo, 2010; Barragán, 2010).

Según Édgar (Santoyo, 2010; Barragán, 2010), existen cuatro tipos de biomasa: Natural, que es aquella producida sin intervención humana, la residual seca que es la producida en actividades agrícolas, la residual húmeda es la producida por vertidos biodegradables que se forma por aguas residuales y la de los cultivos energéticos que hace referencia a toda la biomasa transformable en combustible como cereales y otros.

4.1. Biodigestor

Según la RAE, Los biodigestores son tanques herméticamente cerrados, que permiten ser cargados con residuos orgánicos, de origen animal como excretas y vegetal como los desechos después de la preparación de alimentos.

Los biodigestores por medio del proceso anaeróbico ayudan a la proliferación de bacterias, las cuales comienzan el proceso de descomposición de un material orgánico que producirá biogás y fertilizante natural, para que este proceso se pueda llevar a cabo de una forma adecuada el biodigestor debe cumplir con algunas condiciones específicas de topografía, temperatura, localización, y capacidad agrológica como se ve en la *Figura 1*.

Figura 1.

Estructura de un biodigestor.



Nota. Tomado de https://www.bioguia.com/innovacion/biodigestores_29295392.html

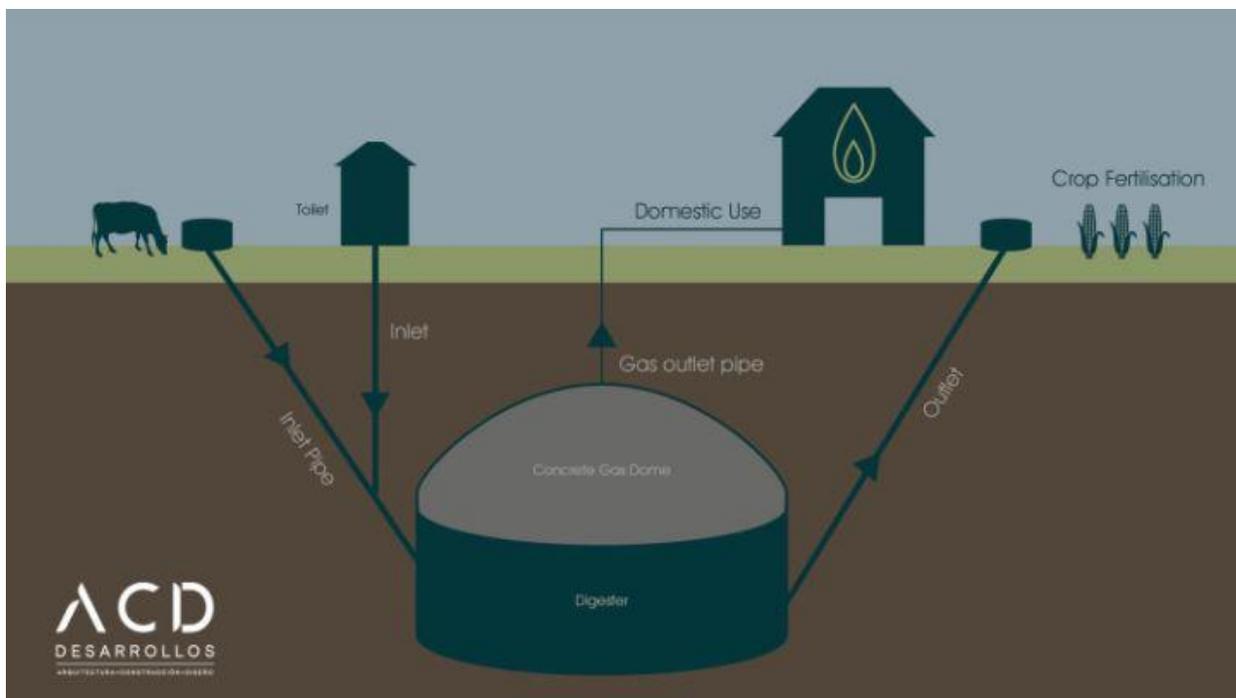
4.1.1. Tipos de biodigestores

4.1.1.1. Biodigestores de flujo discontinuo

Son aquellos en los cuales el flujo no pasa continuamente, sino que son reactores cerrados en los cuales una vez han sido cargados con la materia orgánica no permiten extraer o añadir algún sustrato hasta que no finalice su proceso de biodegradación o producción de biogás, como se muestra en la *Figura 2*.

Figura 2.

Estructura de un biodigestor flujo discontinuo.



Nota. Tomado de <https://www.desarrollosacd.com/tipos-de-biodigestores-cual-es-la-mejor-opcion/>

4.1.1.2. Biodigestores de flujo semi - continuo

Este tipo de biodigestores diariamente son alimentados con una carga pequeña comparada al contenido total del mismo. su diferencia respecto al discontinuo radica en que los procesos de carga y descarga se realizan en tiempos determinados en el proceso de producción del biogás y a su vez producen los nutrientes necesarios para las comunidades de bacterias encargadas del proceso de descomposición de la materia orgánica, como se muestra en la **Figura 3**; uno de sus usos principales es la purificación de agua contaminada, y con base a su sistema constructivo existen tres tipos básicos:

- ✓ Biodigestor de globo o salchicha.
- ✓ Biodigestores de domo fijo.
- ✓ Biodigestor de domo flotante.

Figura 3.

Estructura de un biodigestor flujo semi - continuo.



Nota. Tomado de <https://www.desarrollosacd.com/tipos-de-biodigestores-cual-es-la-mejor-opcion/>

4.1.1.3. Biodigestor de mezcla completa

Este tipo de biodigestor tiene la particularidad de que la carga de materia orgánica que se introduce periódicamente se mezcla casi en su totalidad con el contenido ya presente en la cámara de digestión. Debido a que la carga y descarga del sustrato es un proceso muy continuo, se requiere de disponibilidad permanente de desechos orgánicos, tal como se muestra en la **Figura 4**.

