



Universidad del  
**Rosario**

Escuela de Ingeniería,  
Ciencia y Tecnología

# **VIABILIDAD TÉCNICA PARA LA CO - DIGESTIÓN DE RESIDUOS DEL CULTIVO DE MAÍZ Y ESTIÉRCOL DEL CERDO EN GRANJAS PORCÍCOLAS PARA LA AUTOGENERACIÓN ELÉCTRICA**

Presentado para obtener el título de

## **MAGÍSTER EN ENERGÍA RENOVABLES**

Carlos Julio González Medina

Dirección:

Andrés Mauricio Pérez

Codirección:

María Fernanda Gómez Galindo, PhD

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energía Renovables

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme estar en esta etapa y concluirla, a mi esposa Andrea Nataly Chávez González por su apoyo y motivación en la realización de la maestría, a mis hijos Jaime Santiago y María Camila que son mi motor de superación, a todos mis familiares (mamá, hermanos y sobrinas) que durante este proceso me apoyaron y estuvieron pendiente en todo momento, a mi Padre que desde el Cielo siempre está apoyándonos en nuestros logros.

## **AGRADECIMIENTOS**

A los profesores Andrés Mauricio Pérez Gordillo (director) y María Fernanda Gómez Galindo (codirectora) por el tiempo dedicado para la elaboración de este documento y todas las etapas que se tuvieron que superar para la terminación de este trabajo. Al Ingeniero Camilo Salas por los espacios brindados para poder tomar las diferentes materias durante los horarios laborales.

## ABSTRACT

Este documento analiza el potencial energético que tiene la mezcla de dos biomásas de generación constante con el proceso de co-digestión anaerobia en el sector porcícola. Se parte de la problemática que se presenta durante la operación de las granjas porcícolas y como se puede contribuir para que estas encajen dentro de un marco de economía circular amigables con el medio ambiente que permita garantizar un suministro continuo de alimentos a la población. Es por ello que a través de la reutilización de los residuos aprovechables generados durante la operación de granjas porcícolas que puede ser transformada en biogás a través del proceso de co-digestion pasando por cada una de sus fases (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis) bajo condiciones apropiadas del tipo de biomasa, temperatura, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), relación C/N, carga orgánica volumétrica, PH, se busca lograr garantizar una contante y continua producción de biogás

En este trabajo se hace un análisis del inventario nacional de las biomásas de estudio, caracterización y ensayos (análisis próximo y elemental para determinar la composición de la mezcla), con lo cual se estima el volumen de biogás producido usando tres métodos diferentes. Además, se incluye una estimación del potencial energético a partir del menor volumen estimado de biogás en los departamentos donde existen granjas porcícolas y cultivos de maíz. A través de estos cálculos se estima el potencial generado por las granjas porcícolas, encontrándose que el aporte del sector es de 114,6 MW h, capaz de abastecer 1,2 % de 9500 MW h en el pico de demanda del país [1].

En este trabajo se presenta también, tanto una explicación de los biodigestores que se encuentran en el mercado y las tecnologías de limpieza del biogás, como un ejemplo de éxito de transformación de biogás a energía eléctrica con motores Jenbacher de la casa matriz de la General Electric. Por último, se enuncia la importancia del biogás dentro de la matriz energética como una fuente renovable, finalizando con recomendaciones y conclusiones con los resultados hallados. Como complemento se anexa fichas técnicas de algunos equipos disponibles en el mercado y resultados de la caracterización de la biomasa objeto de estudio.

This document analyzes the energy potential of the mixture of two constantly generating biomasses with the anaerobic co-digestion process in the pork sector. The starting point is the

problems that arise during the operation of pig farms and how we can contribute so that they fit within an environmentally friendly circular economy framework that allows guaranteeing a food supply that grows proportionally to the increase in population. That is why, through the reuse of usable waste generated during the operation of pig farms, it can be transformed into biogas through the co-digestion process, going through each of its phases (hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, methanogenesis). Under appropriate conditions of the type of biomass, temperature, total solids (ST), volatile solids (SV), C/N ratio, volumetric organic load, PH, the aim is to guarantee a constant and continuous production of biogas.

This document analyzes the energy potential of the mixture of two constantly generating biomasses through aerobic co-digestion process in the pork production sector. The starting point is the national inventory of the biomasses under study, its collection, characterization and testing (proximate and elemental analysis to determine the composition of the mixture), with which the volume of biogas is estimated using three different bibliographic sources, including an estimate of the energy potential. Based on the lowest calculated volume of biogas in the departments where there are pig farms and corn crops. Through these calculations, the electric energy potential from pig farms is estimated, finding that the sector's contribution is 114.6 MW h, capable of supplying 1.2% of 9,500 MW at the country's peak demand [1].

This work also presents an explanation of the biodigesters found in the market on the market and the biogas cleaning technologies, as well as a successful example of the transformation of biogas into electrical energy with Jenbacher engines from the headquarters of General Electric. Finally, the importance of biogas within the energy matrix as a renewable source is stated, ending with recommendations and conclusions with the results found. As a complement, technical sheets of some equipment available on the market and results of the characterization of the biomass under study are attached.

## TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN .....	9
Capítulo 2 OBJETIVOS .....	11
1.1 Objetivo general.....	11
1.2 Objetivos específicos .....	11
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	12
3.1 Problema .....	12
3.2 Justificación .....	14
Capítulo 4 MARCO TEORICO.....	16
4.1 Biomasa Porcicola .....	16
4.2 Biogás .....	18
4.3 Bioabono.....	19
4.4 Digestión y co-digestión anaeróbica.....	19
4.5 Producción de Biogás .....	23
4.6 Limpieza del biogás .....	26
4.7 Reactores anaerobios .....	30
4.8 Generación eléctrica .....	33
4.9 Inventario de Biomasa .....	33
Capítulo 5 METODOLOGÍA .....	42
5.1 Etapa 1. Porcentajes de la mezcla para el proceso de co-digestión .....	42
5.2 Etapa 2. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa .....	42
5.3 Etapa 3. Cuantificación del potencial de biogás (metano).....	47
5.4 Etapa 4: Generación de energía eléctrica.....	47
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48
6.1 Resultados caracterización de la biomasa.....	48
6.2 Estimación producción de biogás .....	48
6.3 Estimación de generación de energía eléctrica .....	53
Capítulo 7.....	56
REFERENCIAS .....	57
APÉNDICE 1.....	60
APÉNDICE 2.....	61
APÉNDICE 3.....	63
APÉNDICE 4.....	65
APÉNDICE 5.....	67

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características Generales del Biogas.....	19
Tabla 2. Propiedades residuos del maíz.....	34
Tabla 3. Hectáreas de maíz sembradas en Colombia.....	35
Tabla 4. Toneladas de maíz producidas por departamento en Colombia .....	36
Tabla 5. Composición planta maíz .....	37
Tabla 6. Biomasa generada por residuos del Maíz .....	37
Tabla 7. Biomasa proveniente del estiércol de cerdo .....	39
Tabla 8. Relación biomasa porcina/ biomasa maíz .....	40
Tabla 9. Relación biomasa.....	41
Tabla 10. Ensayos Caracterización Biomasa.....	47
Tabla 11. Resultados análisis próximo y último Biomasa.....	48
Tabla 12. Metros cúbicos de biogás con el método N°1 .....	49
Tabla 13. Metros cúbicos de biogás con el método N°2 .....	49
Tabla 14. Metros cúbicos de biogás con el método N°3 .....	50
Tabla 15. MW h por departamento.....	54
Tabla 16. MW h Motores Jenbacher.....	55

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Resumen de conversión de Biomasa .....	16
Figura 2. Adsorción Química .....	27
Figura 3. VPSA.....	28
Figura 4. Criogenización .....	28
Figura 5. Membranas .....	29
Figura 6. PSW .....	29
Figura 7. Biodigestor tipo chino o de cúpula fija .....	31
Figura 8. Biodigestor tipo hindú o de campana flotante.....	32
Figura 9. Biodigestor tipo Taiwán o de flujo continuo.....	32
Figura 10. Planta Jenbacher sector palmero .....	33
Figura 11. Ubicación cultivo de maíz.....	42
Figura 12. Puntos de muestras .....	43
Figura 13. Picadora.....	43
Figura 14. Biomasa con tamaño 1”.....	44
Figura 15. Cuartetos de muestra .....	45
Figura 16. Biomasa residuos maíz seleccionada. ....	45
Figura 17. Biomasa residuos del maíz.....	46
Figura 18. Generación de biogás por otras fuentes.....	52

## Capítulo 1

### INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población, la industria, el comercio, el transporte entre otros hace que aumente la demanda de energía, se estima un crecimiento del 50% al 2030, según estimaciones de la AIE (Agencia Internacional de Energía) [2].

En Colombia la capacidad eléctrica neta es de 19919,69 MW, el 1% es por cogeneración, 0,1% eólica, 66,3 % hidráulica, 2,5% solar y el 30,1% térmica energética [3]. Con los compromisos adquiridos el 29 de diciembre de 2020, ante la Convención Marco de las Naciones Unidas en el marco político y normativo de cambio climático, como firmante del acuerdo de París, el país debe reducir la emisión de gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento global y el cambio climático en un 51 % al 2030, para ello su matriz energética deberá cambiar [4]. Dentro de las nuevas alternativas de generación de energía se encuentra el biogás proveniente de la digestión anaerobia (descomposición de un sustrato) y co-digestión anaerobia (descomposición de dos o más sustratos de diferente origen y composición) en estos procesos los microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno, este proceso genera diversos gases, entre los ellos el dióxido de carbono, amoníaco, ácido sulfhídrico y metano dependiendo del material degradado, bajo ciertas condiciones de almacenamiento, temperatura, presión, agitación, tipos de biomasa, tiempo de retención hidráulico, PH, entre otros [5].

Como fuente principal de biogás se encuentran las granjas porcícolas las cuales generan grandes cantidades de estiércol (0,72 Toneladas en el año por cerdo) [6], residuos de la siembra de maíz, yuca, soya, trigo, entre otros usados para la fabricación de alimentos para cerdos (purines). Estos residuos contribuyen con la generación de biogás en el proceso de co-digestión anaerobia, mejorando así el balance de nutrientes y características fisicoquímicas del sustrato, estabilizando el sistema aumentando la producción de biogás [7].

La caracterización de la biomasa se realiza bajo estándares internacionales en laboratorios con un alto reconocimiento.

La biomasa caracterizada posee un potencial energético que contribuye con la economía circular además el aprovechamiento energético de esta biomasa evita que el estiércol sea vertido a las fuentes hídricas y los residuos del maíz se quemen indiscriminadamente generando grandes cantidades de gases que afectan en medio ambiente. Con esta alternativa se da un buen uso a estos

residuos transformándolos en biogás y bioabonos, convirtiendo las granjas porcícolas en fuentes de generación de biogás sustentables ambientalmente, las cuales, con el tiempo, podrían tomar importancia dentro de la matriz energética del país, debido a las grandes extensiones de terrenos donde se podrá aplicar la siembra de maíz y el montaje de granjas porcícolas.

El sector del biogás se encuentra en constante estudio de avances tecnológicos para mejorar la limpieza de los gases generados y rendimiento de los digestores para convertirlo en una de las mayores fuentes de energía renovable.

## **Capítulo 2**

### **OBJETIVOS**

#### **1.1 Objetivo general**

Definir la factibilidad técnica del proceso de co-digestión anaerobia en la industria porcícola para la obtención de biogás a partir del estiércol y residuos de cultivos de maíz para la generación eléctrica.

#### **1.2 Objetivos específicos**

- Seleccionar relación entre biomasa producida por granjas porcícolas, estiércol de cerdo y residuos de maíz
- Caracterizar fisicoquímicamente la biomasa seleccionada.
- Determinar el potencial de biogás (metano) que se puede obtener a partir del proceso de co-digestión con la biomasa caracterizada en el proceso anterior.
- Estimar el potencial para generación de energía eléctrica a partir del volumen de metano generado y la tecnología disponible para tal fin.

## Capítulo 3

### PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

#### 3.1 Problema

La producción porcina tiene gran importancia a nivel económico debido a la alta demanda de alimentos para consumo humano. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se espera que para el 2050 la población humana aumente de 7.2 a 9.6 mil millones de habitantes, por lo que el consumo de carne se duplicará. Se debe asegurar que la producción de carne en granjas porcícolas sea segura para consumo humano, mediante prácticas adecuadas “desde el campo hasta la mesa”, sin impactar el medio ambiente [8].

El impacto ambiental en la operación de las granjas porcícolas es significativo, éstas aportan cantidades importantes de gases como: dióxido de carbono, proveniente de la respiración de los cerdos, 450 kg/año (un vehículo medio de combustión produce 5,500 kg/año); CH<sub>4</sub> (metano que se genera como consecuencia de la degradación de los ácidos orgánicos), producido por la descomposición del estiércol del cerdo; amoníaco (NH<sub>3</sub>), por los purines, las mayores concentraciones se suelen detectar a la primera hora de la mañana o coincidiendo con el reparto del alimento concentrado, se recomienda no superar una tasa entre 20 y 45 ppm de amoníaco; sulfuro de hidrógeno (SH<sub>2</sub>), se produce como consecuencia de la degradación anaeróbica de las deyecciones y se trata de uno de los gases más tóxicos; monóxido de carbono (CO) su presencia puede ser indicativo de una mala combustión de los calentadores de gas utilizados para regular la temperatura de las instalaciones (calefacción) [9].

El tratamiento de las aguas residuales generadas durante la limpieza de las instalaciones provoca que estos vertimientos lleguen a las fuentes hídricas, ocasionando contaminación. Estos residuos además de contener grandes cantidades de nutrientes y material orgánico e inorgánico contienen microorganismos que pueden ser patógenos, así como residuos de fármacos, antibióticos, hormonas o desparasitantes. La producción diaria de estos residuos está dada por factores como la raza, el estado fisiológico, la dieta proporcionada, la cantidad de agua y productos utilizados en la limpieza y desinfección de las instalaciones y la época del año. Además, se sabe que la producción de tipo intensivo provoca la pérdida de la biodiversidad (especies nativas vegetales y animales),

entre un 15% a un 37% de todas las especies en el mundo, este tipo de granjas contribuyen a la generación de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel pecuario [8].

Durante la operación de las granjas porcícolas se requieren cantidades significativas de suministro de energía eléctrica, para la calefacción de las instalaciones, alimentación de equipos como bombas, motores, herramientas, vehículos, alumbrados, cocinas entre otros. Este suministro puede venir de la red nacional interconectada o a través de contratos privados entre las partes, para reducir los gastos por compra de energía eléctrica se aplica el concepto de economía circular a las grandes granjas para llevarlas al auto abastecimiento de materias primas para la fabricación de purines provenientes de cereales como el maíz, trigo, soya, yuca, cebada, millo entre otros. Estas materias primas generan residuos sólidos que, a su vez, en muchas ocasiones, son quemados sin control, ocasionando que se liberen grandes cantidades de monóxido de carbono a la atmósfera. Estos residuos se pueden tratar de distintas formas para obtener un potencial energético a través de procesos termoeléctricos, co-digestión, digestión anaerobia, entre otros. Como biomasa para la generación eléctrica se usará los residuos del maíz y el estiércol del cerdo, estos son producidos constantemente durante la operación de las granjas.

Si se considera que el inventario tecnificado de cerdos en Colombia es de cerca de 6,5 millones de animales según cifras del censo del ICA año 2018, y que el potencial estimado de generación de biogás a partir de porcinas es cercano al 1.500.000 GJ/año [10], podemos afirmar, que el sector porcícola tiene mucho que aportar al potencial de generación energética del país, y aumentar 40MW al potencial actualmente instalado que se reporta provenientes del aprovechamiento de distintos tipos de biomasa (estiércol, residuos sólidos utilizados en la fabricación de purines) generados por el sector, las zonas colombianas con la mayor concentración porcina son Antioquia, valle del Cauca, Cundinamarca y Meta [10].

El potencial energético de un sustrato determinado depende de su contenido de sólidos volátiles (SV), y de la manera en que se desarrolle el proceso de digestión. Para el caso de la biomasa generada en las granjas porcícolas, el potencial energético varía, dependiendo de si se utiliza estiércol sólido, estiércol líquido (principalmente orina), o una mezcla de estiércol, orina y agua de lavado a la que comúnmente se le denomina porcinaza. Se estima que una tonelada de estiércol de cerdo puede generar hasta 60 m<sup>3</sup> de biogás, mientras que una tonelada de purín (Estiercol no solido) puede generar 36 m<sup>3</sup> de biogás y una tonelada de estiércol líquido (orina) solo genera 25 m<sup>3</sup> de

biogás [10]. Para el caso de granjas donde se procesa su propio purín se puede obtener la mezcla de estiércol y purín, que es el caso que se desarrolla en este trabajo.

Con la reutilización de las biomásas anteriormente descritas se logra reducir las emisiones de CO (monóxido de carbono) y eliminar el vertimiento de desechos (estiércol) a las fuentes hídricas, adicionalmente se puede obtener abonos para la siembra de nuevos cultivos.

### **3.2 Justificación**

El cambio climático ha llevado a explorar nuevas fuentes de generación eléctrica que ayuden a disminuir la huella de carbono, es por ello por lo que se busca en la industria porcícola la opción de poder contribuir con este objetivo que involucra a todos en pro del futuro del planeta. El papel que este sector juega para garantizar la alimentación de la humanidad a través del suministro de carne es muy importante, ya que garantiza el abastecimiento y cumple con la demanda, la cual está en crecimiento, debido al aumento poblacional mundial. Para poder cumplir con esta demanda el sector porcícola deja un daño muy fuerte en los ecosistemas, por la contaminación de los purines, la contaminación de las fuentes hídricas entre otros. Reducir este impacto producido por la operación de las granjas porcícolas garantiza que se pueda seguir dependiendo de estas para el suministro de alimentos. Por este motivo se busca convertir los desechos producidos por estas granjas (rastros del maíz y estiércol) en fuentes para la generación eléctrica y garantizar que estos residuos realicen una transformación más amigable con el medio ambiente.

Se espera obtener una biomasa confiable que garantice a través del proceso de co-digestión la generación de biogás, que con la tecnología apropiada garantizará un suministro constante y a la vez producirá un potencial eléctrico que se espera sea capaz de autoabastecer la granja y entregar excedentes a la red. Estos hechos pueden ser un factor determinante para posicionar la industria del biogás dentro de la matriz energética del país y llegar a tener el mismo nivel de importancia como el gas natural o GLP cuyo equivalente de combustible es de 11,7 KWh / m<sup>3</sup> [11].