Figura 4.

Estructura de un biodigestor de mezcla completa.



Nota. Tomado de <https://www.desarrollosacd.com/tipos-de-biodigestores-cual-es-la-mejor-opcion/>

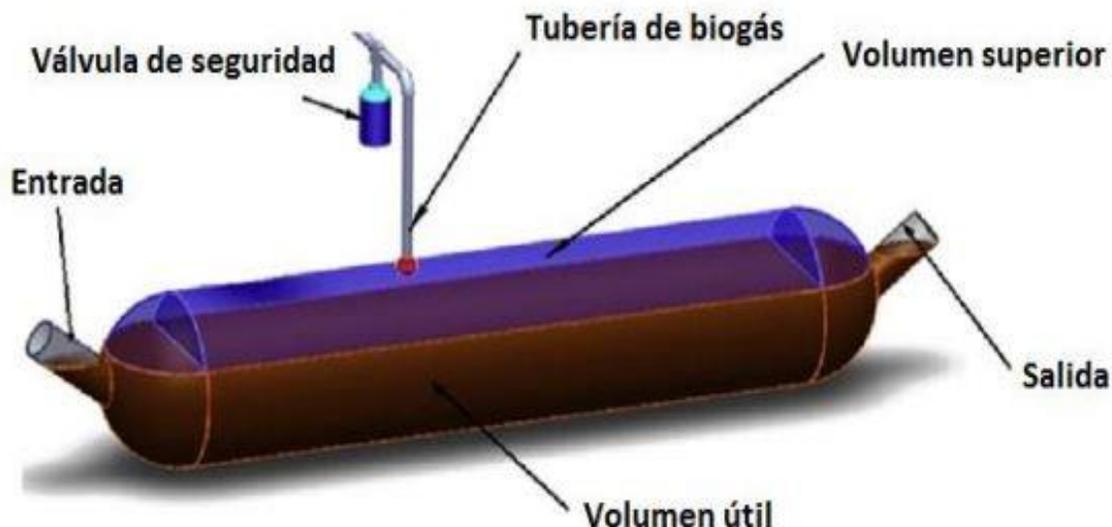
4.1.1.4. Biodigestor de flujo pistón

De acuerdo con Mazumdar (1982) este modelo de biodigestor de bajo costo fue desarrollado por Chung Po de Taiwán utilizando goma de neopreno inflable y es especialmente popular en China. Se caracteriza por tener una cámara de digestión alargada, lo cual provoca que la descomposición del material orgánico transcurra a medida que se desplaza a lo largo del biodigestor, como se muestra en la *Figura 5*.

Este diseño combina la cámara de digestión, el tanque de sedimentación y el gasómetro en una sola unidad. La materia orgánica no ocupa todo el volumen del digestor, ya que debe quedar un espacio para el gas. Así, a medida que la bolsa se hincha, el gasómetro se va formando y llenando. El funcionamiento de este digestor se basa en la tecnología de digestión anaeróbica plug-flow o de flujo pistón, por la forma en la que se desplaza la carga en su interior,

Figura 5.

Estructura de un biodigestor de flujo pistón.



Nota. Tomado de https://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2017/12/Garcia-Rafael_biodigestor.pdf

4.1.1.5. Producción y consumo de biogás

En este proceso realizado por bacterias la digestión anaeróbica proceso biológico en el cual la materia orgánica es degradada por bacterias que no requieren oxígeno para su metabolismo, se libera una mezcla de gases (55 a 70%) formada por: Metano (CH_4), Dióxido de carbono (CO_2), Hidrógeno (H_2), Sulfuro de Hidrógeno (H_2S), Nitrógeno (N), Amoniaco (NH_3), conocido como biogás el cual diversas aplicaciones tales como: calefacción por combustión en calderas de vapor, generadores eléctricos, combustible para motores, entre otros, como se muestra en la **Figura 7**.

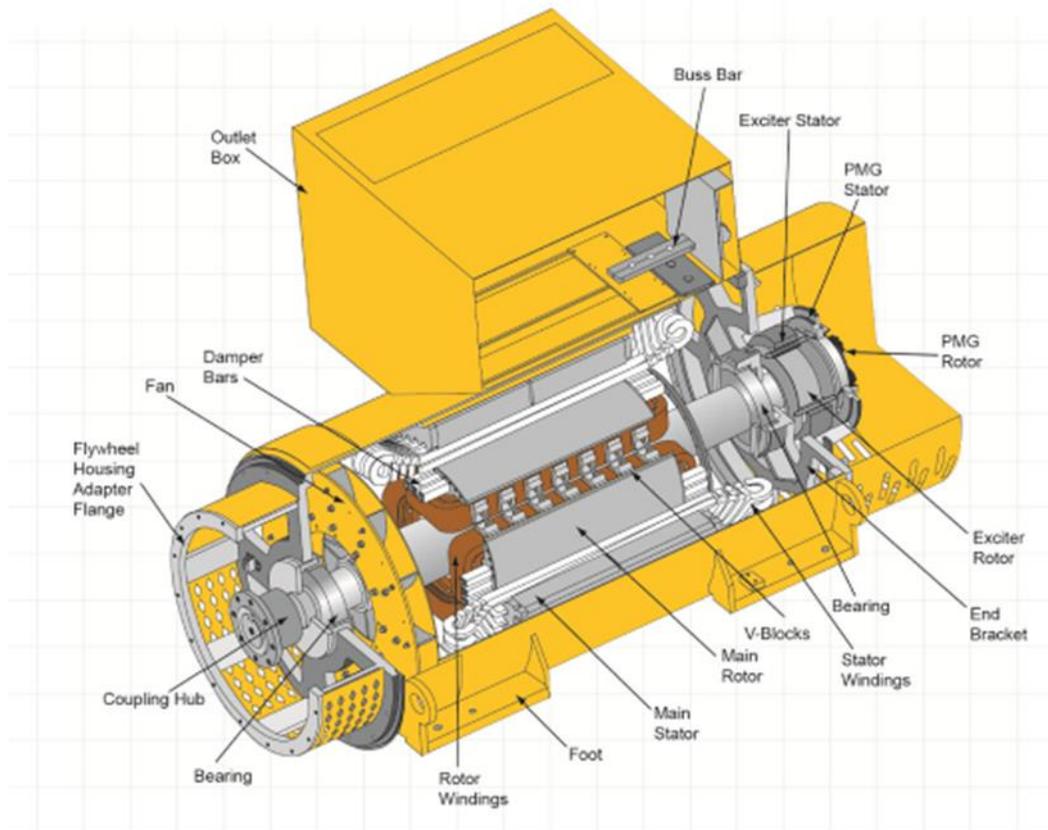
4.1.2. Generador eléctrico

Los generadores de corriente alternan, son máquinas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica. La mayoría son de corriente alterna síncrona, lo que significa que giran a la velocidad de sincronismo, que está relacionada con el número de polos que tiene la máquina y

la frecuencia de la fuerza electromotriz. Esta relación hace que el motor gire a la misma velocidad que le impone el estátor a través del campo magnético, para entender cómo funciona un generador eléctrico se puede comprender los componentes internos de este como se muestra en la **Figura 6**.

Figura 6.

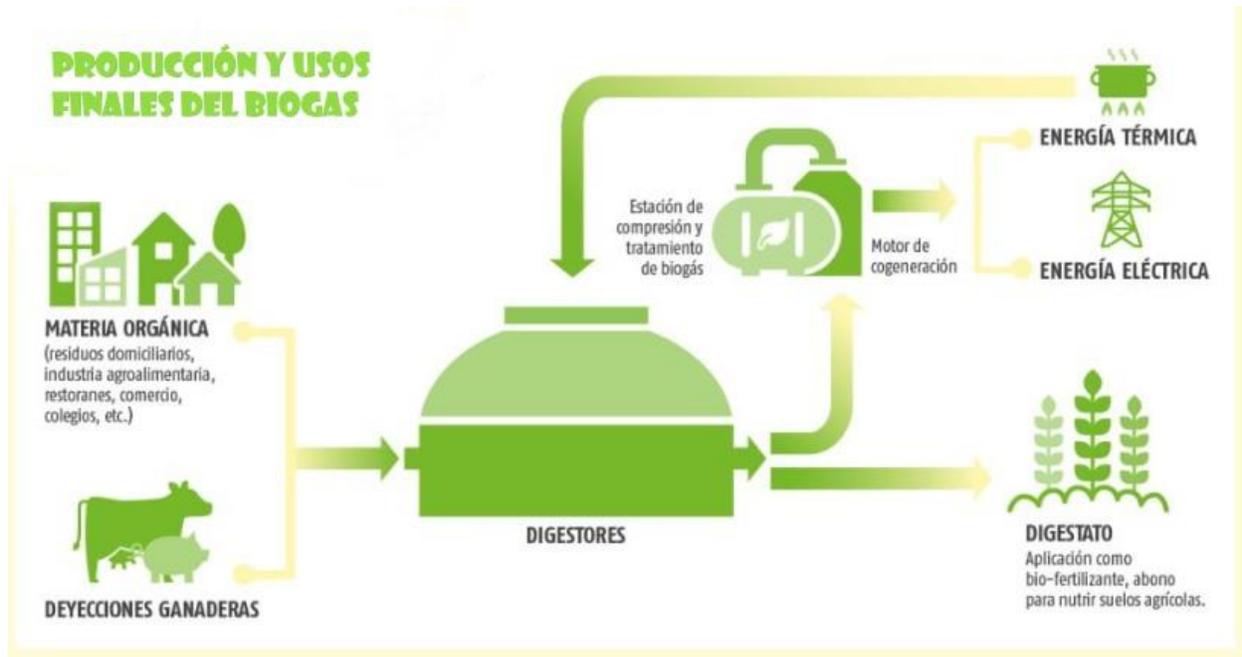
Componentes de un generador eléctrico.



Nota. Tomado de <https://inelinc.com/>

Figura 7.

Ciclo biogás.



Nota. Tomado de

<https://www.paiscircular.cl/economia-circular/el-panorama-de-los-biodigestores-en-chile-una-alternativa-para-la-gestion-de-los-residuos-organicos/>

5. Metodología

5.1. Tipo de Proyecto:

El presente trabajo consta de dos partes, una de revisión de literatura y otra práctico-teórica. La revisión permitió obtener información de diferentes investigaciones para aportar datos relevantes sobre la generación de energía a partir de biodigestores y así encontrar resultados obtenidos de datos reales (práctico-teórica) como el peso de los compuestos orgánicos producidos semanalmente en la Institución Universitaria Pascual Bravo en el año 2023.

5.2. Método

Para la ejecución de revisión de literatura, se consultaron diversas bases de datos relacionadas con generación de energía, electricidad, biodigestores y fuentes de energía usadas en la actualidad. Además, se consultó con las personas encargadas del manejo de los residuos orgánicos de la institución para promediar la cantidad de materia orgánica producida, para después calcular la potencia y la energía eléctrica diaria disponible que tendría en el biodigestor con la cantidad de materia orgánica en cuestión, y determinar el generador más adecuado para la producción de energía a partir de este biocombustible.