Desde el aspecto social, aplicando el proceso de co digestión dentro de las granjas porcícolas se reduce el riesgo de contaminación de las fuentes hídricas y reduce los gases de efecto invernadero como también se ayuda a la generación de energías limpias para su autoconsumo o entrega de excedentes a la red nacional, fomentando una economía circular para este proceso.

Desde la parte académica este trabajo se presenta como un nuevo aporte en la etapa de producción de biogás a partir de residuos del maíz y el estiércol del cerdo generados en las granjas porcícolas con el proceso de co digestión, dado que estos estudios actualmente son incipientes debido a la complejidad del comportamiento de las biomásas en la descomposición para la generación de biogás.

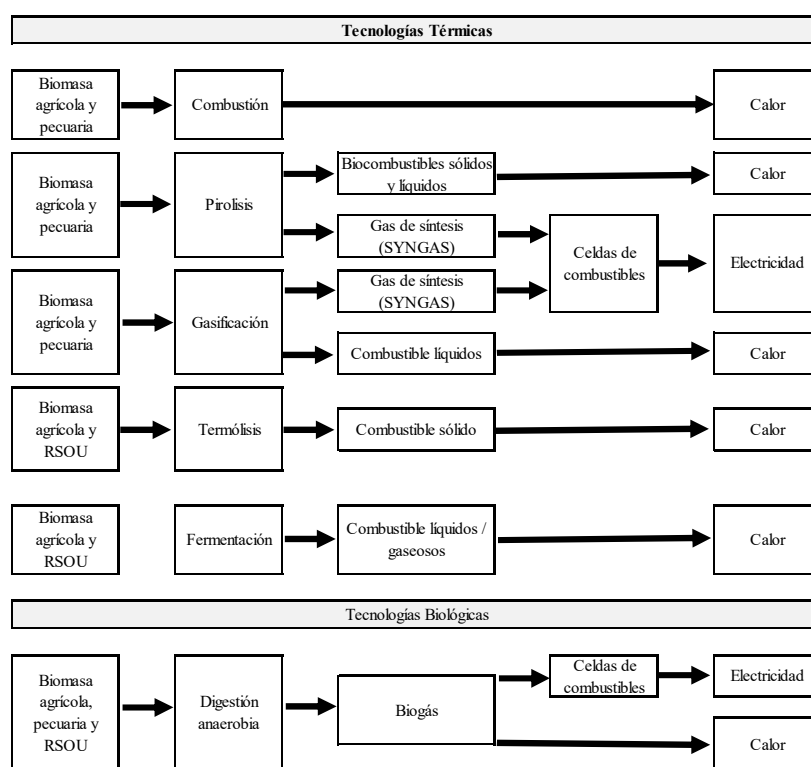
## Capítulo 4

### MARCO TEORICO

#### 4.1 Biomasa Porcicola

La biomasa es la única fuente de energía renovable que puede ser transformada en combustibles gaseosos, líquidos o sólidos, mediante procesos de conversión térmico o biológico (Fig. 1). La transformación energética de la biomasa genera principalmente biocombustibles, entre ellos, el biogás a partir de los cuales se puede obtener calor, electricidad o fuerza motriz. Tanto la selección del tipo de aprovechamiento energético como las dificultades que se puedan presentar en cualquier tratamiento posterior, dependen de las propiedades fisicoquímicas, bioquímica y energéticas del residuo.

Figura 1. Resumen de conversión de Biomasa.



Fuente: Tomado de [12]

El aprovechamiento de la biomasa seca (contenido de humedad menor al 50%) por medio de procesos termoquímicos depende de factores como el contenido de humedad, el poder calorífico,

la concentración de carbono fijo y de los volátiles, el contenido de cenizas y de los metales alcalinos presentes. Por otra parte, para el aprovechamiento de la biomasa húmeda (mayor al 50%) por medio de la bioconversión, son de interés el contenido de humedad y la relación celulosa y lignina [13].

En comparación con los combustibles fósiles, la biomasa posee un contenido energético menor; la razón es que la biomasa tiene una mayor relación de oxígeno e hidrógeno con respecto al carbono y justamente la mayor cantidad de energía se almacena en las cadenas carbono-carbono [12].

**Procesos termoquímicos:** En condiciones controladas de temperatura y presión la estructura de la materia se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos más adecuados a la aplicación que se desee. Este proceso, debido al alto nivel tecnológico alcanzado, está substituyendo a la combustión directa.

Las tecnologías de combustión directa van desde sistemas simples como estufas, hornos y calderas, hasta equipos sofisticados para combustión de lecho fluidizado. La eficiencia de estos procesos oscila alrededor del 60% [12].

Los gasificadores de biomasa operan calentando el residuo en un ambiente en el cual los sólidos se desdoblán hasta formar un gas inflamable. Esta opción ofrece ventajas sobre la combustión directa como: El biogás puede ser limpiado y filtrado para remover componentes químicos indeseados hasta alcanzar eficiencias del 60% [13].

**Procesos bioquímicos:** En los bioprocesos se utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbianos producen combustibles gaseosos y líquidos. Dentro de los procesos bioquímicos se destacan las transformaciones anaeróbicas y las fermentaciones alcohólicas [13].

La digestión anaerobia de la materia orgánica genera dos corrientes: un gas combustible con una concentración de metano entre 55% -70 % y poder calorífico inferior a  $23 \text{ MJ/m}^3$ , a este se le denomina como biogás. Además, se produce un sólido conformado por residuos, cuya composición se asimila a un abono orgánico tipo compost [13].

## 4.2 Biogás

El biogás se considera dentro de las energías renovables que se produce a través de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, se compone principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); junto con pequeñas cantidades de otros gases como nitrógeno, sulfuro de hidrogeno y trazas de vapor de agua.

La producción de biogás generalmente implica la recolección de materiales de desecho orgánicos, como residuos agrícolas, estiércol animal, desechos de alimentos, aguas residuales y cultivos energéticos, posteriormente se colocan en un digestor anaeróbico.

El digestor crea un ambiente libre de oxígeno que permite que las bacterias descompongan la materia orgánica. Como resultado, se libera metano y dióxido de carbono, que luego se pueden capturar y utilizar como fuente de energía. Algunas aplicaciones del biogás son:

- **Generación de electricidad:** a través de la operación de plantas de energía de biogás, este se quema en un generador para producir energía eléctrica [13].
- **Generación de calor:** puede ser usado como fuente directa de calor para cocinar, calentar espacios y procesos industriales. Puede reemplazar combustibles como gas natural o propano en diferentes aplicaciones [13].
- **Combustible para vehículos:** el biogás se puede mejorar y procesar para eliminar las impurezas, lo que da como resultado el biometano, este tiene propiedades similares al gas natural y puede usarse en vehículos de gas natural comprimido (GNC) o gas natural licuado (GNL) [13].
- **Sistemas combinados de calor y energía (CHP):** el biogás se puede usar en unidades combinadas de calor y energía, también conocidas como sistemas de cogeneración, donde se utiliza simultáneamente para producir electricidad y calor [13].

El biogás proporciona una fuente de energía renovable y sostenible, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, reduce la gestión de residuos, crea oportunidades económicas en los sectores agrícolas y gestión de residuos [13].

La composición del biogás depende del material digerido y de variables del proceso como: del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. El biogás tiene propiedades específicas que se indican en la Tabla 1 [14].

Tabla 1. Características Generales del Biogas.

Composición	55 - 70% metano (CH <sub>4</sub> ) 30 - 45% dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) Trazas de otros gases
Contenido energético	6,0 - 6,5 KW h m <sup>3</sup>
Equivalente de combustible	0,6 - 0,65 L petróleo/m <sup>3</sup> biogás
Límite de explosión	6 - 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750 °C (con el contenido de CH <sub>4</sub> mencionado)
Presión Crítica	74 - 88 atm
Densidad normal	1,2 Kg m <sup>3</sup>
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16,043 Kg / Kmol

Fuente: Tomado de [14]

### 4.3 Bioabono

Las características del bioabono, dependen en gran medida del tipo de tecnología y de las materias primas utilizadas para la digestión. Durante el proceso anaeróbico, parte de la materia orgánica se transforma en metano, por lo que el contenido en materia orgánica es menor al de las materias primas. Gran parte de la materia orgánica de este producto se ha mineralizado, por lo que normalmente aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuye el nitrógeno orgánico [14].

### 4.4 Digestión y co-digestión anaeróbica

La digestión y co-digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores. Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles [14].

En la digestión anaeróbica, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento de este [14].

***Etapas del proceso de digestión anaeróbica.*** El proceso de la degradación de la materia orgánica se realiza por medio de un grupo de microorganismos y suele dividirse en cuatro fases consecutivas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [15].

- **Hidrólisis:** es el primer paso que se lleva a cabo en la digestión anaerobia, se caracteriza por descomponer los compuestos más complejos del sustrato, (carbohidratos, proteínas y lípidos), en moléculas solubles (azúcares de cadena corta, aminoácidos y ácidos grasos), esto se da gracias a la acción de las enzimas liberadas por las bacterias presentes en el medio. Esta etapa es importante debido a que la degradación de las moléculas depende de la velocidad a la que trabajan las enzimas y los complejos que son los diferentes sustratos. Esta primera etapa determina el tiempo de retención necesario en los digestores debido a la presencia de materia orgánica con moléculas de gran tamaño, además de las condiciones no aptas para que el proceso se desarrolle de forma adecuada [15].
- **Acidogénesis:** los sustratos obtenidos de la fase de hidrólisis son absorbidos por bacterias, se degradan hasta la generación de acetato, propionato y butirato, ácidos orgánicos y grasos de cadena corta. A su vez, el propionato y butirato se fermentan nuevamente obteniendo productos finales como el hidrógeno, dióxido de carbono y acetato que son los iniciadores de la formación de metano en la metanogénesis [15].
- **Acetogénesis:** en la acetogénesis, los ácidos orgánicos generados a partir de la fase de acidogénesis se reducen a ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Este proceso es realizado por un grupo restringido de microorganismos homoacetogénicos [15].
- **Metanogénesis:** en esta etapa metabólica participan dos grupos de microorganismos metanogénicos, los cuales son responsables de convertir los compuestos obtenidos en la acetogénesis, en biogás. Los acetotrofos producen metano por medio del uso del ácido acético y los hidrogenotrofos generan metano por medio del dióxido de carbono y el

hidrogeno [15].

La eficiencia del proceso depende de la sinergia que haya entre cada grupo de microorganismos involucrados en cada una de las etapas [15].

***Factores fisicoquímicos que influyen en el proceso de co-digestión anaeróbica.*** La co-digestión anaerobia es un proceso biológico que requiere tener las condiciones adecuadas para que el proceso sea satisfactorio. Los siguientes factores son los principales influyentes en el proceso [15]:

- **Tipo de biomasa:** la producción de biogás depende de la cantidad de nutrientes que tienen los diferentes sustratos, como se mencionó anteriormente, dentro del proceso de la digestión anaerobia se lleva a cabo el trabajo de varios grupos de microorganismos que se alimentan de las propiedades de cada sustrato [15]. Los diferentes tipos de sustratos se pueden utilizar en el proceso de la fermentación metanogénica, los cuales pueden ser residuos de origen animal, vegetal, agroindustriales, forestales, entre otros. Además, ciertos tipos de residuos cuentan con limitantes, como presentar un contenido de lignina alto, lo que los hacen no tan aprovechables sin un pretratamiento (cortado, macerado, compostaje) con el fin de poder disminuir la cantidad ese compuesto. En el caso de las excretas animales, la calidad de este sustrato depende del tipo de animal y de su alimentación [15].
- **Temperatura:** muchos sistemas biológicos dependen de la temperatura, sobre todo procesos anaeróbicos en donde se llevan a cabo reacciones químicas que varían de acuerdo con esta, sobre todo a la velocidad en que se realizan. Es un parámetro que afecta el rendimiento de la digestión anaeróbica debido a que cualquier fluctuación de temperatura puede afectar la actividad microbiana, las bacterias hidrolíticas que se encargan de descomponer los materiales más complejos y las bacterias acidogénicas no toleran los cambios produciendo acidificación del proceso [15]. Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento mayor, conforme aumenta el rango de temperatura [15]. El rendimiento de la digestión anaerobia puede ser mejor bajo condiciones termófilas (>45 °C) debido a que hay mayor solubilidad de los compuestos orgánicos, mayores velocidades de reacción química, disminución de patógenos y de olores [15]. Sin embargo, el rendimiento

adecuado y la menor producción de inhibidores dentro del proceso de digestión anaerobia se da en condiciones mesofílicas (25–40 °C), por lo que se considera que este rango de temperaturas es más estable que operar un digestor a temperatura ambiente [15]. Las condiciones termofílicas son mejores para el proceso de digestión [15].

- **Sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV):** la materia orgánica está compuesta por agua y una fracción sólida (ST), el porcentaje de estos sólidos en una mezcla es un factor importante por considerar para que el proceso funcione eficientemente, dado que las bacterias metanogénicas necesitan tener cierta movilidad dentro del sustrato, por lo que a medida que el contenido de sólidos sea mayor, así mismo puede verse afectada la producción de biogás [15]. Los sólidos totales representan la parte “seca” de la materia orgánica, por lo que el porcentaje de este valor corresponde a la materia seca que tiene el sustrato. Por otro lado, los sólidos volátiles corresponden a la fracción orgánica de un sustrato y son aquellos que son digeridos por la actividad microbiana dentro del digestor, estos sólidos son los que reaccionan en el proceso de la digestión anaerobia [15].
- **Relación C/N:** cualquier tipo de materia orgánica está constituida por nutrientes que ayudan a producir biogás bajo condiciones fermentativas. La cantidad de biogás que se produce dependen de la composición de cada tipo de residuo, por lo que los microorganismos necesitan de cierta cantidad de carbono y nitrógeno para su entorno de crecimiento, así como en los sistemas de digestión anaeróbica. Se ha determinado un rango óptimo de C/N de 15-30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno. Por otro lado, las relaciones de C/N por encima de 35:1 pueden hacer que el proceso sea más lento porque el desarrollo de bacterias es bajo por la falta de nitrógeno, pero el periodo de producción de biogás es más prolongado, pero en relaciones con un valor menor a 8:1 se inhibe la actividad bacteriana por la formación de amonio [15]. La materia orgánica de origen vegetal tiende a presentar relaciones altas debido a su estructura lignocelulósica que es tan compleja, por lo tanto, el proceso de degradación es mucho más lento y se vuelve un sustrato inadecuado para la producción de biogás, pero en el caso del estiércol, este presenta relaciones bajas debido a que no contiene alto contenido de carbono por lo que también lo hace un sustrato inadecuado para el proceso de la digestión anaerobia [15].
- **Carga orgánica volumétrica:** hace referencia a la cantidad de sólidos por volumen que se cargan al sistema en un tiempo determinado. Gran cantidad de materia orgánica puede no

ser favorable debido a que haber mayor actividad de bacterias hidrolizantes y acidogénicas en comparación a las metanógenas [15].

- **PH:** de acuerdo con las reacciones enzimáticas que se realizan en el proceso de la digestión anaerobia, se puede conocer un parámetro importante para determinar el desempeño de este. Según la literatura, el pH óptimo es de alrededor de 6.8 a 7.2, pero un valor por debajo de 6.8 podría hacer que las bacterias encargadas de producir el metano disminuyan considerablemente [15]. Una de las consecuencias de que haya descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y por lo tanto tiene menores cualidades energéticas, ya que la metanogénesis se considera la etapa más importante del proceso, por ende, es necesario mantener un pH cercano a la neutralidad. [15].

#### 4.5 Producción de Biogás

La caracterización de la muestra (mezcla de estiércol y rastrojo de maíz) entregará valores de las siguientes variables:

- Humedad
- Ceniza
- Material Volátil
- Carbono Fijo
- Poder Calorífico
- Análisis elemental
- Carbono
- Nitrógeno
- Hidrogeno
- Azufre

**Método 1.** Para estimar la cantidad de solidos volátiles que se puede producir tenemos [10]:

$$SV = \%SV \times \%MS \times E \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

SV: Cantidad de solidos volátiles

%SV: Porcentaje de solidos volátiles

%MS: Porcentaje de material seco

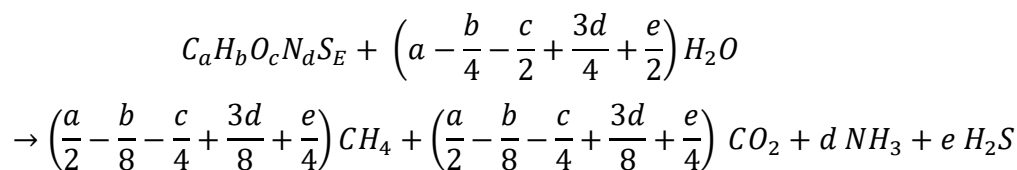
E: Cantidad de biomas (Estiércol – residuos del maíz)

La cantidad de biogás (B) en metros cúbicos que se puede producir a partir de los sólidos volátiles disponibles en la biomasa, teniendo en cuenta que cada kilogramo de solidos volátiles puede generar hasta 400 litros de biogás, con un 60% de contenido de metano (CH<sub>4</sub>) [10] en metros cúbicos:

$$B = SV \times 1000Kg \times 400L \div KgSV \text{ (Ecuación 2)}$$

$$CH_4 = B \times 0,6 \text{ (Ecuación 3)}$$

**Método 2.** Estequiometria: según el siguiente modelo estequiométrico los productos de la reacción entre una biomasa y agua son metano, dióxido de carbono, amoniaco y ácido sulfhídrico, a su vez este modelo aproxima las concentraciones de cada uno de los componentes a partir del análisis elemental de la biomasa [16].