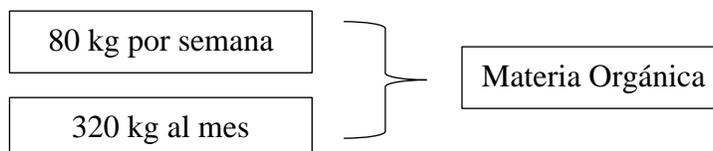
6. Resultados

Actualmente en la Institución Universitaria Pascual Bravo, se generan 80 kg de materia orgánica, producto de desechos de la preparación de los alimentos en el área de la cafetería 70 kg y 10kg de materia vegetal producto de las zonas verdes, tales como hojas y hierba.

Según Payan García, Oswaldo Moisés y Corea Urbina, Ezequiel (2013), para la obtención del biogás se determina con base a la proporción 1-2 (500 g de agua y 250 g de materia orgánica) con la cual se puede obtener 290 ml de biogás.

Por lo tanto, al aplicar la siguiente fórmula se puede determinar la cantidad de biogás obtenido.

$$\begin{array}{l} 0.250 \text{ kg} \text{ ----- } 0.290 \text{ ml} \\ 80 \text{ kg} \text{ ----- } X \quad \text{VALOR} = 92.8 \text{ ml} \end{array}$$



Calculando la energía teórica mensual:

$$E = m * PCI$$

Donde: *E*: Energía química del sistema

m: Flujo másico material orgánico

PCI: Poder calorífico inferior del gas

$$E = 320 \text{ kg (PCI)} \rightarrow 320 \text{ kg/mes}$$

Segundos al mes ≈ 730.5 segundos

$$\frac{320\text{kg}}{730.5\text{h}} = 0.4380 \text{ kg/h}$$

$$E = 0.4380 \text{ kg/h} * (\text{PCI})$$

Posible PCI a tomar de Metano, y su valor es de: 13.89 kW/kg, el cual es obtenido a partir de la **Figura 8**. Así al retomar la ecuación de energía, se tiene que:

$$E = (0.4380 \text{ kg/h}) * (13.89 \text{ kW} \cdot \text{h/kg})$$

$$E = 6.083 \text{ kW}$$

Energía teórica de salida: 6.083 kW

Figura 8.

Poderes caloríficos de las principales fuentes energéticas.

Tipo de combustible		PCI (G.J/l)	PCI (kWh/Kg)	PCI (kcal/Kg)	PCI (Btu/l)	PCI (tep/miles de litros)	PCS (MJ/Nm ³)	PCS (kcal/Nm ³)
Petróleo y productos petrolíferos	Petróleo Bruto	42.55	11.82	10.190	1.0190			
	Materias primas de refinería	39.88	11.08	9.550	0.9550			
	GLP	45.89	12.75	10.990	1.0990			
	Propano	46.20	12.83	11.063	1.1063			
	Butano	44.78	12.44	10.723	1.0723			
	Queroseno	42.89	11.91	10.270	1.0270	0.8244		
	Gasolina	43.89	12.19	10.510	1.0510	0.7752		
	Gasolina aviación	43.89	12.19	10.510	1.0510	0.7357		
	Gasóleo automoción	42.47	11.80	10.170	1.0170	0.8467		
	Otros gasóleos	42.47	11.80	10.170	1.0170	0.8467		
	Fuelóleo	39.88	11.08	9.550	0.9550			
	Alquitrán	39.88	11.08	9.550	0.9550			
	Nafta	43.89	12.19	10.510	1.0510			
	Lubricantes	39.88	11.08	9.550	0.9550			
	Coque de petróleo	31.90	8.89	7.640	0.7640			
	GNL	45.10	12.53	10.800	1.0800			
	Gases	Gas natural						40.474
Metano		50.00	13.89	11.973	1.1973			
Etano		47.51	13.20	11.350	1.1350			
Gas de refinería		49.36	13.71	11.820	1.1820			
Gas de coquería							19.01	4.540
Gas de alto horno							2.89	690
Biogases en general							21.77	5.200
Biogás pobre							15.51	3.705
Biogás de vertedero							20	4.775
Biogás de depuradora							26	6.327

Fuentes: Eurostat, AIE y Resolución de la Secretaría de Estado de Energía de 27 de diciembre de 2013.

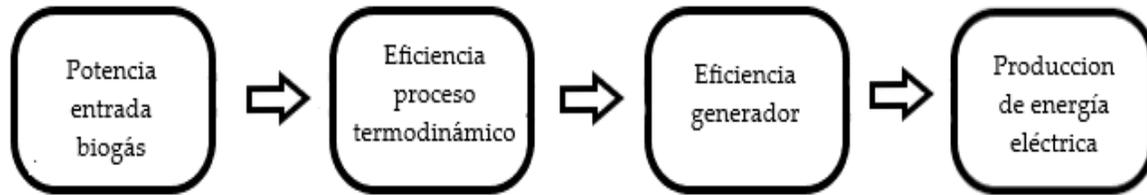
<https://ingemecanica.com/tutoriales/objetos/tablas/calorifico/calor49.jpg>

6.1.Cálculo de energías para determinar el generador

Para realizar el cálculo energético se realizó el análisis que se muestra a continuación, partiendo del siguiente esquema de funcionamiento del sistema de generación eléctrica el cual se puede observar en la **Figura 9** y el cálculo matemático anteriormente mostrado.

Figura 9.

Esquema funcionamiento del sistema de generación.



Nota. Fuente diseño propio.

6.2.Transformación de energías.

Por procesos termodinámicos, la energía que entra al sistema se convierte en una energía mecánica, más una energía de desecho; es decir, del 100% de la energía que entra al sistema, el 30% de esta se convierte en energía mecánica, más energía de desecho. Esto significa que, para este sistema, la eficiencia termodinámica es igual al 30%.

Cabe resaltar que se seleccionó el 30% debido a que es la mayor eficiencia para el análisis de procesos termodinámicos:

$$n = \frac{E. \text{mecánica}}{E. \text{Entra al sistema}} \quad \therefore E. \text{mecánica} = E. \text{Entra al sistema} \times n$$

Reemplazando los valores de la ecuación anterior obtenemos que:

$$30\% = \frac{E. \text{mecánica}}{6.083KW} \quad \therefore E. \text{mecánica} = 6.083KW \times 30\% \rightarrow 1,824.9KW$$

La energía mecánica calculada sería la energía que ingresa al generador y con ello se determina la potencia eléctrica que entregará el generador.

6.3.Consideraciones: Debido a que las velocidades estándar de los generadores (comerciales) son (900, 1200, 1800, 3600) rpm, se realiza el cálculo para un generador a 1200rpm como se argumenta en la siguiente ecuación:

$$nm = \frac{120 \times fe}{\#P}$$

Donde: nm : Velocidad angular

120: Valor constante

fe : Frecuencia eléctrica "para Colombia 60hz".

$\#P$: Número de polos, este número se asigna con un valor que permita determinar una velocidad comercial.

Reemplazando valores en la ecuación anterior obtenemos que:

$$nm = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

6.4. Análisis para el cálculo del generador

Debido a que la eficiencia promedio de un generador eléctrico es aproximadamente el 80% procedemos a determinar la energía eléctrica que nos entregará el generador:

$$n = \frac{E. Salida (Eléctrica)}{E. Entrada (Mecánica)}$$

Despejando nuestra variable requerida y reemplazando los valores, obtenemos que:

$$E. Entrada (Mecánica) \times 80\% = E. Salida (Eléctrica)$$

$$1,824.9KW \times 80\% = 1,459.9KW$$

Donde: $E. Entrada$.: Energía de entrada

n : Eficiencia generador.

$E. Salida$: Energía eléctrica que entrega el generador.

Este valor 49.68w es la cantidad de energía que se obtiene durante un mes después de restar las pérdidas durante el proceso de transformación. Ahora bien, se procede a calcular la

energía eléctrica que diariamente va ser utilizada para un fin determinado con la siguiente operación:

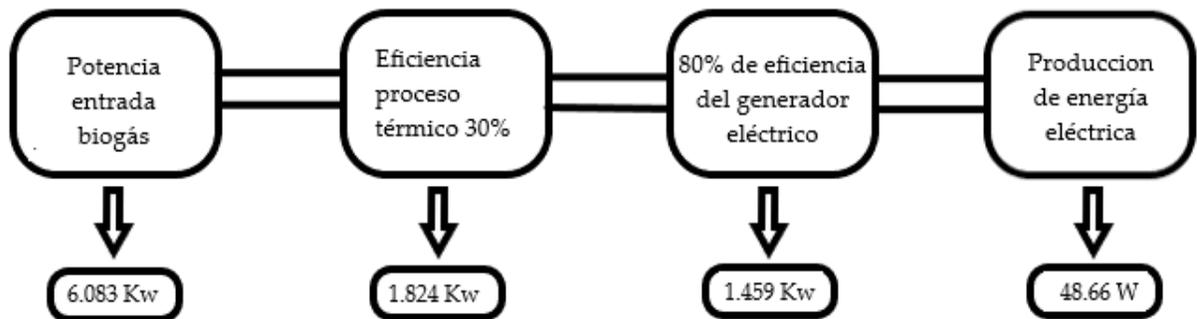
$$\text{Energía eléctrica diaria disponible } \left(\frac{W}{\text{dia}} \right) = \frac{1,459.9 \text{KWmes}}{30 \text{ dias}} \rightarrow = 48.66 \text{W/dia}$$

De lo anterior podemos deducir que diariamente contaríamos con una potencia de 48.66w.

Luego de haber calculados los diferentes tipos de energías teniendo como referencia el esquema de funcionamiento de generación mostrado en la **Figura 9**, podemos evidenciar como se transformó esta al pasar por los diferentes procesos de transformación de energía, hasta llegar al valor de producción de energía diaria, como se muestra en la **Figura 10**.

Figura 10.

Esquema final del proceso de transformación y generación de energía eléctrica.



Nota. Fuente diseño propio.

Para determinar el torque de giro del generador se hace a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{\text{mecánica}} = \text{Tap} \times Wn$$

Donde: $P_{\text{mecánica}}$: Potencia mecánica

Tap : Torque aplicado

W_n : Velocidad angular.

Ahora hallamos la velocidad angular a partir del siguiente factor de conversión:

$$W_n = \frac{1200 \text{ Rev}}{1 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ Rev}} = \frac{125 \text{ rad}}{\text{s}}$$

Reemplazando este valor en la ecuación anterior obtenemos que:

$$1824.9 \text{ w} = \text{Tap} \times \frac{125 \text{ rad}}{\text{s}}$$

Pero: $1824.9 \text{ w} = 1824.9 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$

Y despejando nuestra variable requerida:

$$\text{Tap} = \frac{1824.9 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}}{125 \frac{\text{Rad}}{\text{s}}} = 14.59 \text{ Nm}$$

Si hipotéticamente se requiriera tener una generación de energía eléctrica diaria de 10kw para electrificar por ejemplo un aula dentro la Institución Universitaria Pascual Bravo, podríamos a partir de este valor y basándonos en los cálculos anteriores obtener la potencia de la fuente principal y la cantidad de material orgánico para llegar al objetivo propuesto. Tal como se muestra continuación:

De la formula del cálculo del generador

$$n = \frac{E. \text{ Salida (Eléctrica)}}{E. \text{ Entrada (Mecánica)}}$$

$$80\% = \frac{10 \text{ Kw}}{E. \text{ Entrada (Mecánica)}}$$

Despejando nuestra variable requerida y reemplazando los valores, obtenemos que:

$$E. \text{ Entrada (Mecánica)} = \frac{E. \text{ Salida (Eléctrica)}}{80\%}$$

$$E. \text{Entrada (Mecánica)} = \frac{10Kw}{80\%} = 12.5Kw$$

Para determinar la cantidad de potencia que se debe tener al ingreso del proceso termodinámico lo despejamos de la ecuación ya conocida, tal como se muestra a continuación:

$$n = \frac{E. \text{mecánica}}{E. \text{Entra al sistema}} \quad \therefore E. \text{mecánica} = E. \text{Entra al sistema} \times n$$

$$E. \text{Entra al sistema} = \frac{E. \text{mecánica}}{n}$$

Reemplazando los valores de la ecuación anterior obtenemos que:

$$E. \text{Entra al sistema} = \frac{12.5Kw}{30\%} = 41.66Kw$$

Esto nos indica que la fuente de energía principal debe tener una potencia mínima de 41.66Kw para poder obtener a la salida del generador eléctrico 10kw de energía eléctrica.

Con base a los a los valores obtenidos de los cálculos realizados, procedemos al cálculo del generador, la velocidad y el torque.

Para este apartado utilizaremos la misma velocidad empleada en los cálculos anteriores, debido a que esta no tiene una variable condicionante. 1

$$nm = \frac{120 \times fe}{\#P}$$

$$nm = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

Para determinar el torque de giro del generador se hace a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{\text{mecánica}} = Tap \times Wn$$

Reemplazando los valores conocidos y despejando nuestra variable requerida.

$$T_{ap} = \frac{12500 \frac{Nm}{s}}{125 \frac{Rad}{s}} = 100 Nm$$

Cálculo de la cantidad de materia orgánica y vegetal para producir 10kv de energía diaria.

Energía teórica de salida: 41.66 kW

Devolviéndonos y despejando el flujo masico a partir de la siguiente ecuación, obtenemos que:

$$E = m * PCI$$

$$41.66 kW = m * (13.89 kW*h/kg)$$

$$\text{Entonces } m = \frac{E}{PCI} = \frac{41.66 kW}{13.89 kW*h/kg} = 2.999 kg/h$$

Ahora determinamos la cantidad de materia orgánica despejándola de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{materia organica (kg)}}{730.5h} 2.999 kg/h$$

$$\text{materia organica (kg)} = 730.5h * 2.999 \frac{kg}{h} = 2190.76kg$$

Con base a lo anterior podemos concluir que para tener 10kw de energía eléctrica diaria, necesitaríamos una fuente principal con un volumen mensual de 2190.76kg de materia orgánica con una producción de energía de mínimo 41.66Kw de potencia, un generador de igual potencia mecánica mínimo 12.5Kw, a 1200 rpm y un torque de 100Nm.

Finalmente, después de dar solución a los anteriores objetivos específicos, se procede a realizar el instructivo a partir de un diagrama de flujo, el cual permitirá comprender cada uno de los factores que se deben tener en cuenta para implementar este mismo diseño.

Paso a paso para implementar satisfactoriamente un sistema de generación eléctrica empleando biodigestión.

El paso a paso que se detalla a continuación corresponde al diagrama de flujo para el diseño de generación eléctrica, el cual se muestra en la *Figura 11*.

Fuente: Ésta debe ser si o si materia orgánica de origen animal o vegetal, sino es ninguna de esta, no se puede proceder con el diseño del sistema de generación de energía eléctrica.

Calculo Fuente: Para realizar un correcto cálculo de la fuente se debe tener en cuenta, que la temperatura de la materia orgánica que se tomó para este diseño esta entre los 30°C a 35°C, debido a que es donde se combinan las mejores condiciones para la proliferación de las bacterias y una mayor producción de metano a corto tiempo de retención de los desechos orgánicos dentro del biodigestor. Si la temperatura de la materia orgánica se encuentra fuera de estos rangos puede variar la cantidad de energía que produzca la fuente.

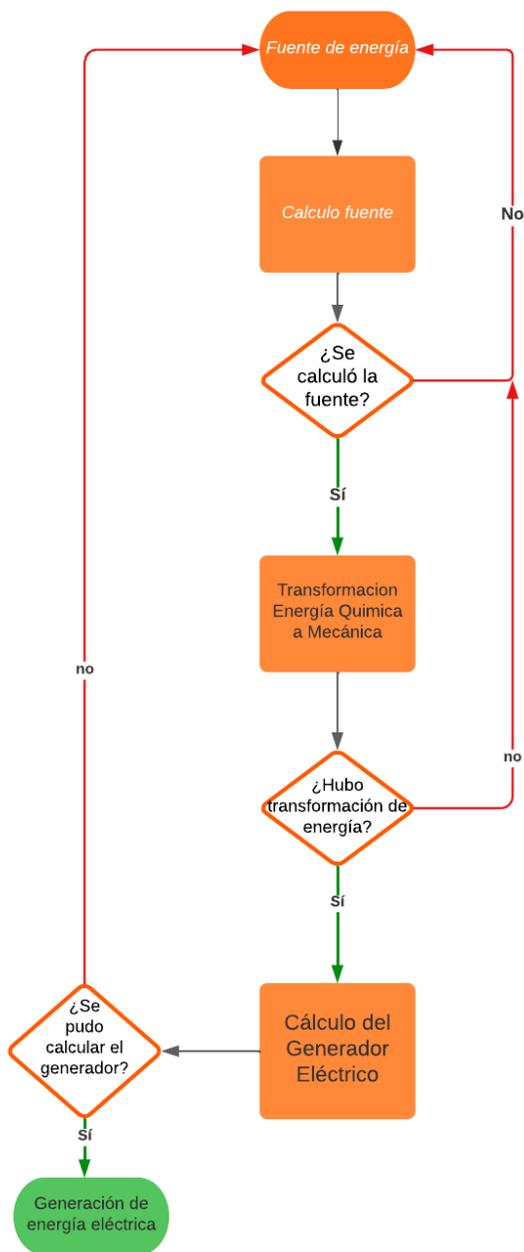
Además, cabe resaltar que el biodigestor más adecuado para estos diseños a pequeña escala de producción, sería los biodigestores tipo pistón.