Donde:

a: Carbono (Kmol)

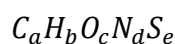
b: Hidrogeno (Kmol)

c: Oxigeno (Kmol)

d: Nitrógeno (Kmol)

e: Azufre (Kmol)

Formula empírica de la biomasa esta dada por:



Donde las constantes a, b, c, d y e se obtienen de los resultados de laboratorio de la universidad de los Andes

La cantidad de moles de agua (H<sub>2</sub>O) presentes en la reacción está dada por:

$$C1 = \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2}\right) \text{ (Ecuación 4)}$$

Moles que se producen de metano (CH<sub>4</sub>):

$$C2 = \left( \frac{a}{2} - \frac{b}{8} - \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4} \right) \text{ (Ecuación 5)}$$

Moles que se producen de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):

$$C3 = \left( \frac{a}{2} - \frac{b}{8} - \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4} \right) \text{ (Ecuación 6)}$$

Moles que se producen de amoníaco (NH<sub>3</sub>):

$$C4 = d \text{ (Ecuación 7)}$$

Moles que se producen de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S):

$$C5 = e \text{ (Ecuación 8)}$$

Masa Molar (M)

$$M = \text{Masa de la sustancia en (g)} \div \text{Numero de moles de la sustancia (Mol)} \text{ (Ecuación 9) [17]}$$

La densidad del metano 0,656 kg/m<sup>3</sup> en condiciones normales de Temperatura (25°C) y Presión (101.325 kPa) [18] y el peso molecular 16 Kg / Kmol, el volumen total producido de metano.

$$\text{Volumen de metano} = \frac{\left( \frac{a}{2} - \frac{b}{8} - \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4} \right) * Pm_{CH_4}}{\rho_{CH_4}} = \frac{\left( \frac{a}{2} - \frac{b}{8} - \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4} \right) * 16 \text{ Kg/Kmol}}{0,656 \text{ Kg/m}^3} \text{ (Ecuación 10)}$$

**Método 3.** Relación de porcentajes: se relaciona los porcentajes generales de carbono, solidos volátiles y producción de metano para encontrar un estimado del volumen de metano generado [18].

- Masa de carbono que compone la biomasa (MC) en kilogramos [18]

$$MC = MT \times (1 - \%H) \times C \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde:

MT: Masa Total de la biomasa (Kg)

H: Porcentaje de humedad (%)

C: Porcentaje de Carbono (%)

- Carbono biodegradado (CB) en kilogramos:

$$CB = MC \times \%SV \text{ (Ecuación 12)}$$

Donde:

MC: Masa de carbono (Kg)

%SV: Porcentaje de solidos volátiles (%)

De la tabla 1 los productos de la reacción de la biomasa se componen en 55% metano y 45% dióxido de carbono por lo que la producción de metano (PM) en Kg es:

$$PM = CB (Kg) \times 55\% \text{ (Ecuación 13)}$$

#### 4.6 Limpieza del biogás

El biogás obtenido mediante la digestión anaerobia tiene como principales componentes el metano (CH<sub>4</sub>), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>), vapor de agua, oxígeno (O<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>). No obstante, en su composición puede haber también contaminantes orgánicos o impurezas, que van a depender del origen del residuo orgánico y del proceso de tratamiento biológico (sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), amoníaco (NH<sub>3</sub>), compuestos orgánicos volátiles (COV's) o siloxanos que pueden eliminarse) [19].

En el proceso de depuración se produce la eliminación de las impurezas y se concentra CH<sub>4</sub>, se trata de un proceso que ha adquirido cada vez más relevancia, al ser considerado, el biometano, como un valioso biocombustible que puede emplearse para diversas aplicaciones [19].

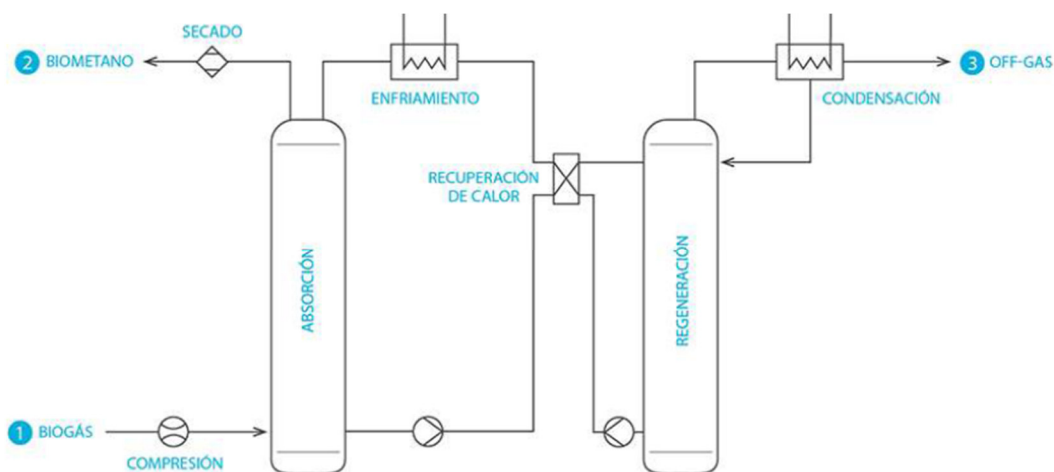
El contaminante más común presente en el biogás es el H<sub>2</sub>S, este debe eliminarse para evitar la corrosión de los equipos, algo que es posible mediante varias técnicas conocidas (por vía biológica, química o adsorción). El NH<sub>3</sub>, que se genera durante la degradación bacteriana de sustancias que contienen nitrógeno, como son las proteínas, es corrosivo y altamente soluble en agua. Los COV's presentan una alta presión de vapor y baja solubilidad, y resultan perjudiciales para el medio ambiente y los seres humanos, los siloxanos son compuestos orgánicos que se encuentran en una amplia variedad de productos, como cosméticos, desodorantes, revestimientos que repelen el agua para el parabrisas, aditivos alimentarios y algunos jabones, se trata de compuestos líquidos volátiles y tienden a ser bastante persistentes en sus entornos, en el biogás puede haber uno o más tipos de siloxanos, dependiendo de la materia prima de partida [19].

Tras la combustión de este biogás en turbinas de gas, calderas o motores de combustión, los siloxanos se adhieren a los cabezales de los cilindros, pistones, paletas de turbinas y superficies del intercambiador de calor, en forma de depósitos de óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) o silicatos (Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub>). Esto provoca el desgaste, abrasión, fallos y problemas graves en el funcionamiento de las máquinas, por lo que resulta importante su eliminación [19].

*Tecnologías para la eliminación de siloxanos del biogás.* Algunas tecnologías para la eliminación de los siloxanos del biogás son las siguientes:

- **Absorción química:** esta tecnología está basada en la absorción química del  $\text{CO}_2$ , el  $\text{H}_2\text{S}$  y los compuestos orgánicos volátiles por parte de compuestos químicos como aminas o soluciones acuosas de sales alcalinas [20]. El proceso tiene una gran eficiencia en la separación consiguiendo un alto porcentaje de metano y una muy baja presencia de sulfhídrico en la corriente de gas natural renovable y, por lo tanto, pérdidas de metano reducidas en el off-gas. Estos sistemas presentan una buena flexibilidad ante variaciones en el caudal de entrada [20].

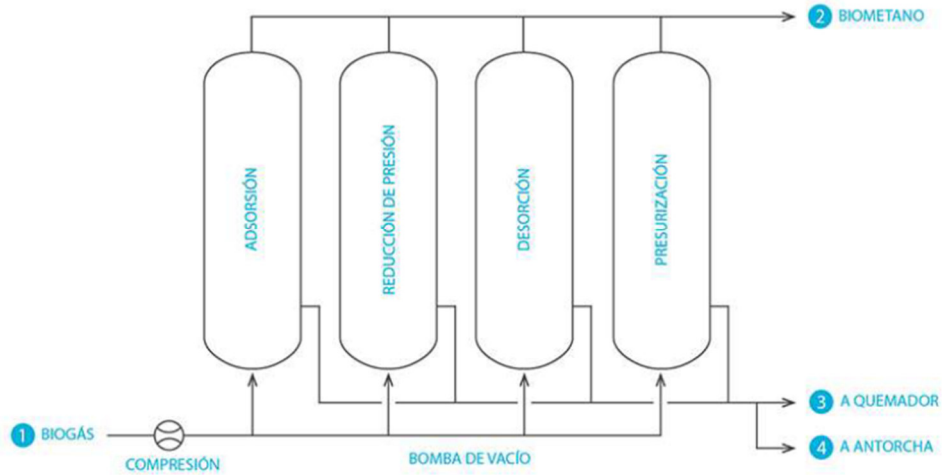
Figura 2. Adsorción Química



Fuente: Tomado de [20]

- **VPSA:** ciertos materiales, como el carbón activo o zeolitas, tienen la capacidad de adsorber y desadsorber el  $\text{CO}_2$  y esta propiedad se aprovecha en los sistemas PSA para purificar el biogás. El sistema consume energía eléctrica para conseguir los cambios de presión inherentes al proceso. Esta tecnología permite separar del metano prácticamente todo el  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$ , hasta conseguir un biometano con alto poder calorífico [20].

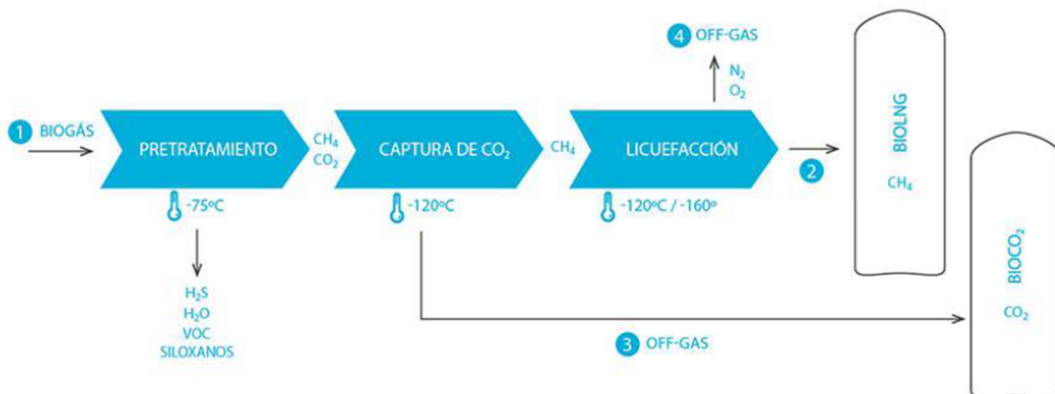
Figura 3. VPSA



Fuente: Tomado de [20]

- **Criogenización:** los distintos puntos de ebullición del metano ( $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y del dióxido de carbono ( $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) permiten separarlos mediante criogenización, recuperando el  $\text{CO}_2$  en estado líquido. Este sistema resulta de especial interés para la generación de bioGNL por las condiciones de salida del biometano [20].

Figura 4. Criogenización

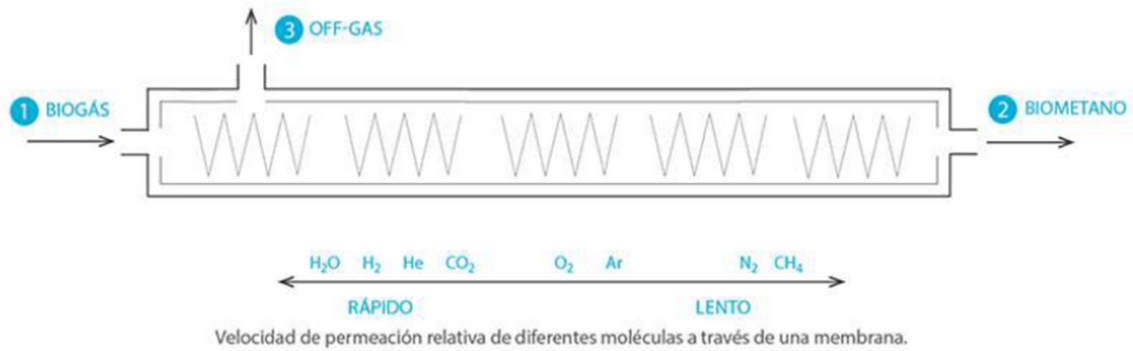


Fuente: Tomado de [20]

- **Membranas:** mediante la presurización del biogás y su paso a través de membranas selectivas se consigue un biometano con un alto grado de pureza, que se puede optimizar encadenando varias etapas para purificarlo progresivamente. Se trata de un sistema intensivo

en consumo eléctrico y modular. Aunque no presenta flexibilidad en cuanto al caudal a tratar se trata de una tecnología robusta ampliamente probada [20].

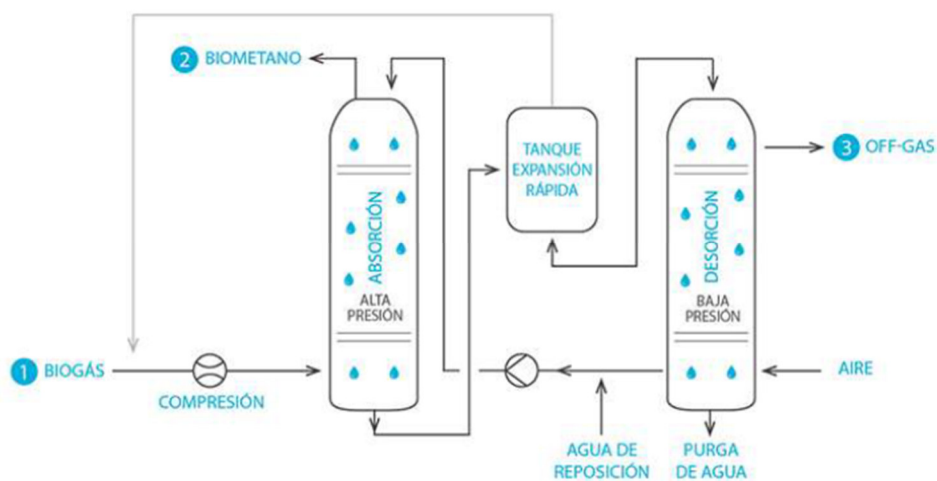
Figura 5. Membranas



Fuente: Tomado de [20]

- **PSW:** en el caso de esta tecnología la propiedad que se emplea para separar el metano y el  $\text{CO}_2$  es la diferencia de solubilidad en agua de estos compuestos. El biogás pasa por un sistema de agua presurizada, de forma que, el dióxido de carbono queda disuelto en ella y el gas sale del proceso con un alto contenido en metano. Sin embargo, este biometano sale saturado y será necesario implementar un sistema de secado [20].

Figura 6. PSW



Fuente: Tomado de [20]

- **Adsorción:** la tecnología más utilizada para la eliminación de los siloxanos del biogás es la adsorción por carbón activo, este proceso de adsorción consiste en la acumulación o retención de átomos, moléculas o especies en la superficie del material, en este caso carbón activo [19].

La adsorción por carbón activo resulta efectiva para la eliminación de los siloxanos, pero tiene el inconveniente de requerir constantemente el reemplazo del carbón activo utilizado, la regeneración de este carbón activo va a requerir de altas temperaturas, lo que supone un coste energético [19].

- **Criocondensación:** otra tecnología aplicada para la eliminación de los siloxanos es la criocondensación, esta técnica consiste en la condensación de los compuestos presentes en el biogás por bajas temperaturas y por la reducción de la presión, la desventaja de la criocondensación está en su alto coste, debido al elevado consumo energético, a su favor tiene que no resulta tóxica, al no tener que eliminar sus agentes como ocurre con la adsorción. [19]. La criocondensación suele usarse como pretratamiento del biogás, seguido de alguna otra tecnología, para mejorar la eficiencia en la eliminación de los siloxanos [19].

Actualmente, se están investigando y probando otras técnicas, como la degradación o la biofiltración, y materiales que permitan la eliminación de los siloxanos de forma más efectiva y eficiente [19]. Pero, por el momento, la adsorción por carbón activo es la que ofrece mejores resultados, es un material de fácil adquisición y bajo coste, que además es multiadsorbente, lo que permite la eliminación de otros compuestos, como el H<sub>2</sub>S y de los COV'S, al mismo tiempo [19].

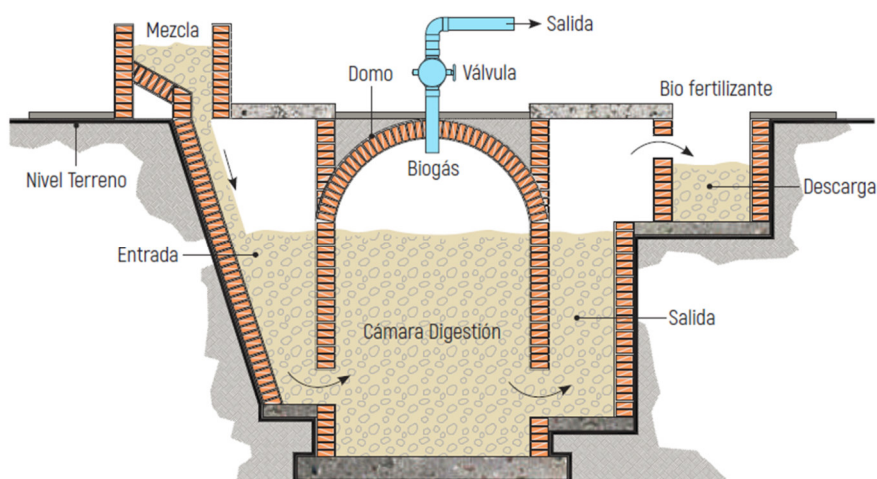
#### 4.7 Reactores anaerobios

Los reactores anaerobios de funcionamiento semicontinuo y de bajo costo son los sistemas más utilizados alrededor del mundo, por sus características de fácil acceso, instalación y bajo costo. Se componen principalmente de una cámara de fermentación, donde ocurre el proceso de digestión anaerobia, de un espacio (domo o campana) en la parte superior para el almacenamiento del gas, y de un par de cajas, de entrada y salida, para alimentar el biodigestor y sacar el bio-abono. Dentro

de este grupo de biodigestores, se distinguen por su popularidad tres modelos [10]: Modelo chino o de cúpula fija; Modelo hindú o de campana flotante; Modelo Taiwán o de flujo continuo.

**Biodigestor tipo chino o de cúpula fija:** se compone de una cámara de digestión con techo en forma de domo, y dos tanques conectados a la cámara, uno para la entrada, o alimentación del biodigestor con la mezcla de materia orgánica y agua, y otro, para la salida del biol. El biogás se acumula en la parte superior de la cámara de digestión anaerobia, y sale a través de un tubo que se conecta con una válvula de seguridad, y que continua hacia el lugar de aprovechamiento, donde será utilizado el biogás. A diferencia de los otros dos modelos, este se encuentra completamente enterrado, y es más eficiente para el tratamiento de aguas y la producción de bio-abono, que para la producción de biogás. En promedio un biodigestor de este tipo requiere entre 30 y 60 días para la completa digestión del sustrato [10]. (ver fig. 7)

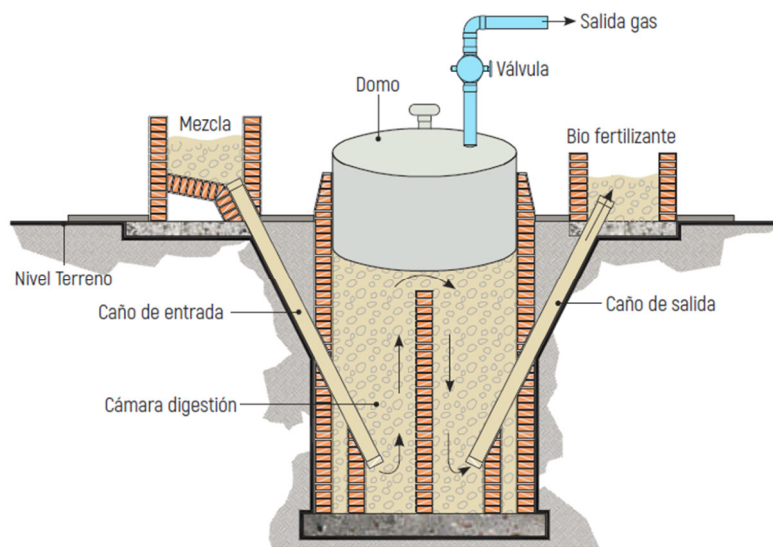
Figura 7. Biodigestor tipo chino o de cúpula fija



Fuente: Tomado de [10]

**Biodigestor tipo hindú o de campana flotante:** a diferencia del modelo anterior, el biodigestor tipo hindú está semienterrado, y consta de un tanque o reactor vertical, muy similar a un aljibe o pozo, y de una campana flotante o gasómetro, generalmente metálica, para acumular el biogás y generar presión constante, lo que es muy deseable para la operación de los equipos y sistemas que se alimentan con dicho biogás. De manera similar al biodigestor chino, este modelo también tiene una caja de entrada para alimentar el biodigestor, y una caja de salida por donde sale el bio-abono en un volumen equivalente al que se introduce en la caja de entrada. A diferencia del modelo chino, este sistema es mucho más eficiente para la producción de biogás [10]. (Ver. Fig. 8).

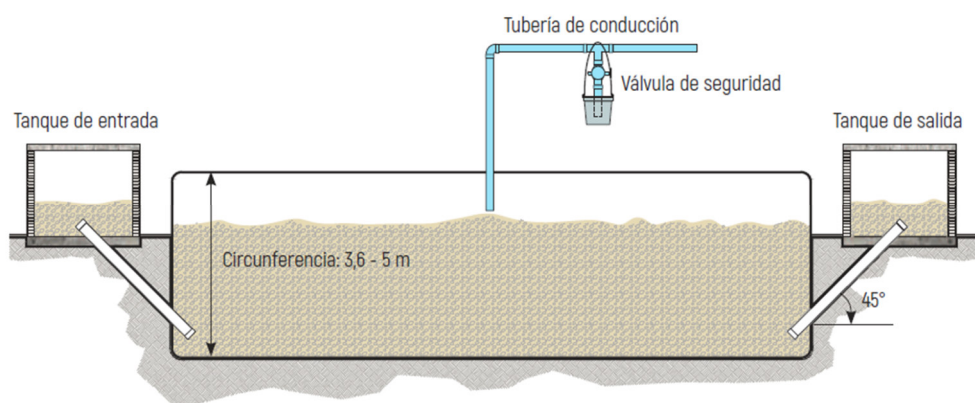
Figura 8. Biodigestor tipo hindú o de campana flotante



Fuente: Tomado de [10]

**Biodigestor tipo Taiwán o de flujo continuo:** es el sistema más económico de los tres modelos estudiados, porque a diferencia de los demás, está elaborado en plástico o geotextil, y no requiere de mucha mano de obra, o de la compra de materiales como cemento, ladrillos, varillas, y otros elementos de construcción que incrementan los costos de implementación. El biodigestor tubular de flujo continuo se construye generalmente semienterrado, pero a diferencia de los dos anteriores, la zanja es menos profunda, lo que implica que no requiere de complejos sistemas de contención, o de recubrimientos en materiales costosos como el cemento para garantizar la estabilidad de los taludes (Ver Fig. 9) [10].

Figura 9. Biodigestor tipo Taiwán o de flujo continuo



Fuente: Tomado de [10]

#### 4.8 Generación eléctrica

El gas natural contiene hasta un 97% de  $\text{CH}_4$ , 1  $\text{m}^3$  de biogás equivale a la energía de aproximadamente 0,65  $\text{m}^3$  de gas natural (asumiendo que el biogás tiene una concentración media de metano del 65%). Se requiere aproximadamente 1  $\text{m}^3$  de metano para obtener 10 KWh (poder calorífico del gas natural 35,2 a 43  $\text{MJ}/\text{m}^3$ , metano 90.5 %, etano 5.4 %, propano 0.6 %, butano 0.2 %, componentes pesados 0.2 %, dióxido de carbono 2.4 % y nitrógeno 0.7 % [22]). Considerando que la eficiencia o rendimiento térmico de un motor de combustión es del 40%-45%, entonces 1  $\text{m}^3$  de biogás puede producir alrededor de 2,8 KWh de energía eléctrica renovable [21].

En los apéndices 2, 3, 4 y 5 se incluye fichas técnicas de cuatro clases de motores que pueden usar como combustible biogás con algunos casos de éxito donde estos fueron empleados; en el sector palmero tenemos la implementación de una planta de biogás de 1,4 MW usando 630  $\text{m}^3/\text{h}$  con un porcentaje de metano de 54%-58%, con estas condiciones particulares se obtiene 2,2  $\text{KWh}/\text{m}^3$

Figura 10. Planta Jenbacher sector palmero



Fuente: Autor, 2023.

#### 4.9 Inventario de Biomasa

***Biomasa residuos del maíz.*** Los resultados de diferentes autores han obtenido los siguientes valores:

Tabla 2. Propiedades residuos del maíz

<b>Parámetro</b>	<b>Valores</b>
Poder calorífico del tallo y las hojas	17,97 MJ / Kg a 18.4 MJ / Kg
% lignina	11 a 16,9
%C	41,89 a 49,5
%H	5,4 a 5,81
%N	0,6 a 0,8
%O	39,7 a 43,3
%S	0,01 a 0,11

Fuente: Tomado de [22].

En la tabla 3, se observa el inventario por departamentos de las hectáreas de maíz tradicional y tecnificado cultivadas en Colombia, en la tabla 4, las toneladas producidas de cada variedad de maíz por departamento productor [23].

Los doce departamentos con el mayor número de hectáreas promedio cultivadas en los últimos cinco años son: Córdoba (31200), Meta (48314), Tolima (25144), Huila (25144), Santander (15780), Cundinamarca (15080), Bolívar (14100), Antioquia (13640), Boyacá (10680), Cesar (15494), Nariño (6786) y Valle del Cauca (6732).

El cultivo del maíz produce una gran cantidad de biomasa, de la cual se cosecha apenas cerca del 50% en forma de grano. El resto, corresponde a diversas estructuras de la planta tales como tallo, hoja, limbos (hoja que se desprende del tallo), mazorca entre otros. La producción de biomasa residual que genera un cultivo de maíz de grano (tallo, hojas, chalas (hoja alargada y firme que cubre la mazorca del maíz) y mazorcas), fluctúa entre 20 a 35 toneladas por hectárea y en el maíz de choclo (Tallo y hojas) varía entre 16 a 25 toneladas por hectárea [24].

Tabla 3. Hectáreas de maíz sembradas en Colombia

DEPARTAMENTO	ÁREA (HECTÁREA) - MAÍZ AMARILLO TECNIFICADO						ÁREA (HECTÁREA) - MAÍZ AMARILLO TRADICIONAL						
	2018	2019	2020	2021	2022	PROMEDIO	2018	2019	2020	2021	2022	PROMEDIO	
Córdoba	12.375	11.700	13.500	15.000	12.827	13080	20.000	20.000	23.000	19.500	8.100	18120	
Meta Antillanura	30.000	25.000	30.445	28.397	40.071	30783		200				200	
Tolima	17.490	15.155	20.200	27.450	18.677	19794	3.858	1.510				5368	
Huila	9.640	9.460	9.350	9.380	9.850	9536	16.000	15.400	15.740	15.000	15.900	15608	
Meta Piedemonte	14.550	13.730	12.900	23.500	19.300	16796	600	500	505			535	
Santander	8.000	4.500	4.000	13.200	13.700	8680	13.650	10.950	6.000	2.500	2.400	7100	
Cundinamarca	8.500	5.900	5.650	6.700	6.000	6550	7.610	7.440	8.700	8.800	10.100	8530	
Bolívar	7.875	9.580	800	1.175	5.500	4986	6.032	8.960	500	1.578	28.500	9114	
Antioquia	2.374	1.596	852	915	821	1312	12.540	10.791	11.793	14.453	12.063	12328	
Boyacá						0	9.920	10.590	9.690	11.670	11.530	10680	
Cesar Norte	3.525	3.060	1.297	4.375	1.830	2817	4.591	5.180	4.711	3.796	7.660	5188	
Cesar Sur	2.999	3.500	3.200	6.000	5.000	4140	6.508	3.300	1.700	2.840	2.400	3350	
Nariño	1.617	1.571	1.515	1.799	2.192	1739	4.995	5.544	4.610	5.000	5.085	5047	
Valle del Cauca	7.350	7.600	6.395	7.430	4.600	6675					57	57	
La Guajira	1.031	449		657	1.530	917	1.822	1.460		4.170	7.820	3818	
Casanare	0	0			2.800	2800					700	700	
Atlántico	2.330	3.140	700	762	830	1552	2.030	2.905	400	870	950	1431	
Risaralda				966	1.005	986					366	252	309
Caldas				767	785	776					461	270	366
Quindío				485	480	483					184	170	177
Putumayo								250			330	1.100	560
Cauca	190	230				210							
<b>Total (Hectáreas)</b>	<b>129.846</b>	<b>116.171</b>	<b>110.804</b>	<b>148.958</b>	<b>147.798</b>	<b>134.611</b>	<b>110.156</b>	<b>104.980</b>	<b>87.349</b>	<b>91.518</b>	<b>115.057</b>	<b>108.585</b>	

Fuente: Tomado de [23]

Tabla 4. Toneladas de maíz producidas por departamento en Colombia

DEPARTAMENTO	PRODUCCIÓN (TONELADAS) MAÍZ AMARILLO TECNIFICADO						PRODUCCIÓN (TONELADAS) MAÍZ AMARILLO TRADICIONAL					
	2018	2019	2020	2021	2022	PROMEDIO	2018	2019	2020	2021	2022	PROMEDIO
Meta Antillanura	158.000	177.500	223.493	173.320	264.459	199354		1.200				1200
Tolima	100.677	105.543	125.050	173.650	121.401	125264	19904	6820				13362
Meta Piedemonte	84.300	91.650	86.250	150.500	133.600	109260	2.700	2.000	2.035			2245
Córdoba	63.263	57.850	66.860	79.700	73.040	68143	36.950	39.500	49.080	39.400	12.600	35506
Huila	48.331	50.855	51.425	51.590	54.175	51275	24000	23100	23610	22.500	28.620	24366
Santander	39.500	25.140	22.500	53.150	71.600	42378	36.120	30.200	17.000	4.010	6.300	18726
Valle del Cauca	62.865	63.635	50.774	59.801	34.100	54235					281	281
Bolívar	39.895	47.250	3200	5.899	30.250	25299	13.071	19.388	1900	3.422	65.550	20666
Cundinamarca	25.596	19.193	17820	24120	21000	21546	12.095	13.392	9.700	15.840	18.180	13841
Cesar Sur	14.995	19.725	18600	33.000	24.500	22164	14.496	8.970	4.450	8.520	6.120	8511
Boyacá							24.396	25.580	19.380	25.220	26.585	24232
Antioquia	11.448	7.157	2.941	4.353	2.511	5682	19.185	15.507	16.416	20.026	21.082	18443
Cesar Norte	17.625	13.932	5.560	19.897	9.150	13233	8.644	9.580	8.362	6.640	13.788	9403
Casanare	0	0			16.800	16800					840	840
Nariño	6.192	6246	6666	7695	9.888	7337	8.559	10.841	9054	9.290	9.779	9505
La Guajira	3.775	1.983		2991	7.650	4100	2910	2585		7272	14076	6711
Atlántico	11.870	15.500	2800	3466	3983	7524	4.044	6.289	1500	1965	2185	3197
Risaralda				7728	8.040	7884				912	630	771
Caldas				5049	5495	5272				1153	675	914
Quindío				3615	3360	3488				454	425	440
Cauca	1.548	1.846				1697						
Putumayo								545		1485	2354	1461
<b>Total (Toneladas)</b>	<b>689.880</b>	<b>705.005</b>	<b>683.939</b>	<b>859.524</b>	<b>895.002</b>	<b>791.934</b>	<b>227.074</b>	<b>215.497</b>	<b>162.487</b>	<b>168.109</b>	<b>230.070</b>	<b>214.621</b>

Fuente: Tomado de [23]

La proporción entre los componentes del residuo depende principalmente de la variedad, nivel de fertilización y tipo de cultivo (Tabla 5) [24].

En la tabla 6, se calcula la cantidad de biomasa residuos del maíz (MZ) que se produce de los cultivos de maíz (hojas del tallo, tallos y hojas de la mazorca) de la siguiente manera: se suman los datos de maíz tecnificado (MT) y maíz tradicional (MR) dados en la tabla 4, de acuerdo con los valores reportados en la tabla 5, en donde se estima que el porcentaje del maíz es de 49.7%, es posible estimar la masa total de producción de la planta de maíz incluyendo panoja, tallos, chalas y mazorca. Con esta estimación y los datos de la tabla 5 es posible estimar los valores de biomasa residual del cultivo de maíz

Tabla 5. Composición planta maíz

Componente	Porcentaje del peso seco del maíz
Panoja	12,0%
Tallos	17,6%
Chalas	8,9%
<b>Total caña</b>	<b>38,5%</b>
Mazorca	11,8%
Grano	49,7%
<b>Total espiga</b>	<b>61,5%</b>

Fuente: Tomado de [24]

Tabla 6. Biomasa generada por residuos del Maíz

DEPARTAMENTO	PRODUCCIÓN (TONELADAS) GRANO MAÍZ AMARILLO (49,7%)					BIOMASA, 38,5% (PANOJA, HOJAS DEL TALLO, TALLOS Y HOJAS DE LA MAZORCA)				
	2022	2021	2020	2019	2018	2022	2021	2020	2019	2018
Meta	398.059	323.820	311.778	272.350	245.000	308355,6	250846,5	241518,2	210975,4	189788,7
Tolima	121.401	173.650	125.050	112.363	120.581	94043,0	134517,6	96869,7	87041,8	93407,8
Córdoba	85.640	119.100	115.940	97.350	100.213	66340,8	92260,6	89812,7	75412,0	77629,8
Huila	82.795	74.090	75.035	73.955	72.331	64137,0	57393,7	58125,7	57289,1	56031,1
Santander	77.900	57.160	39.500	55.340	75.620	60345,1	44278,9	30598,6	42869,0	58578,9
Valle del Cauca	34.381	59.801	50.774	63.635	62.865	26633,2	46324,7	39332,0	49294,7	48698,2
Bolívar	95.800	9.321	5.100	66.638	52.966	74211,3	7220,5	3950,7	51621,0	41030,0
Cundinamarca	39.180	39.960	27.520	32.585	37.691	30350,7	30954,9	21318,3	25241,9	29197,3
Cesar	53.558	68.057	36.972	52.207	55.760	41488,6	52720,2	28640,3	40442,0	43194,4
Boyacá	26.585	25.220	19.380	25.580	24.396	20594,0	19536,6	15012,7	19815,5	18898,3
Antioquia	23.593	24.379	19.357	22.664	30.633	18276,3	18885,1	14994,9	17556,6	23729,8
Casanare	17.640	0	0	0	0	13664,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Nariño	19.667	16.985	15.720	17.087	14.751	15235,0	13157,4	12177,5	13236,4	11426,8
La Guajira	21.726	10.263	0	4.568	6.685	16830,0	7950,2	0,0	3538,6	5178,5
Atlántico	6.168	5.431	4.300	21.789	15.914	4778,0	4207,1	3331,0	16878,8	12327,7
Risaralda	8.670	8.640	0	0	0	6716,2	6693,0	0,0	0,0	0,0
Caldas	6.170	6.202	0	0	0	4779,6	4804,4	0,0	0,0	0,0
Quindío	3.785	4.069	0	0	0	2932,0	3152,0	0,0	0,0	0,0
Cauca	0	0	0	1.846	1.548	0,0	0,0	0,0	1430,0	1199,2
Putumayo	2.354	1.485	0	545	0	1823,5	1150,4	0,0	422,2	0,0
<b>Total (Toneladas)</b>	<b>1.056.532</b>	<b>974.558</b>	<b>826.406</b>	<b>874.667</b>	<b>878.056</b>	<b>818.440</b>	<b>754.939</b>	<b>640.174</b>	<b>677.559</b>	<b>680.184</b>

Fuente: Tomado de [23]

***Biomasa Residuos estiércol del cerdo.*** En la tabla 7 se observa el censo porcino de los últimos cinco años [25] y subrayados los departamentos con la mayor producción anual de residuos de maíz, en promedio la producción de estiércol de cerdo por año es de 0,72 Toneladas [6], los datos de residuos generados se multiplican por este valor para obtener la cantidad de biomasa generada, como se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Biomasa proveniente del estiércol de cerdo

DEPARTAMENTO	CENSO PORCINO					BIOMASA GENERADA (0,72 TON * AÑO)					
	2022	2021	2020	2.019	2.018	2022	2021	2020	2.019	2.018	PROMEDIO
ANTIOQUIA	2.560.952	2.256.460	1.998.407	1.921.356	1.855.405	1.843.885	1.624.651	1.438.853	1.383.376	1.335.892	1.525.332
VALLE DEL CAUCA	1.418.679	550.756	932.437	929.290	311.394	1.021.449	396.544	671.355	669.089	224.204	596.528
CUNDINAMARCA	709.661	325.362	616.282	578.586	538.678	510.956	234.261	443.723	416.582	387.848	398.674
CORDOBA	673.960	351.987	420.259	388.745	380.210	485.251	253.431	302.586	279.896	273.751	318.983
META	842.410	185.168	338.499	390.472	264.302	606.535	133.321	243.719	281.140	190.297	291.003
SUCRE	377.556	204.075	231.789	215.283	214.474	271.840	146.934	166.888	155.004	154.421	179.017
MAGDALENA	199.285	219.025	275.444	272.589	260.768	143.485	157.698	198.320	196.264	187.753	176.704
BOLIVAR	260.527	376.224	304.261	146.640	129.170	187.579	270.881	219.068	105.581	93.002	175.222
ATLANTICO	268.539	185.655	198.240	177.231	173.053	193.348	133.672	142.733	127.606	124.598	144.391
BOYACA	235.843	105.216	165.956	202.224	168.870	169.807	75.756	119.488	145.601	121.586	126.448
CALDAS	252.479	122.964	132.147	142.058	122.835	181.785	88.534	95.146	102.282	88.441	111.238
RISARALDA	214.097	85.845	128.601	122.052	126.365	154.150	61.808	92.593	87.877	90.983	97.482
CESAR	167.957	176.297	104.317	129.301	77.378	120.929	126.934	75.108	93.097	55.712	94.356
CAUCA	203.337	78.384	121.887	119.670	98.022	146.403	56.436	87.759	86.162	70.576	89.467
NARIÑO	158.790	74.071	90.564	91.086	118.519	114.329	53.331	65.206	65.582	85.334	76.756
SANTANDER	172.914	66.930	81.155	75.091	76.549	124.498	48.190	58.432	54.066	55.115	68.060
QUINDIO	169.500	63.505	77.157	80.755	70.158	122.040	45.724	55.553	58.144	50.514	66.395
N. DE SANTANDER	110.020	99.569	84.123	78.939	84.398	79.214	71.690	60.569	56.836	60.767	65.815
TOLIMA	168.587	69.524	64.497	72.705	67.343	121.383	50.057	46.438	52.348	48.487	63.742
CASANARE	96.084	88.422	76.850	65.325	71.404	69.180	63.664	55.332	47.034	51.411	57.324
HUILA	113.264	42.898	54.207	63.192	59.112	81.550	30.887	39.029	45.498	42.561	47.905
CAQUETA	73.622	46.711	54.370	66.587	64.968	53.008	33.632	39.146	47.943	46.777	44.101
LA GUAJIRA	77.906	71.713	50.070	44.435	42.287	56.092	51.633	36.050	31.993	30.447	41.243
ARAUCA	60.547	46.217	35.675	31.900	49.189	43.594	33.276	25.686	22.968	35.416	32.188
PUTUMAYO	42.411	28.536	38.270	38.045	38.281	30.536	20.546	27.554	27.392	27.562	26.718
CHOCO	13.498	15.134	16.573	13.375	28.698	9.719	10.896	11.933	9.630	20.663	12.568
VICHADA	7.722	6.624	5.740	5.243	4.369	5.560	4.769	4.133	3.775	3.146	4.277
GUAVIARE	2.229	1.732	7.787	6.767	6.700	1.605	1.247	5.607	4.872	4.824	3.631
SAN ANDRES Y PROV.	1.574	2.477	2.477	2.137	2.240	1.133	1.783	1.783	1.539	1.613	1.570
BOGOTA D.C.	1.285	756	1.584	1.653	1.675	925	544	1.140	1.190	1.206	1.001
AMAZONAS	1.656	952	270	193	187	1.192	685	194	139	135	469
GUAINIA	851	732	630	452	230	613	527	454	325	166	417
VAUPES	462	192	141	148	143	333	138	102	107	103	156
<b>TOTAL (TONELADAS)</b>	<b>4.968.912</b>	<b>2.817.535</b>	<b>3.163.540</b>	<b>3.044.293</b>	<b>2.801.897</b>	<b>3.577.617</b>	<b>2.028.625</b>	<b>2.279.770</b>	<b>2.191.891</b>	<b>2.017.366</b>	<b>2.418.649</b>

Fuente: Autor con datos tomados de [25]

**Relación entre las biomásas.** En la tabla 8 se resumen el porcentaje entre la biomasa del residuo del maíz respecto a la biomasa porcina, se observa que la variación del año 2022 va del 0% al 78,6% en diferentes departamentos.

Tabla 8. Relación biomasa porcina/ biomasa maíz

DEPARTAMENTO	RELACIÓN BIOMASA MAÍZ / BIOMASA PORCINA				
	2022	2021	2020	2019	2018
AMAZONAS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
AMAZONAS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
ANTIOQUIA	1,0%	1,2%	1,0%	1,3%	1,8%
ARAUCA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
ATLANTICO	2,5%	3,1%	2,3%	13,2%	9,9%
BOGOTA D.C.	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BOLIVAR	39,6%	2,7%	1,8%	48,9%	44,1%
BOYACA	12,1%	25,8%	12,6%	13,6%	15,5%
CALDAS	2,6%	5,4%	0,0%	0,0%	0,0%
CAQUETA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CASANARE	19,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CAUCA	0,0%	0,0%	0,0%	1,7%	1,7%
CESAR	34,3%	41,5%	38,1%	43,4%	77,5%
CHOCO	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CORDOBA	13,7%	36,4%	29,7%	26,9%	28,4%
CUNDINAMARCA	5,9%	13,2%	4,8%	6,1%	7,5%
GUAINIA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GUAVIARE	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
HUILA	78,6%	185,8%	148,9%	125,9%	131,6%
LA GUAJIRA	30,0%	15,4%	0,0%	11,1%	17,0%
MAGDALENA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
META	50,8%	188,2%	99,1%	75,0%	99,7%
NARIÑO	13,3%	24,7%	18,7%	20,2%	13,4%
N. DE SANTANDER	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
PUTUMAYO	6,0%	5,6%	0,0%	1,5%	0,0%
QUINDIO	2,4%	6,9%	0,0%	0,0%	0,0%
RISARALDA	4,4%	10,8%	0,0%	0,0%	0,0%
SAN ANDRES Y PROV.	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
SANTANDER	48,5%	91,9%	52,4%	79,3%	106,3%
SUCRE	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
TOLIMA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VALLE DEL CAUCA	2,6%	11,7%	5,9%	7,4%	21,7%
VAUPES	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VICHADA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fuente: Autor con datos tomados de [23] [25]

**Manejo de biomasa.** En la tabla 9, se resume el proceso que se puede implementar por departamento, en aquellos donde no existe granjas porcícolas, pero hay biomasa de los residuos del maíz se recomienda el proceso termoquímico, en aquellos donde exista las dos biomasa el proceso bioquímico es el ideal (co-digestion). La relación de biomasa del maíz respecto a la del estiércol del cerdo varia de 1% al 79% con un promedio del 20%.

Tabla 9. Relación biomasa

<b>PROCESO TERMOQUÍMICO</b>	<b>PROCESO BIOQUÍMICO</b>	
<b>DEPARTAMENTO</b>	<b>DEPARTAMENTO</b>	<b>RELACIÓN DE BIOMASA</b>
AMAZONAS	ANTIOQUIA	1,0%
AMAZONAS	ATLANTICO	2,5%
ARAUCA	BOLIVAR	39,6%
BOGOTA D.C.	BOYACA	12,1%
CAQUETA	CALDAS	2,6%
CAUCA	CASANARE	19,8%
CHOCO	CESAR	34,3%
GUAINIA	CORDOBA	13,7%
GUAVIARE	CUNDINAMARCA	5,9%
MAGDALENA	HUILA	78,6%
N. DE SANTANDER	LA GUAJIRA	30,0%
SAN ANDRES Y PROV.	META	50,8%
SUCRE	NARIÑO	13,3%
TOLIMA	PUTUMAYO	6,0%
VAUPES	QUINDIO	2,4%
VICHADA	RISARALDA	4,4%
	SANTANDER	48,5%
	VALLE DEL CAUCA	2,6%

Fuente: Autor, 2023

La selección de la muestra para su caracterización se tomará con el 20% residuos del maíz y el 80% del estiércol del cerdo.

## Capítulo 5

### METODOLOGÍA

La metodología empleada considera cuatro fases, de acuerdo con los objetivos específicos, a continuación, se presenta una descripción detallada de cada una de ellas:

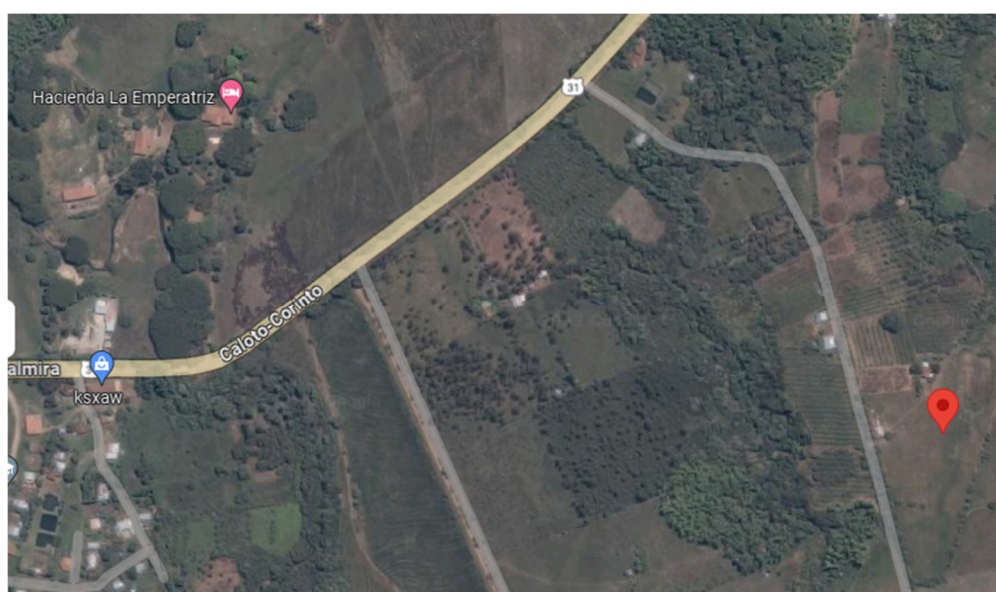
#### 5.1 Etapa 1. Porcentajes de la mezcla para el proceso de co-digestión

A partir del inventario nacional por regiones de la biomasa existente de los residuos del maíz (Tallos y hojas) y del estiércol del cerdo, obtenidos de Fenalce y del ICA se clasifican los departamentos donde se puede aplicar el proceso bioquímico y termoquímico, mostrado en la tabla 9.

#### 5.2 Etapa 2. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa

Después de la cosecha del maíz las plantas se arrancan del suelo o se caen hasta secar en los lotes donde se cultiva, posteriormente se acopia y se queman sin ningún control ambiental. La recolección de la biomasa del maíz se realizó en el municipio de Caloto, Cauca en la vereda de Bodega ( $3^{\circ}02'12.1''N$   $76^{\circ}23'20.0''W$ ), como se observa en la Figura 11, después de cultivar una hectárea de maíz los campesinos apilaron los restos.

Figura 11. Ubicación cultivo de maíz



Fuente: Autor, con datos tomados [26]

Se empleó el método de zigzag, donde a la pila de residuos se trazó una línea imaginaria en forma de zigzag, con el fin de determinar los puntos de toma de la muestra, como se evidencia en la Figura 12. De esta manera, se tomaron muestras de 7 puntos diferentes compuestas por tallos y hojas, hasta conformar una muestra compuesta de 5 Kg.

Figura 12. Puntos de muestras



Fuente: Autor, 2023

Para reducir el tamaño de la biomasa, se lleva hasta una picadora que se observa en la Figura 13, transformando la biomasa con un tamaño aproximado de 1" (Figura 14).

Figura 13. Picadora



Fuente: Autor, 2023

Figura 14. Biomasa con tamaño 1”

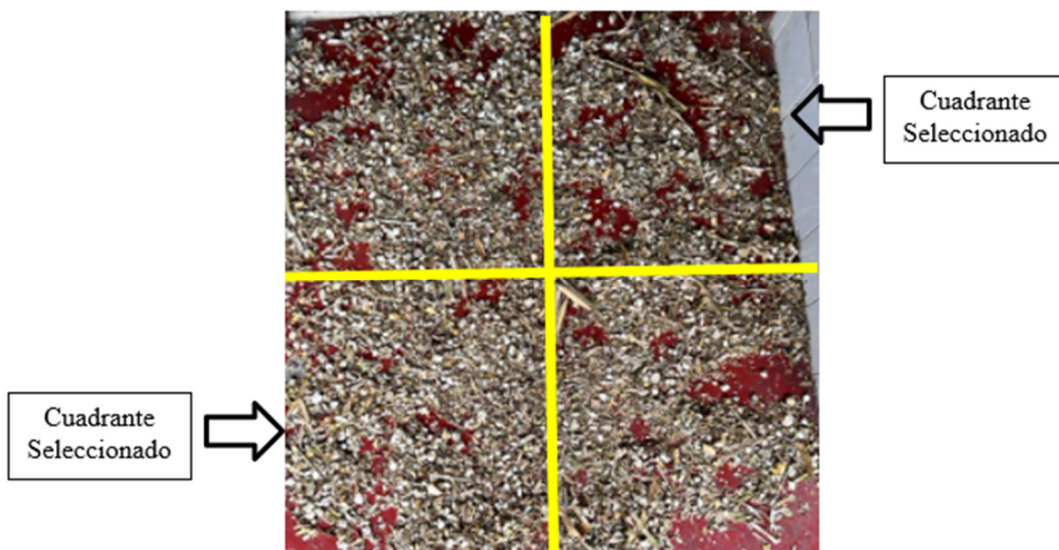


Fuente: Autor, 2023

Posteriormente la biomasa es secada naturalmente con la ayuda del sol (temperatura ambiente entre 25°C - 35°C), perdiendo el 2% de su peso (100 gramos), pasando de 5 Kg a 4,9 Kg, la muestra pierde el 2% de humedad, permitiendo ser transformada en tamaños más pequeños usando equipos mecánicos (molino).

La muestra fue extendida en un área cuadrada de 1,5m x 1,5m aproximadamente, para someterlo a un cuarteo. Se dividió el área en 4 partes iguales y se seleccionaron 2 lados opuestos que conformarían la muestra, descartando los otros dos lados (Figura 15), se empaca y se pesa en dos bolsas transparentes herméticas cuyo peso es de 2,45 Kg (Figura 16).

Figura 15. Cuartetos de muestra



Fuente: Autor, 2023

Figura 16. Biomasa residuos maíz seleccionada.



Fuente: Autor, 2023

Por último, la biomasa se pasa por un molino y un tamiz para reducir su tamaño como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Biomasa residuos del maíz



Fuente: Autor, 2023

La recolección del estiércol del cerdo se realizó en el mismo municipio, se secó naturalmente (temperatura ambiente entre 25°C - 35°C), la muestra inicial fue de 4 Kg y al finalizar del secado de 3,5 Kg, perdiendo el 12,5% de su peso (500 gramos) por pérdida de humedad, este secado permite transformarla en tamaños más pequeños usando equipos mecánicos (molino). Se muele para reducir su tamaño de forma similar a la biomasa del maíz, se mezclan en relación 80% biomasa residuos del estiércol del cerdo y 20% residuos del cultivo de maíz, se lleva al laboratorio ambiental de la universidad de los Andes para aplicar los ensayos de la tabla 10.

Tabla 10. Ensayos Caracterización Biomasa.

PARÁMETRO	TÉCNICA	MÉTODO DE REFERENCIA
Humedad	Gravimétrica	SM 2540 Edición No. 22-2012
Cenizas a 575°C	Gravimétrica	ASTM E1755
Material volátil 950°C	Gravimétrica	ASTM E872
Carbono fijo	Calculo a partir de humedad, ceniza, material volátil	
Poder Calorífico	Bomba calorimétrica	ASTM E711-06 Reaprobado (2004)
Análisis Elemental	Analizador elemental	ASTM D5373
Carbono		
Nitrógeno		
Hidrogeno (H)		
Azufre (S)		

Fuente: Tomado de [27]

### 5.3 Etapa 3. Cuantificación del potencial de biogás (metano)

la estimación del potencial de biogás se realiza por medio de las aproximaciones matemáticas mostradas en la sección 4.5, usando para estos cálculos los datos obtenidos de la caracterización de la biomasa.

De esta forma es posible estimar el volumen de biogás generado a partir de la co digestión de los residuos de maíz y cerdo con una proporción de 20 residuos de maíz y 80% residuos de cerdo

### 5.4 Etapa 4: Generación de energía eléctrica

A partir de la estimación del volumen del gas producido por co - digestión, es posible realizar un cálculo aproximado de la energía eléctrica que se podría generar usando motores de combustión interna o turbinas de gas. Los datos de estas máquinas se obtendrán de fichas técnicas de fabricantes.

## Capítulo 6

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 6.1 Resultados caracterización de la biomasa

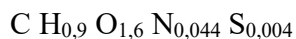
Los datos mostrados en la tabla 11 son el resultado entregado por el laboratorio ambiental de la universidad de los Andes después de caracterizar la muestra de biomasa

Tabla 11. Resultados análisis próximo y último Biomasa

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES
<b>Humedad</b>	2,5	%BH
<b>Solidos Totales</b>	97,5	%BH
<b>Cenizas</b>	27,2	%BS
<b>Material Volátil</b>	58,1	%BS
<b>Poder Calorífico</b>	6860	BTU/lb
Análisis Elemental		
<b>Nitrógeno</b>	1,870	%BS
<b>Carbono (C)</b>	36,200	%BS
<b>Azufre (S)</b>	0,361	%BS
<b>Hidrogeno (H)</b>	2,700	%BS
<b>Oxigeno (O)</b>	58,869	%BS

*Fuente: Autor, con datos tomados de [28]*

Formula empírica de la biomasa caracterizada en base seca y sin ceniza (DAF):



#### 6.2 Estimación producción de biogás

**Relación C/N:** Usando los datos de la tabla 9:

$$C/N = \frac{36,2\% * 12 \frac{g}{mol}}{1,870\% * 14 \frac{g}{mol}} = 16,6$$

Valor que se encuentra dentro del rango óptimo de C/N descrito en el marco teórico (15-30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno).

**Poder calorífico:** 6860 BTU / Lb (16 MJ/Kg), comparado con 16,6 MJ/Kg cañas del maíz, 16,4 MJ/Kg hojas planta de maíz, 14 MJ/Kg estiércol del cerdo [30] y bagazo de caña 19,4 MJ/Kg

el cual es usado en el proceso de combustión en las calderas de biomasa para cogenerar [29], se tiene una relación de 82% respecto a la mezcla, lo que demuestra la importancia de esta biomasa.

**Volumen de biogás:** Aplicando el método 1 del marco teórico para la obtención del volumen de biogás con las ecuaciones 1, 2 y 3 se obtiene los resultados mostrados en la tabla 1:

Tabla 12. Metros cúbicos de biogás con el método N°1

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES
Peso Muestra	0,1	Kg
Solidos Volátiles	0,0566475	Kg
Volumen CH <sub>4</sub>	22,659	L
	0,03486	m <sup>3</sup>
m <sup>3</sup> (60%) CH <sub>4</sub> / Ton	209,16	m <sup>3</sup>
m <sup>3</sup> (40%) Otros Gases (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> ) / Ton	139,44	m <sup>3</sup>
<b>Total m<sup>3</sup> (100%) Biogas / Ton</b>	<b>348,60</b>	<b>m<sup>3</sup></b>

[28]

Por cada tonelada de biomasa (566,5 Kg de solidos volátiles) se generan 348,6 m<sup>3</sup> de biogás, de los cuales 209,16 m<sup>3</sup> corresponden a metano (60%) y el restante monóxido de carbono, ácido sulfhídrico y amoniaco

Aplicando el método 2 del marco teórico para la obtención del volumen de biogás con las ecuaciones 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se tiene:

Tabla 13. Calculo estequiométrico

PARÁMETRO	N	C	S	H	O
Peso Muestra (Kg)	0,1				
% Elementos	1,87%	36,20%	0,36%	2,70%	58,87%
Peso molecular (Kg/Kmol)	14,0067	12,0170	32,0650	1,0079	15,9990
Peso (Kg)	0,00187	0,0362	0,000361	0,0027	0,058869
Moles (Kmol)	0,0001335	0,0030124	0,0000113	0,0026788	0,0036795

Fuente: Autor, con datos tomados de [28]

Tabla 14. Metros cúbicos de biogás con el método N°2

PARÁMETRO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S
<b>Peso Molecular (Kg/Kmol)</b>	16,048600	44,015000	17,030400	34,080800
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	0,656000	1,976000	0,730000	1,360000
<b>Moles (Kmol)</b>	0,000868	0,000134	0,000134	0,000011
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	0,021242	0,002974	0,003115	0,000282
<b>Volumen (m<sup>3</sup>) x Ton</b>	212,420997	29,738533	31,146394	2,821284

Fuente: Autor, con datos tomados de [28]

Los metros cúbicos totales de biogás por el método dos es 276,12 m<sup>3</sup>, Por cada tonelada de biomasa se generan 212,4 m<sup>3</sup> de metano y el restante monóxido de carbono, ácido sulfhídrico y amoniacó

Aplicando el método 3 del marco teórico para la obtención del volumen de biogás con las ecuaciones 11, 12 y 13 se tiene:

Tabla 15. Metros cúbicos de biogás con el método N°3

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES
Peso Muestra	0,1	Kg
Peso C	0,0352950	Kg
Material Volátil	58,1	%BS
Carbono biodegradado	0,0205064	Kg
Producción de Metano	0,0108684	Kg
Densidad CH <sub>4</sub>	0,6560000*	Kg/m <sup>3</sup>
Volumen CH <sub>4</sub>	0,0166	m <sup>3</sup>
<b>m<sup>3</sup> (55%) CH<sub>4</sub> Ton</b>	165,68	m <sup>3</sup>
<b>m<sup>3</sup> (45%) Otros Gases (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>) / Ton</b>	135,60	m <sup>3</sup>
<b>Total m<sup>3</sup> (100%) Biogas / Ton</b>	301,28	m <sup>3</sup>

Fuente: Autor, con datos tomados de [28]

(\*) La densidad del metano en condiciones normales de Temperatura (25°C) y Presión (101.325 kPa) [18],

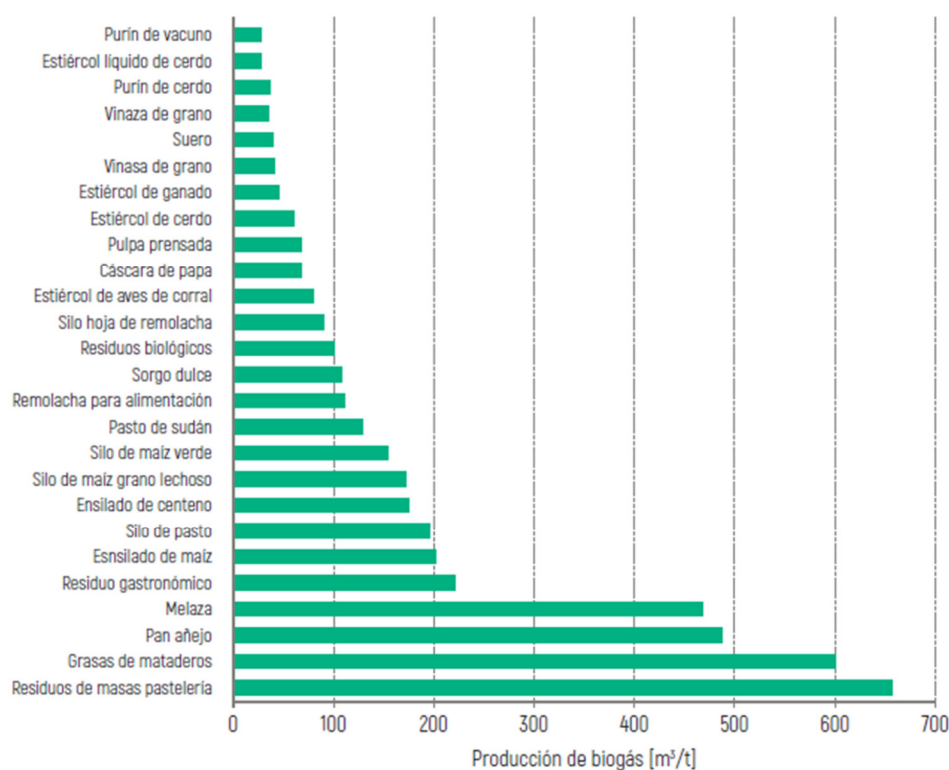
Por cada tonelada de biomasa se generan 301,28 m<sup>3</sup> de biogás, de los cuales 165,68 m<sup>3</sup> corresponden a metano (55%) y el restante monóxido de carbono, ácido sulfhídrico y amoníaco

El volumen mínimo calculado es de 276,12 m<sup>3</sup> de biogás que se obtiene con el método 2, el método 1 se basa en los sólidos volátiles disponibles en la biomasa y asume que cada kilogramo de sólidos volátiles puede generar hasta 400 litros de biogás, con un 60% de contenido de metano (CH<sub>4</sub>) [10], se obtiene un volumen de 348,60 m<sup>3</sup>. El método dos son reacciones estequiométricas exactas, se basa en que la biomasa solo está compuesta por carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, pero omite variables representativas como los sólidos volátiles dentro de la muestra, permite calcular los volúmenes de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>S, el volumen obtenido de biogas es de 276,12 metros cúbicos. Por último, se tiene el método tres que basa su cálculo en el porcentaje de carbono y sólidos volátiles dentro de la muestra, este asume un 55% de metano. Los tres métodos usan datos que varían con la ubicación de las granjas y de los cultivos como se mencionó en el marco teórico.

Como los métodos 1 y 3 se basan en los sólidos volátiles pero el método 3 incluye la variable de contenido de carbono dentro de la biomasa para la estimación del volumen de biogás, adicionalmente este método contempla un porcentaje menor de metano dentro del biogás generado, se considera que el método 3 da la mejor aproximación del volumen obtenido por tonelada de la biomasa caracterizada. El resultado de 301,28 m<sup>3</sup> frente a los 50 m<sup>3</sup> de generación con solo estiércol es una comprobación de que el proceso de co-digestión podría mejorar la producción de biogás, otros casos son las mezclas de 30% estiércol con 70% residuos de maíz que genera 238 m<sup>3</sup>, 50% estiércol con 50% residuos de maíz genera 275 m<sup>3</sup>, 70% estiércol con 30% residuos de maíz genera 287 m<sup>3</sup>, 30% estiércol con 70% residuos de soya genera 260 m<sup>3</sup>, 50% estiércol con 50% residuos de maíz genera 253 m<sup>3</sup> y 70% estiércol con 30% residuos de soya genera 287 m<sup>3</sup> [33].

Con el fin de comparar el resultado obtenido en la Figura 19 se observa otras fuentes de generación de biogás con diferentes fuentes de biomasa, estando por encima de varias fuentes de biomasa.

Figura 18. Generación de biogás por otras fuentes



Fuente: Tomado de [10]

Del inventario de las biomásas de las tablas 6 (Biomasa generada por residuos del Maíz) y tabla 7 (Biomasa generada por residuos del Maíz) se tiene la relación entre la biomasa de los residuos de los cultivos de maíz respecto a la biomasa del estiércol del cerdo, en caso que esta sea mayor a 20%, se usa la totalidad de la biomasa de los residuos del estiércol de los cerdos existente en la tabla 7, se calcula el 20% que debe añadirse de biomasa de los residuos de los cultivos de maíz para completar el 100%. El sobrante de esta última podrá ser procesado por otros medios (abonos, digestión anaerobia, combustión entre otros). Para el caso que la relación sea menor al 20% se usa el 100% de los residuos de los cultivos del maíz se calcula el 80% restante que se completa con los residuos del estiércol de los cerdos provenientes de las granjas porcícolas.

Para la producción de biogás con la biomasa estudiada se sugiere el uso de digestor tipo Taiwán o de flujo continuo que es un sistema económico (elaborado en plástico o geotextil) y no requiere de mucha mano de obra, se construye generalmente semienterrado.

Para el tratamiento del biogás se sugiere su caracterización para determinar sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), amoníaco ( $NH_3$ ), compuestos orgánicos volátiles (COV's) o siloxanos que pueden eliminarse con las técnicas propuestas en el marco teórico.

Para su uso en motores se realiza el enfriamiento del biogás hasta  $2^\circ C$ . para la eliminación de siloxanos, la condensación para la reducción del nivel de humedad del biogás, el lavado para la reducción de gases ácidos ( $H_2S$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ) y la adsorción en carbón activo para la eliminación de siloxanos y compuestos halogenados, En este sentido, el aprovechamiento del biogás, como combustible o materia prima para la producción de otros productos, es la mejor opción, e implica un beneficio para el medio ambiente, no sólo porque se evita la emisión del gas metano a la atmósfera y reduce la emisión de otros gases causantes del efecto invernadero [32].

### **6.3 Estimación de generación de energía eléctrica**

En las columnas dos y tres de la tabla 16 se observa el resumen de las biomasa existentes, las columnas cuatro y cinco las biomazas ajustadas para obtener la mezcla 80-20, en la sexta columna el peso total de esta mezcla (suma de los residuos del maíz + estiércol del cerdo), en la séptima columna con la toneladas de biomasa obtenida en la sexta columna se multiplica por los  $261,42 m^3$  que es el valor obtenido en los cálculos de biogás por cada tonelada, en la última columna se estima la energía eléctrica generada a partir del volumen de biogás producido.

En la tabla 17, se resume la generación obtenida usando motores Jenbacher, esta marca ha suministrado más de 53.000 motores con una capacidad total de más de 56 GW en todo el mundo. [31]. De las fichas técnicas de los anexos del 2 al 5 se tiene en la mayoría de los casos que la generación de gas natural y biogás es igual con el mismo tipo de motor con eficiencias diferentes (menor con el uso del biogás) esto implica que requiere mayor cantidad de  $m^3$  de biogás, por ejemplo el motor J312 tiene una potencia de 635 KWh con una eficiencia de 45% con gas natural y 42,8% con biogás, otro ejemplo en el motor J416 tiene una potencia de 1202 KWh con una eficiencia de 44,9% con gas natural y 43,5% con biogás.

Tabla 16. MW h por departamento

DEPARTAMENTO	BIOMASA ESTIERCOL EXISTENTE (TON)	BIOMASA MAIZ EXISTENTE (TON)	BIOMASA ESTIERCOL REQUERIDA (TON)	BIOMASA MAIZ REQUERIDA (TON)	TOTAL REQUERIDO 2 BIOMASAS (TON)	BIOGAS GENERADO M3 POR AÑO	POTENCIA PROMEDIO / HORA MW/h
ANTIOQUIA	1.843.885	18.276	91.381	18.276	109.658	22.020.344	5,5
ATLANTICO	193.348	4.778	23.890	4.778	28.668	5.756.855	1,4
BOLIVAR	187.579	74.211	187.579	37.516	225.095	45.201.393	11,4
BOYACA	169.807	20.594	102.970	20.594	123.564	24.812.904	6,2
CALDAS	181.785	4.780	23.898	4.780	28.677	5.758.722	1,4
CASANARE	69.180	13.665	68.324	13.665	81.989	16.464.157	4,1
CESAR	120.929	41.489	120.929	24.186	145.115	29.140.513	7,3
CORDOBA	485.251	66.341	331.704	66.341	398.045	79.931.431	20,1
CUNDINAMARCA	510.956	30.351	151.754	30.351	182.104	36.568.349	9,2
HUILA	81.550	64.137	81.550	16.310	97.860	19.651.286	4,9
LA GUAJIRA	56.092	16.830	56.092	11.218	67.311	13.516.679	3,4
META	606.535	308.356	606.535	121.307	727.842	146.158.000	36,7
NARIÑO	114.329	15.235	76.175	15.235	91.410	18.356.042	4,6
PUTUMAYO	30.536	1.824	9.118	1.824	10.941	2.197.088	0,6
QUINDIO	122.040	2.932	14.660	2.932	17.592	3.532.700	0,9
RISARALDA	154.150	6.716	33.581	6.716	40.297	8.092.077	2,0
SANTANDER	124.498	60.345	124.498	24.900	149.398	30.000.551	7,5
VALLE DEL CAUCA	1.021.449	26.633	133.166	26.633	159.799	32.089.240	8,1
<b>TOTAL</b>	<b>6.073.901</b>	<b>777.492</b>	<b>2.237.805</b>	<b>447.561</b>	<b>2.685.366</b>	<b>539.248.331</b>	<b>135,4</b>

Fuente: Autor, con datos de [25] [23]

En la tabla 16 se observa que el departamento con la mayor generación de biogás usando la mezcla 80% Biomasa del estiércol del cerdo – 20% es el Departamento del Meta, seguido por Córdoba, Bolívar, Cundinamarca, Valle del Cauca, Santander, Cesar, Boyacá, Antioquia, Huila, Nariño, Casanare, La Guajira, Risaralda, Caldas, Atlántico, Quindío y Putumayo, con este volumen de biogás se obtiene una potencia promedio indicada en la columna 8 de la tabla 16 por departamento, que en total puede aportar 135,4 MW/h de los 9500 MW h en el pico de demanda del país [1], esto equivale al 1,4%.

Tabla 16. MW h Motores Jenbacher

<b>GENERACIÓN (MW) CON MOTOR TIPO 2</b>					
<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>TIPO</b>	<b>COMBUSTIBLE GAS NATURAL (GN)</b>		<b>COMBUSTIBLE BIOGÁS</b>	
		<b>1500 RPM 50 HZ</b>	<b>1800 RPM 60 HZ</b>	<b>1500 RPM 50 HZ</b>	<b>1800 RPM 60 HZ</b>
500 mg/m <sup>3</sup>	J208	330	335	330	335
250 mg/m <sup>3</sup>	J208	294	335	330	
<b>GENERACIÓN (MW) MOTOR TIPO 3</b>					
500 mg/m <sup>3</sup>	J312	635		548	635
	J316	851		851	847
	J320	1067		1067	1062
250 mg/m <sup>3</sup>	J312	635	635	635	635
	J316	851	847	851	847
	J320	1067	1062	1067	1062
<b>GENERACIÓN (MW) MOTOR TIPO 4</b>					
500 mg/m <sup>3</sup>	J412	901	851	901	851
	J416	1202	1141	1202	1141
	J420	1561	1560	1561	
250 mg/m <sup>3</sup>	J412	901	851	889	851
	J416	1202	1141	1190	1141
	J420	1502	1560	1487	1564
<b>GENERACIÓN (MW) MOTOR TIPO 6</b>					
500 mg/m <sup>3</sup>	J612	2007	1979	2000	1979
	J616	2676	2646	2677	2646
	J620	3360	3331	3360	3328
	J624	4507	4459		
250 mg/m <sup>3</sup>	J612	2007	1979	2004	1979
	J616	2676	2646	2677	2646
	J620	3360	3331	3360	3328
	J624	4507	4459		

Fuente: Autor, con datos de [32]

## Capítulo 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La caracterización de las biomásas permite aplicar métodos desarrollados que ayudan a tener una estimación aproximada del potencial que las granjas porcícolas pueden llegar a desarrollar dentro del sector energético.

Nuestro país tiene un inventario de biomasa (estiércol de cerdo + residuos de los cultivos de maíz) representativo para la implementación de plantas generadoras de biogás.

La selección de la biomasa compuesta por 20% residuos del maíz (Tallo y hojas) y 80% estiércol del cerdo dio como resultado un volumen anual considerable de biogás de acuerdo con el modelo aplicado, se puede estimar una generación de 135,4 MW h (Tabla 16), los cuales pueden ser reutilizados dentro de las granjas porcícolas o entregado a la red.

El proceso de co-digestión mejora la producción de biogás comparado con la digestión del estiércol del cerdo adicional a esto permite tratar los residuos de las granjas porcícolas disminuyendo los impactos ambientales que estos residuos ocasionan a las fuentes hídricas y al medio ambiente con gases de efecto invernadero.

La caracterización de la biomasa muestra que de los resultados entregados por el laboratorio ambiental de la Universidad de los Andes el poder calorífico de esta mezcla es de 6860 BTU / Lb (16 MJ/Kg), que es un valor comparable con los obtenidos, por ejemplo, con el bagazo de caña.

El aporte de 135,4 MW h (tabla 15) de energía logrado es una cifra interesante, esta puede impulsar el crecimiento de la agricultura con la siembra de cereales y la porcicultura con granjas tecnificadas, esto contribuye a una economía circular haciendo que las granjas porcícolas sean más competitivas garantizando el suministro de alimentos, bio abonos y electricidad a la red.

Con la introducción del biogás en la matriz energética del país se ayuda a contribuir con las metas de reducción de gases de efecto invernadero adquiridas el 29 de diciembre de 2020, ante la Convención Marco de las Naciones Unidas.

Teniendo en cuenta las suposiciones de los diferentes autores en el almacenamiento, temperatura, presión, agitación, tipos de biomasa, alimentación de los porcinos, ubicación de la granja, tipo de cereales, tiempo de retención hidráulico, PH, entre otros para obtener los resultados del inventario anual del volumen de biogás generado por las granjas porcícolas, se sugiere como futura investigación realizar la comprobación de este volumen generado con la biomasa caracterizada.


## REFERENCIAS

- [1 XM. [En línea]. Available: <https://www.xm.com.co/consumo/historicos-de-demanda>. [Último acceso: 26 10 2023].
- [2 Junta de Castilla y León, «Junta de Castilla y León,» [En línea]. Available: <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/aumento-consumo-energia-emisiones.html>. [Último acceso: 2023 10 2023].
- [3 XM, «Parametros Técnicos del SIN,» [En línea]. Available: <https://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>. [Último acceso: 23 10 2023].
- [4 Ministerio de Comercio Industria y Turismo, «Ministerio de Comercio Industria y Turismo,» 8 2 2022. [En línea]. Available: <https://www.mincit.gov.co/prensa/noticias/general/ruta-de-mincomercio-para-combatir-cambio-climatico#:~:text=Este%20compromiso%20se%20materializa%20en,efecto%20invernadero%20para%20el%202030..> [Último acceso: 23 10 2023].
- [5 Wikipedia. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Digesti%C3%B3n\\_anaer%C3%B3bica](https://es.wikipedia.org/wiki/Digesti%C3%B3n_anaer%C3%B3bica). [Último acceso: 26 10 2023].
- [6 Wikifarmer, «Wikifarmer,» [En línea]. Available: <https://wikifarmer.com/es/produccion-de-estiercol-de-cerdo-y-gestion-de-residuos/#:~:text=Se%20estima%20que%20un%20cerdo,de%20esti%C3%A9rcol%20en%20un%20a%C3%B1o..> [Último acceso: 4 7 2023].
- [7 G. Bionergy, «Genia,» [En línea]. Available: <https://geniabioenergy.com/codigestion-anarero-bia-para-la-gestion-de-residuos-organicos/>. [Último acceso: 24 10 2023].
- [8 M. J. Segura, «Porcicultura.com,» 17 2 2017. [En línea]. Available: <https://www.porcicultura.com/destacado/Impacto-ambiental-de-la-produccion-porcina-y-estrategias-para-su-mitigacion>. [Último acceso: 10 10 2022].
- [9 M. Jacho López, «BMeditores,» 19 08 2020. [En línea]. Available: <https://bmeditores.mx/porcicultura/recomendaciones-practicas-para-reducir-el-impacto-ambiental-en-granjas-porcinas-2/>. [Último acceso: 12 10 2022].
- [1 Z. Roa, J. C. Mendoza, S. Gonzalez, F. Kaiser y A. Gebauer, «Cartilla Biogas Pork Colombia,» 2020. [En línea]. Available: [https://porkcolombia.co/wp-content/uploads/2020/06/Guia-Biogas-sector-porcicultor\\_Porkcolombia.pdf](https://porkcolombia.co/wp-content/uploads/2020/06/Guia-Biogas-sector-porcicultor_Porkcolombia.pdf). [Último acceso: 12 7 2023].
- [1 G. d. Argentina, «Argentina.gob.ar,» [En línea]. Available: [https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/gas-licuado-de-petroleo#:~:text=El%20Gas%20Licuado%20de%20Petr%C3%B3leo%20\(GLP\)%20es%20la%20mezcla%20de,de%20separaci%C3%B3n%20del%20gas%20natural..](https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/gas-licuado-de-petroleo#:~:text=El%20Gas%20Licuado%20de%20Petr%C3%B3leo%20(GLP)%20es%20la%20mezcla%20de,de%20separaci%C3%B3n%20del%20gas%20natural..) [Último acceso: 5 9 2023].
- [1 UPME, «<https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/atlas-del-potencial-energetico-de-la-biomasa.aspx>,» 19 7 2023. [En línea].

- [1 Unidad de planeación Minero Energetica, «Unidad de planeación Minero Energetica,» 19 7  
3] 2023. [En línea]. Available: <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/atlas-del-potencial-energetico-de-la-biomasa.aspx>. [Último acceso: 19 7 2023].
- [1 M. T. Varnero Moreno, «Manual del biogas,» 2011. [En línea]. Available:  
4] <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. [Último acceso: 2023 7 5].
- [1 V. Valdés Lemos, Artist, *Estudio de la producción de biogás a escala de laboratorio a partir  
5] de estiércol de cerdo y residuos de cosecha de yuca*. [Art]. UAO, 2022.
- [1 G. J. Willem Euverink, «Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural  
6] waste,» *Resource-Efficient Technologies*, vol. 2 Issue 3, pp. 1-5, 2016.
- [1 Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Molar\\_mass](https://en.wikipedia.org/wiki/Molar_mass).  
7] [Último acceso: 20 10 2023].
- [1 D. S. Cortés Ramírez, Artist, *Diseño de Biodigestor de estiércol bovino*. [Art]. Universidad de  
8] los Andes, 2019.
- [1 G. Bioenergy, «Genia Bioenergy,» [En línea]. Available:  
9] <https://geniabioenergy.com/limpieza-del-biogas-siloxanos/>. [Último acceso: 16 9 2023].
- [2 G. G. Energy, «Genia Bioenergy,» [En línea]. Available: chrome-  
0] extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://geniabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/09/2021-folleto-upgrading\_genia-global-energy.pdf. [Último acceso: 4 7 2023].
- [2 Suez, «Suez,» 23 5 2023. [En línea]. Available: <https://www.suez.com/es/aire-espana/noticias/produccion-biogas-kg-materia-organica#:~:text=Adem%C3%A1s%2C%20se%20requiere%20aproximadamente%201,kWh%20de%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica%20renovable..> [Último acceso: 8 10 2023].
- [2 S. Fonseca, H. Rodriguez y C. Gabriel, «CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS DE MAÍZ  
2] DEL MUNICIPIO DE VENTAQUEMADA COLOMBIA,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323652282004>. [Último acceso: 7 9 2023].
- [2 F. Colombia, «Fenalce,» [En línea]. Available: <https://fenalce.co/estadisticas/>. [Último acceso:  
3] 3 7 2023].
- [2 «Pasturas de América,» 30 6 2023. [En línea]. Available:  
4] <http://pasturasdeamerica.com/utilizacion-forrajes/residuos-agricolas/maiz/>.
- [2 I. C. Agropecuario, «Instituto Colombiano Agropecuario,» [En línea]. Available:  
5] <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>. [Último acceso: 4 7 2023].
- [2 Google, «Google Maps,» [En línea]. Available:  
6] <https://www.google.com/maps/place/3%C2%B02'12.1%22N+76%C2%B023'20.0%22W/@3.0375788,-76.3949394,768m/data=!3m1!1e3!4m4!3m3!8m2!3d3.036689!4d-76.388877?entry=ttu>. [Último acceso: 9 9 2023].
- [2 L. A. U. d. l. Andes, *Cotización*, Bogota: U de Andes, 2023.  
7]
- [2 L. A. U. d. l. Andes, *Caracterización de Biomasa*, Bogota: Universidad de los Andes, 2023.  
8]

- [2 «scielo,» [En línea]. Available:  
9] [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-49932011000100007#:~:text=Un%20importante%20subproducto%20es%20la,base%20seca%20%5B6%5D..](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932011000100007#:~:text=Un%20importante%20subproducto%20es%20la,base%20seca%20%5B6%5D..) [Último acceso: 1 11 2023].
- [3 Z. Roa, J. C. Mendoza, S. Gonzalez, F. Kaiser y A. Gebauer, «Guía de biogás para el sector  
0] porcícola en Colombia,» [En línea]. Available: <https://porkcolombia.co/guia-de-biogas-para-el-sector-porcicola-colombiano/>. [Último acceso: 2023 10 23].
- [3 «Innio Proyectos,» [En línea]. Available: <https://www.innio.com/es/proyectos>. [Último  
1] acceso: 1 11 2023].
- [3 Innio, «Innio,» [En línea]. Available: <https://www.innio.com/es/productos/jenbacher>. [Último  
2] acceso: 2023 11 1].
- [3 «Innio Soluciones,» [En línea]. Available: [https://www.innio.com/es/soluciones/generacion-  
3\] de-energia/biogas](https://www.innio.com/es/soluciones/generacion-de-energia/biogas). [Último acceso: 1 11 2023].
- [3 J. A. Arboleda G., Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o  
4] actividades., Medellín, Colombia, 2008.
- [3 B. Bharathiraja, T. Sudharsanaa y A. Bharghavi, «Biohydrogen and Biogas–An overview on  
5] feedstocks and enhancement process,» 1 12 2016. [En línea]. Available:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236116307682>. [Último acceso:  
].
- [3 Z. Csereklyei, Q. Songze y T. Ancev, «The effect of wind and solar power generation on  
6] wholesale electricity prices in Australia,» *Energy Policy*, vol. 131, pp. 358-369, 2019.
- [3 X. Cervantes Molina, Artist, *Biomasa residual del cultivo de maíz duro y su potencial  
7] energético en el cantón mocache. Año 2014. Plan de disminución de quema de residuos  
agrícolas*. [Art]. Universidad Tecnica Estatal de Quevedo, 2015.
- [3 Miembros de la mesa de Biogas, «Ministerio del Medio Ambiente y medio rural y marino,»  
8] 16 09 2010. [En línea]. Available: [chrome-  
extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/  
requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-  
2010\\_tcm30-110139.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm30-110139.pdf). [Último acceso: 23 10 2023].
- [3 C. J. Rodriguez Martínez, Artist, *Evaluación de Prefactibilidad para la gasificación de  
9] residuos vegetales producidos en una finca de florez en el Municipio de Madrid,  
Cundinamarca*. [Art]. Universidad del Rosario, 2023.

## APÉNDICE 1

	UNIVERSIDAD DE LOS ANDES DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL LABORATORIO AMBIENTAL	CODIGO: MT-INF-027 FECHA: 2014-07-22 VERSION: 3
	INFORME DE RESULTADOS	

INFORME DE RESULTADOS MUESTRA 395-23

FECHA: 2023-10-17

CLIENTE: Maria Fernanda Gomez  
DIRECCION: CI 12C #N° 6-25,

MUESTRA No	395-23				
MATRIZ:	MATERIAL VEGETAL				
CLASE DE MUESTRA:	PUNTUAL				
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA:	Biomasa - Hojas de maiz				
SITIO DE TOMA:	No Disponible				
TOMADO POR:	Jerson				
FECHA DE TOMA	2023-08-30				
HORA DE TOMA	15:00				
FECHA DE RECEPCION	2023-09-27				
PARAMETRO	RESULTADO	UNIDADES	FECHA EJECUCION ANALISIS		METODO
			Inicio	Final	
Humedad	2,5	% BH	2023-09-27	2023-09-28	MT-PRE-073
Solidos Totales	97,5	% BH	2023-09-27	2023-09-28	MT-PRE-073
Canizas	27,2	% BS	2023-09-27	2023-09-28	SM 2540 G modificado
Materia volátil	58,1	% BS	2023-10-11	2023-10-12	ASTM D3175
Poder Calorífico	6860	BTU/lb	2023-10-09	2023-10-09	ASTM E711-06 Reaprobado (2004)
Analisis Elemental					ASTM D5373-16
Nitrogeno	1,87	% BS	2023-08-30	2023-10-10	ASTM D5373-16
Carbono	36,2	% BS	2023-08-30	2023-10-10	ASTM D5373-16
Azufre	0,361	% BS	2023-08-30	2023-10-10	ASTM D5373-16
Hidrogeno	2,70	% BS	2023-08-30	2023-10-10	ASTM D5373-16

OBSERVACIONES: Muestra puesta en el laboratorio, los resultados aplican a la muestra como se recibió.

El laboratorio no es responsable por la información suministrada por el cliente, esta información corresponde a la reportada en letra cursiva.

<XXX: Valor por debajo del límite de detección del método.

\*XXX: Valor entre el límite de detección y el límite de cuantificación.

BS: Base Seca BH: Base húmeda

Los resultados son válidos única y exclusivamente para las muestras analizadas.

Este reporte no se debe reproducir parcialmente sin excepción, sin aprobación por escrito del Laboratorio

## APÉNDICE 2

**JENBACHER**

# JENBACHER TIPO 2

## Más de 40 años de desarrollo continuo

El motor Jenbacher de tipo 2, que ofrece un rendimiento extremadamente eficiente en el rango de potencia de 250 a 350 kW, se presentó en 1978 y ha recibido mejoras continuas desde entonces. Su diseño resistente y su concepto de motor de funcionamiento estacionario se traducen en una excelente durabilidad de sus componentes y en una vida útil de 80 000 horas de operación, antes de la primera reconstrucción mayor. Sus componentes optimizados y su eficaz concepto de control y monitoreo confieren a este motor una confiabilidad excepcional.



### Instalaciones de referencia

#### J208 Abwasserverband Obere Iller (Alemania)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Gas de aguas residuales	1 x J208	290 kW	371 kW	2018

Cada año, la planta de tratamiento de aguas residuales Abwasserverband Obere Iller limpia 13,7 millones de metros cúbicos de agua residual procedente de 11 municipios del distrito de Oberallgäu. Desde 2018, la planta ha podido cubrir el 95% de su demanda energética y el 95% de su demanda de calor gracias al uso de un motor Jenbacher J208, altamente eficiente.



#### J208 Planta de biogás en Schilters (Austria)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Biogás	1 x J208	350 kW	370 kW	2015

Un solo motor Tipo 2 Modelo J208 instalado en la planta de cogeneración (CHP) de Schilters cada año transforma alrededor de 12.000 toneladas de restos de comida y residuos biológicos en electricidad y calor. Los restos de los residuos biológicos consumidos se comprimen para generar compost o se transforman en abono líquido para fertilizar los campos agrícolas de la región.



#### J208 ARA Pustertal (Italia)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Gas de aguas residuales	3 x J208	991 kW	869 kW	2016, 2018, 2019

La planta ARA Pustertal, en Tobl, trata las aguas residuales de aproximadamente 188.000 personas de la zona de Roranz/Tobl, en San Lorenzo. En el año 2020, se produjeron más de 2,35 millones de metros cúbicos de gas de las aguas residuales, que se utilizaron para suministrar energía a tres módulos de cogeneración (CHP) de electricidad y calor Jenbacher J208, cubriendo así el 83% de la demanda de electricidad anual de la planta. Además, el calor del gas de escape también se utiliza para secar las fangas de depuración de la planta.



#### J208 Endress+Hauser Maulburg II (Alemania)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Gas de gasoducto	1 x J208	1145 kW	1261 kW	2014
(Gas Natural)	1 x J412			2020

En Maulburg, dos grupos electrógenos de Jenbacher con un total de 1145 kWel, abastece a la planta de Endress+Hauser SE+Co. El Gaspués de que el primer grupo electrógeno de Jenbacher, de 1145 kWel, se pusiera en funcionamiento en 2014, en 2020, se instaló el grupo electrógeno Jenbacher J208. La solución de cogeneración (CHP) de Jenbacher suministra electricidad y calor a las instalaciones de la empresa de forma fiable.



## Detalles técnicos

Configuración	En línea	<b>Dimensiones L x An x Al (mm)</b>	
Diámetro interior (mm)	135	Grupo electrógeno	4900 x 1700 x 2000
Carrera (mm)	145	Sistema de cogeneración	4900 x 1700 x 2000
Desplazamiento/cilindro (l)	2,03	Contenedor de 40 pías	12 200 x 2500 x 2500
Velocidad (rpm)	1500 (50 Hz) 1800 (60 Hz)	<b>Peso vacío (kg)</b>	
Velocidad media del pistón (m/s)	7,3 (1500 l/min) 8,7 (1800 l/min)	Grupo electrógeno	6000
Alcance de suministro	Grupo electrógeno, sistema de cogeneración, grupo electrógeno/cogeneración en contenedor	Sistema de cogeneración	6700
Tipos de gas aplicables	Gas natural, gas de ventosa, propano, biogás, gas de vertedero, gas de aguas residuales		
Tipo de motor	J20B		
Núm. de cilindros	6		
Desplazamiento total (l)	12,18		

## Capacidades y eficiencias

Gas natural		1500 l/min   50 Hz					1800 l/min   60 Hz				
NO <sub>x</sub> <	Tipo	PeI (kW) <sup>1</sup>	Pth (kW) <sup>1</sup>	ηel (%) <sup>1</sup>	ηth (%) <sup>1</sup>	ηtot (%) <sup>1</sup>	PeI (kW) <sup>1</sup>	Pth (kW) <sup>1</sup>	ηel (%) <sup>1</sup>	ηth (%) <sup>1</sup>	ηtot (%) <sup>1</sup>
500 mg/m <sup>3</sup> <sub>a</sub>	J20B	300	398	39,1	50,9	90,0	335	393	37,4	43,9	81,3
	J20B	330	362	39,4	42,1	81,5					
250 mg/m <sup>3</sup> <sub>a</sub>	J20B	294	363	37,6	46,4	84,1	335	400	36,5	44,6	81,1

Biogás		1500 l/min   50 Hz					1800 l/min   60 Hz				
NO <sub>x</sub> <	Tipo	PeI (kW) <sup>1</sup>	Pth (kW) <sup>1</sup>	ηel (%) <sup>1</sup>	ηth (%) <sup>1</sup>	ηtot (%) <sup>1</sup>	PeI (kW) <sup>1</sup>	Pth (kW) <sup>1</sup>	ηel (%) <sup>1</sup>	ηth (%) <sup>1</sup>	ηtot (%) <sup>1</sup>
500 mg/m <sup>3</sup> <sub>a</sub>	J20B	330	394	39,2	46,8	86,1	305	388	36,6	42,2	78,7
	J20B	249	289	39,7	46,1	85,8					
250 mg/m <sup>3</sup> <sub>a</sub>	J20B	330	404	38,2	47,9	86,0					

<sup>1</sup> Detalles técnicos de acuerdo a la norma ISO 3046

<sup>2</sup> Generación térmica total con una tolerancia de +/- 0%, temperatura de salida del gas de escape 100 °C, para una temperatura de salida del biogás de 80 °C

Todos los datos hacen referencia a los motores funcionando con carga máxima y se encuentran sujetos a modificaciones y mejoras técnicas. Puede obtener otras versiones de motores, previa solicitud.

## APÉNDICE 3

# JENBACHER TIPO 3

## Eficiente, duradero y fiable

Sus largos intervalos de servicio, un diseño del motor de fácil mantenimiento y el bajo consumo de combustible garantizan la máxima eficiencia de nuestros motores Jenbacher de tipo 3. El uso de componentes mejorados se traduce en una vida útil más larga, incluso cuando se usan combustibles no convencionales, como el gas de vertedero. Nuestros motores de tipo 3 ofrecen un intervalo de servicio excepcional, con unos 80 000 horas de funcionamiento hasta la reconstrucción mayor. Este tipo de motor destaca en su rango de potencia de 400 a 1100 kW debido a su madurez técnica y su alto grado de confiabilidad.



### Instalaciones de referencia

#### J312 Abwasserverband AIZ (Austria)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Gas de aguas residuales	2 x J312	1,27 MW	1,4 MW	2018, 2020

La Asociación de aguas residuales de Achental-Inntal-Zillertal (AIZ), con sede en Strass im Zillertal, utiliza dos motores Jenbacher J312 accionados por gas de aguas residuales para hacer funcionar el sistema de cogeneración (CHP) de electricidad y calor en su planta de tratamiento de aguas residuales. El sistema ha mejorado la huella de carbono de la planta, contribuyendo así a llevar a cabo su transición energética. La planta de tratamiento limpia 28 270 metros cúbicos de aguas residuales al día.



#### J312 Abwasserverband Hall in Tirol – Fritzens (Austria)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Gas de aguas residuales	2 x J312	1,27 MW	1,4 MW	2018, 2023

En la planta de tratamiento de aguas residuales de Fritzens, dos motores Jenbacher J312, accionados con gas de aguas residuales y con una capacidad total de más de 1,27 MW de electricidad, cubren la demanda energética de la planta durante todo el año. El calor generado por los motores se utiliza para procesar residuos de alimentos, generando así energía adicional destinada al tratamiento de residuos.



#### J320 Central eléctrica de biogás de Wangdee (Tailandia)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Puesta en marcha
Biogás	4 x J320	4,27 MW	2015, 2021, 2023

Gracias a cuatro motores Jenbacher J320 que funcionan con biogás, la planta genera electricidad utilizando agua residual y residuos sólidos procedentes del procesamiento de rabes de yuca. La central eléctrica de biogás tiene una producción de 4,27 MW, lo que es más que suficiente para cubrir todas las necesidades de electricidad de la propia planta de procesamiento. Además, a través de la venta de la energía excedente a la red local, la central obtiene mayores beneficios económicos.



#### J320 Shandong Minhe Biological Technology Co., LTD (China)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Biogás	3 x J320 1 x J620	6,2 MW	6,4 MW	2009, 2018

En este proyecto de generación de electricidad a partir de biogás, se utiliza la gallinaza de pollos y la fermentación de los agua residuales de una granja para producir dicho biogás. La central, que se puso en marcha en el año 2009, funciona con tres motores de biogás Jenbacher J320 a los que, posteriormente, en el año 2018, se añadió un motor de biogás J620.



## Detalles técnicos

Configuración	V 70*		
Diámetro interno (mm)	135		
Carrera (mm)	170		
Desplazamiento/cilindro (l)	2,43		
Velocidad (rpm)	1500 (50 Hz) 1200 / 1800 (60 Hz)		
Velocidad media del pistón (m/s)	8,5 (1500 1/min) 6,8 (1200 1/min) 10,2 (1800 1/min)		
Alcance de suministro	Grupo electrógeno, sistema de cogeneración, grupo electrógeno/ cogeneración en contenedor		
Tipos de gas aplicables	Gas natural, gas de ventosa, propano, biogás, gas de vertedero, gas de aguas residuales, gases especiales (p. ej., gas de minas de carbón, gas de coque, gas de madera, gas de pirólisis)		
Tipo de motor	J312	J315	J320
Núm. de cilindros	12	15	20
Desplazamiento total (l)	29,2	38,9	48,7

	Dimensiones L x An x Al (mm)	
Grupo electrógeno	J312	4700 x 1800 x 2300
	J315	5200 x 1800 x 2300
	J320	5700 x 1700 x 2300
Sistema de cogeneración	J312	4700 x 2300 x 2300
	J315	5300 x 2300 x 2300
	J320	5700 x 1900 x 2300
Contenedor de 40 pies	J312	12 200 x 2500 x 2500
	J315	12 200 x 2500 x 2500
	J320	12 200 x 2500 x 2500
	Peso vacío (kg)	
Grupo electrógeno	J312	8800
	J315	10 100
	J320	13 900
Sistema de cogeneración	J312	9500
	J315	11 200
	J320	14 400

## Capacidades y eficiencias

Gas natural		1500 l/min   50 Hz					1800 l/min   60 Hz					
NO <sub>x</sub> <sup>c</sup>	Tipo	PeI (kW) <sup>a</sup>	Pth (kW) <sup>a</sup>	ηel (%) <sup>a</sup>	ηth (%) <sup>a</sup>	ηtot (%) <sup>a</sup>	PeI (kW) <sup>a</sup>	Pth (kW) <sup>a</sup>	ηel (%) <sup>a</sup>	ηth (%) <sup>a</sup>	ηtot (%) <sup>a</sup>	
500 mg/m <sub>3</sub>	J312	635	662	42,8	45,7	85,3						
	J312	635	664	43,1	45,0	88,1						
	J315	851	905	42,8	45,3	85,9						
	J315	851	901	43,1	45,6	88,7						
	J320	1067	1157	42,7	45,3	89,0						
250 mg/m <sub>3</sub>	J312	635	664	41,6	45,4	87,0	635	769	39,1	48,7	87,8	
	J312	635	664	42,2	45,4	87,8						
	J315	851	943	41,6	46,1	87,6	847	1052	39,2	48,7	87,8	
	J315	851	929	42,3	46,0	88,3						
	J320	1067	1178	41,7	46,0	87,7	1062	1310	39,3	48,6	87,9	
Biogás			1500 l/min   50 Hz			1800 l/min   60 Hz						
	NO <sub>x</sub> <sup>c</sup>	Tipo	PeI (kW) <sup>a</sup>	Pth (kW) <sup>a</sup>	ηel (%) <sup>a</sup>	ηth (%) <sup>a</sup>	ηtot (%) <sup>a</sup>	PeI (kW) <sup>a</sup>	Pth (kW) <sup>a</sup>	ηel (%) <sup>a</sup>	ηth (%) <sup>a</sup>	ηtot (%) <sup>a</sup>
	500 mg/m <sub>3</sub>	J312	548	531	42,7	45,4	84,0					
		J312	635	649	41,9	42,8	84,7	635	752	39,7	47,1	85,8
		J315	851	883	41,9	43,5	85,4	847	1003	39,8	47,1	85,9
250 mg/m <sub>3</sub>	J312	548	531	42,0	43,4	85,4	1062	1262	39,9	47,0	85,9	
	J312	635	661	42,9	42,5	83,4	635	766	39,1	47,3	85,3	
	J315	851	901	42,9	43,3	84,1	847	1000	39,2	47,2	85,3	
J320	1067	1125	41,0	43,3	84,3	1062	1275	39,3	47,2	85,4		

<sup>c</sup> Detalles técnicos de acuerdo a la norma ISO 3046

## APÉNDICE 4

# JENBACHER TIPO 4

## Un hito en lo que respecta a la eficiencia

Basado en los conceptos de diseño probados de los tipos 3 y 6, los modernos motores Jenbacher de tipo 4, en el rango de potencia de 800 a 1560 kW, se caracterizan por una densidad energética elevada y una eficiencia sobresaliente. El sistema de control y supervisión mejorado ofrece un mantenimiento preventivo sumamente sencillo, así como una gran confiabilidad y disponibilidad.



### Instalaciones de referencia

#### J416 AGR Fenland Glasshouse (Reino Unido)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Gas de gasoducto	1 x J416 1 x J820 1 x J824	9 MW	112 MW	2022



El centro de energía y proyecto Fenland Glasshouse de AGR incluyen una central de cogeneración (CHP) de electricidad y calor con tres motores Jenbacher altamente eficientes que suministran electricidad, mientras que un sistema de enfriamiento de los gases de escape emite CO<sub>2</sub> recuperado, para favorecer el crecimiento de las plantas. Por su parte, un innovador sistema de bomba de calor de 32 MW proporciona agua caliente renovable a las instalaciones.

#### J420 Heslerhof (Alemania)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Biogás	1 x J420	158 MW	1,8 MW	2021



Gracias a la instalación de un motor Jenbacher J420 y las inversiones realizadas en un tanque de almacenamiento en bóveda de gran tamaño y en un tanque de almacenamiento de gas, la planta de biogás de esta granja de Heslerhof (Alemania) se convirtió en una central eléctrica de almacenamiento renovable con un funcionamiento flexible y adaptada a los requisitos del mercado eléctrico. La granja genera su propia energía, que utiliza para cubrir todas sus necesidades eléctricas, y el excedente de electricidad se vende a la red con atractivas tarifas reguladas a precios de mercado.

#### J420 Chok Yuen Yong Industry Co., LTD (Tailandia)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Biogás	5 x J420	71 MW	5,2 MW	2012, 2017



Cinco motores a biogás Jenbacher J420 producen energía eléctrica más que suficiente para cubrir las necesidades de la fábrica de almíston de tapioca de Chok Yuen Yong Industry Co., LTD. El excedente de electricidad producida por los motores (aproximadamente, 1000 kW) se suministra a la red pública, con el fin de reducir aún más los costos de energía de la central.

#### J420 Proyecto del centro de tratamiento de residuos orgánicos de Hefei Xiaomiao (China)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Biogás	2 x J420	3 MW	1,2 MW	2021



En el Proyecto del centro de tratamiento de residuos orgánicos de Hefei Xiaomiao, los residuos orgánicos se pretoran y se convierten en biogás mediante un sistema de digestión anaeróbica en una central de, aproximadamente, 67 000 metros cuadrados. Por su parte, dos grupos electrógenos de biogás Jenbacher J420 suministran electricidad tanto a la central como a la red local.

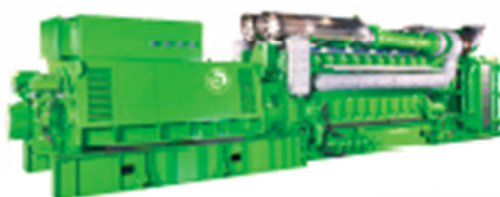


## APÉNDICE 5

# JENBACHER TIPO 6

## Tecnología de vanguardia

Como resultado de las mejoras continuas y amplia experiencia, los motores Jenbacher tipo 6 son productos sumamente fiables y avanzados que cubren el rango de potencia de 2 a 4,5 MW. La velocidad del motor de 1500 rpm proporciona una densidad de alta potencia y unos costos de instalación bajos. La cámara de precombustión tipo 6 ofrece una gran eficiencia y una reducción de las emisiones. Su diseño probado y sus componentes optimizados dan soporte a una vida útil de 60 000 horas de funcionamiento antes de la primera reconstrucción mayor. El modelo J624 cuenta con la avanzada tecnología de turbocompresión en dos etapas, que ofrece una óptima eficiencia eléctrica combinada con una mayor flexibilidad, en una gran variedad de condiciones ambientales.



### Instalaciones de referencia

#### J616 y J620 Grupo BMW (Alemania)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Gas de gasoducto	5 x J616 2 x J620	20,1 MW	18,23 MW	2009, 2011, 2012, 2018

Las centrales de cogeneración instaladas en las fábricas del grupo BMW\* en Regensburg y Leipzig pueden generar energía in situ y capturar el calor residual del motor para su uso en los procesos de producción de la fábrica. La calefacción en invierno se obtiene a través de una combinación del calor residual de los motores y el calor de las calderas existentes.

\* © Derechos de autor BMW AG



#### J620 Shandong Minhe Biological Technology Co., LTD (China)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Biogás	3 x J620 1 x J620	6,2 MW	6,4 MW	2009, 2018

El sistema de generación de electricidad a partir de biogás de Shandong Minhe, en la ciudad de Fengji, funciona gracias a tres motores J620, instalados en 2009, y un motor J620 adicional, que se instaló en el año 2018. La planta puede llegar a alcanzar una generación eléctrica de 6,2 MW utilizando biogás, que se produce a partir de gallinas de paja y de la fermentación de aguas residuales.



#### J624 Hakha CES (Corea del Sur)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Gas de gasoducto	6 x J624	25,18 MW	25,95 MW	2014

Con un total de seis motores Jenbacher J624 que funcionan con Gas Natural, la planta de Hakha, en Daejeon, alcanza 25 182 kW de potencia eléctrica, así como una eficiencia total del 87%. La instalación de estos motores Jenbacher ha hecho de la planta, una de las plantas de motores a gas más grandes de Corea del Sur.



#### J612 y J624 Den Berk Délice (Bélgica)

Fuente de energía	Tipo de motor	Generación eléctrica	Generación térmica	Puesta en marcha
Gas de gasoducto (Gas Natural)	1 x J612 2 x J624	11 MW	12,8 MW	2013, 2018, 2022

En este invernadero de Bélgica (Bélgica), los motores Jenbacher altamente eficientes, que funcionan con Gas Natural, proporcionan calor y energía al complejo de invernaderos, mientras que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) generado fertiliza los tomates que crecen en su interior. La tecnología del motor Jenbacher de tipo 6 de 1500 rpm ofrece una alta densidad energética con costes de instalación reducidos, y su cámara de precombustión alcanza una elevada eficiencia, con un bajo nivel de emisiones. El invernadero de Bélgica forma parte de los invernaderos de Den Berk Délice, donde se cultivan 82 hectáreas de tomates.



## Características técnicas

Característica	Descripción	Ventajas
Cabeza del cilindro de cuatro válvulas	Cámara de precombustión purgada ubicada en el centro, desarrollada utilizando métodos avanzados de cálculo y simulación (CFD)	Reducción de las pérdidas por cambio de carga, combustión altamente eficiente y estable, condiciones de ignición óptimas
Recuperación de calor	Disposición flexible del intercambiador térmico, intercambiador térmico de placas de aceite de dos etapas bajo presión	Alta eficiencia térmica, incluso a temperaturas de retorno elevadas y fluctuantes
Carga de mezcla de aire/combustible	El gas combustible y el aire de combustión se mezclan a baja presión antes de entrar en el turbocompresor	Suministro principal de gas con baja presión de gas, mezcla homogeneizada en el turbocompresor
Cámara de precombustión	La energía de ignición de la buja se amplifica en la cámara de precombustión	Alta eficiencia, bajos niveles de emisiones de NO <sub>x</sub> , combustión estable y fiable
Válvula de dosificación de gas	Válvula de dosificación de gas controlada electrónicamente con un gran nivel de precisión de control (para gas natural)	Tiempo de respuesta muy rápido, ajuste rápido de la relación aire/gas, amplio rango de valor calorífico ajustable
Turbocompresión de dos etapas	Concepto de tecnología de turbocompresión de última generación (solo para J624)	Rendimiento mejorado en términos de generación y eficiencia, mayor flexibilidad con respecto a las condiciones ambientales

## Detalles técnicos

Configuración		Dimensiones L x An x Al (mm)			
Configuración	V 60°				
Diámetro interno (mm)	190				
Carrera (mm)	220				
Desplazamiento/cilindro (l)	6,24				
Velocidad (rpm)	1500 (50 Hz) 1500 con engranaje (60 Hz)				
Velocidad media del pistón (m/s)	3 (1500 1/min)				
Alcance de suministro	Grupo electrógeno, sistema de cogeneración, paquete en contenedor				
Tipos de gas aplicables	Gas natural, gas de vertebro, biogás, gas de vertebro, gas de aguas residuales, gases especiales (p. ej., gas de minas de carbón, gas de coque, gas de madera, gas de pirólisis)				
Tipo de motor	J612 J616 J620 J624				
Núm. de cilindros	12 16 20 24				
Desplazamiento total (l)	74,9 99,8 124,8 149,7				
		<b>Paquete en contenedor</b>			
		J612-J624	12 000 x 20 500 x 3000 x 6000 x 7500		
		J612	7800 x 2200 x 2800		
		J616	8300 x 2200 x 2800		
		J620	8900 x 2200 x 2800		
		J624	12 800 x 2500 x 2900		
		J612	7800 x 2200 x 2800		
		J616	8300 x 2200 x 2800		
		J620	8900 x 2200 x 2800		
		J624	12 800 x 2500 x 2900		
		<b>Sistema de cogeneración</b>			
		J612	7800 x 2200 x 2800		
		J616	8300 x 2200 x 2800		
		J620	8900 x 2200 x 2800		
		J624	12 800 x 2500 x 2900		
		<b>Peso vacío (kg)</b>			
		J612	J616	J620	J624
		<b>Grupo electrógeno</b>			
		24 000	29 200	36 900	52 100
		<b>Sistema de cogeneración</b>			
		24 500	29 700	37 500	52 100

Las dimensiones y los pesos son válidos para aplicaciones de 50 Hz

## Generación y eficiencia

Gas natural		1500 1/min   50 Hz					1500 1/min   60 Hz				
NO <sub>x</sub> <sup>1</sup>	Tipo	P <sub>el</sub> (kW) <sup>1</sup>	P <sub>th</sub> (kW) <sup>1</sup>	η <sub>el</sub> (%) <sup>1</sup>	η <sub>th</sub> (%) <sup>1</sup>	η <sub>tot</sub> (%)	P <sub>el</sub> (kW) <sup>1</sup>	P <sub>th</sub> (kW) <sup>1</sup>	η <sub>el</sub> (%) <sup>1</sup>	η <sub>th</sub> (%) <sup>1</sup>	η <sub>tot</sub> (%)
500 mg/m <sup>3</sup>	J612	2007	1904	45,4	43,0	63,4	3279	1904	44,7	43,0	67,8
	J616	2678	2503	45,7	42,7	63,4	2646	2503	45,2	42,7	67,9
	J620	3360	322	