Transformación de la energía: Después de haber realizado los pasos anteriormente descritos, se puede reemplazar los valores en las ecuaciones pertinentes a este procedimiento, los cuales se encuentran en el documento.

Cálculo del generador: Generalmente el generador se calcula a la misma capacidad de la energía mecánica que se obtiene después de pasar por el proceso termodinámico. Es importante tener en cuenta que no siempre los valores obtenidos en cuanto al torque (Nm) y velocidad sincrónica (rpm) coinciden con un generador comercial, por lo que en ocasiones se deberá construir uno de acuerdo a nuestras necesidades.

Figura 11.

Diagrama de flujo para el diseño de sistemas de generación de energía eléctrica mediante el proceso de biodigestión.



Nota. Fuente diseño propio.

7. Conclusiones

Gracias a la metodología implementada, se logró demostrar de manera matemática la viabilidad de la generación de energía eléctrica a pequeña escala mediante biodigestores en la Institución Universitaria Pascual Bravo

La aplicación de biodigestores para la generación de energía en la Institución Universitaria Pascual Bravo tiene un impacto ambiental positivo al aprovechar residuos orgánicos para la producción de energía. Esto conlleva a la reducción de residuos, a la disminución de la huella de carbono y a la promoción de prácticas sostenibles en la comunidad universitaria.

Si se desea obtener una producción específica de energía eléctrica, es necesario garantizar los valores mínimos requeridos en la entrada del sistema. Esto implica, principalmente, contar con una fuente adecuada de materia orgánica que permita satisfacer la demanda necesaria.

Los hallazgos de esta investigación indican que la generación de electricidad mediante biodigestores es una alternativa factible en instituciones educativas y ambientes afines. Este enfoque podría servir como un punto de referencia para otras instituciones que aspiren a establecer sistemas de generación de energía sostenible y administrar eficazmente sus recursos orgánicos.

Para este tipo de proyectos de generación a pequeña escala, se recomienda el uso de biodigestores tipo pistón, debido a que son más prácticos eficientes y versátiles permitiendo una mayor producción de biogás y biofertilizantes.

8. Referencias

- A. Mazumdar, Consolidation of Information: Biogas Handbook, París: United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, 1982. Disponible en [link]
https://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2017/12/Garcia-Rafael_biodigestor.pdf..
- Banco Mundial. (2019, March 6). Convivir con basura: el futuro que no queremos. Banco Mundial. Retrieved October 2, 2023, disponible en
<https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2019/03/06/convivir-con-basura-el-futuro-que-no-queremos>
- Cerdá. (2012). *Energía obtenida a partir de biomasa*. ResearchGate. Retrieved October 10, 2023. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Emilio-Cerda/publication/277264682_Energia_obtenida_a_partir_de_biomasa/links/5a699bf0a6fdccf8849594f8/Energia-obtenida-a-partir-de-biomasa.pdf
- Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T., & Kumar, R. (2012). Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. *Energy*, 43(1), 273-282. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.029>
- EL SISTEMA ELÉCTRICO. (2006, June 15). Retrieved October 12, 2023, Disponible en
<https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/844814807X.pdf>
- ENERGÍA*. (n.d.). Revista Ciencia. Retrieved October 12, 2023, Disponible en
https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaGeotermica.pdf
- Gómez-Restrepo, J. D., Montoya-Botero, L. F., Londoño-Quintero, L. C., & Echeverri-Herrera, J. C. (2021). Potencial de la biodigestión para la producción de energía eléctrica en Colombia. *Energy Conversion and Management*, 227, 1109-1120.
https://www.academia.edu/44436306/Termodin%C3%A1mica_8va_Edicion

I. Ferrer, M. Garfi, E. Uggetti, L. Ferrer-Martí, A. Calderon y E. Velo, «Biogas production in low - cost household digesters at the Peruvian Andes,» *Biomass and Bioenergy*, pp. 1668-1674, 2011.

Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. (2019, March 9). ScienceDirect. Retrieved October 10, 2023, Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421200309X?via%3Dihub>

Instituto, B. (. (2003). *Plantas de biogás: diseño, construcción y operación.*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/28703>.

Introducción a los Sistemas Eléctricos de Potencia. (n.d.). SciELO Bolivia. Retrieved October 12, 2023, Disponible en http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892003000100005

Martínez-Hernández, F. J., & Martínez-Hernández, J. A. (2022). Biodigestión de residuos sólidos urbanos para la generación de energía eléctrica en América Latina y el Caribe: una revisión. *Sustainability*, 15(1), 12-27. (Referencia de la justificación a nivel global)

Payan García, Oswaldo Moisés y Corea Urbina, Ezequiel (2013) Propuesta de generación de energía eléctrica a través de turbinas de 10KW usando biogás en la UNAN-Managua. Otra thesis, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua. Disponible en <https://repositorio.unan.edu.ni/8274/>

Qué es un biodigestor y cómo funciona el biogás. (n.d.). Fundación Aquae. Retrieved October 12, 2023, Disponible en <https://www.fundacionaquae.org/wiki/biodigestor/>

SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA. (n.d.). Dialnet. Retrieved October 12, 2023, Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4548653.pdf>

Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas, quinta edición, Mc Graw Hill Educación, pag 151, 168,171. Disponible en

<https://ia903201.us.archive.org/8/items/266539159MaquinasElectricasChapman5taEdicionPdf/266539159-Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf>

United Nations. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Anexos

Anexo A. Instructivo para diseñar una planta de generación eléctrica empleando el proceso de biodigestión.

Instructivo para implementar una planta de generación eléctrica empleando biodigestión.

Elaborado por:

HADER SANTIAGO SIERRA ECHEVERRI

JUAN ANDRES BARBARAN GUISAO

Estudiantes de tecnología eléctrica.

Paso 1. Determinar la fuente de energía principal.

La fuente de energía para este sistema de generación debe ser por medio de materia orgánica (residuos de la agricultura, tales como hojas, cascara, desechos de alimentos, heces animales y de humanos y forestales como la poda de grama, hojas de árboles, entre otros), sin esta fuente de energía no sería posible la implementación de este proyecto.

Paso 2. Cálculo de energía producida por la fuente.

Para determinar la energía que produce la fuente (materia orgánica) se hace con base a la siguiente ecuación:

$$E = m * PCI$$

Donde:

E: Es la energía química que produce la fuente, se da en unidades de (W).

m: Es el flujo másico, es decir la cantidad en Kg de materia orgánica disponible,

PCI = Poder calorífico de la fuente energética, es decir el gas en mayor proporción que se

presenta en la energía química producida, el cual posee un valor de 13.89 kwh/kg.

Paso 3. Proceso de transformación de energías.

En este paso es fundamental comprender que se necesita una transformación de energía química a energía mecánica (para producir movimiento) Cabe resaltar que, por procesos termodinámicos, la energía que entra al sistema se convierte en una energía mecánica, más una energía de desecho; es decir, del 100% de la energía que entra al sistema, el 30% de ésta se convierte en energía mecánica, más energía de desecho. Esto significa que, para este sistema, la eficiencia termodinámica es igual al 30%. Además, esto es indispensable para el cálculo del generador, y esta dada por la siguiente ecuación:

$$n = \frac{E. mecánica}{E. Entra al sistema}$$

n: Es la eficiencia del proceso termodinámico.

E. mecánica: Es la energía mecánica que sale del proceso termodinámico.

E. Entra al sistema: Es la energía química que ingresa al proceso termodinámico.

Por lo tanto, para calcular la energía mecánica simplemente se despeja ésta de la formula, quedando de la siguiente manera:

$$E. mecánica = E. Entra al sistema * n.$$

Paso 4. Cálculo del generador eléctrico.

Para realizar el cálculo del generador es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las velocidades estándar de los generadores (comerciales) son (900, 1200, 1800, 3600) rpm.
- La eficiencia promedio de los generadores eléctricos es aproximadamente el 80%, es decir del 100% de energía mecánica que ingresa en él, solo el 80% es transformado en energía eléctrica. Y se puede

determinar a partir de la siguiente ecuación (1):

$$n = \frac{E. Salida (Eléctrica)}{E. Entrada (Mecánica)}$$

Donde:

n: Es la eficiencia del generador.

E. Salida: Es la energía eléctrica producida por el generador.

E. Entrada: Es la energía mecánica que entra al generador

Por lo tanto, para calcular la energía eléctrica simplemente se despeja ésta de la formula, quedando de la siguiente manera:

$$E. Entrada Mecánica * n = E. Salida (Eléctrica)$$

- Para el generador eléctrico se calcula su potencia de igual capacidad a la energía mecánica.

Para calcular la velocidad sincrónica (rpm) se hace con base a la siguiente ecuación (2):

$$nm = \frac{120 x fe}{\#P}$$

Donde:

nm: Velocidad angular.

120: Valor constante.

Fe: Frecuencia eléctrica (para Colombia 60Hz), puede variar según el país.

#P: Número de polos, este número se asigna con un valor que permita determinar una velocidad comercial.

Para determinar el torque de giro del generador se calcula a partir de la siguiente ecuación (3):

$$P_{mecánica} = Tap x Wn$$

Donde:

Pmecánica: Potencia mecánica.

Tap: Torque aplicado.

Wn: Velocidad angular.

Y para determinar la velocidad angular (Wn) se calcula a partir de la siguiente ecuación (4):

$$Wn = \frac{(rpm) Rev}{1 min} x \frac{1 min}{60 s} x \frac{2\pi rad}{1 Rev} = \frac{(x) rad}{s}$$

Reemplazando este valor en la ecuación (3), tenemos que:

$$P_{mecánica} = Tap * \frac{(x) rad}{s}$$

Pero:

$$P_{mecánica} (W) = P_{mecánica} \frac{Nm}{s}$$

Ahora reemplazando la velocidad angular (Wn) en la ecuación (3) y despejando nuestra variable Nm (torque aplicado), tenemos que:

$$Tap = \frac{P_{mecánica} \frac{Nm}{s}}{(X) \frac{Rad}{s}} = (X) Nm$$

Para determinar la cantidad energía eléctrica diaria (E. Elec. Diaria) que producirá el plante de generación eléctrica, basta con dividir la potencia eléctrica que entrega el generador entre 30 días, como se muestra en la siguiente ecuación (5):

$$E. Elec. Diaria \left(\frac{E. Salida (Eléctrica)}{30} \right) = W/dia$$

De esta manera pues, si se realizaron correctamente cada uno de los pasos anteriormente descritos, se puede generar energía eléctrica por medio del proceso de biodigestión.

Referencia:

Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas, quinta edición, Mc Graw Hill Educación, pag 151, 168,171.
Disponible en <https://ia903201.us.archive.org/8/items/266539159MaquinasElectricasChapman5taEdicionPdf/266539159-Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf>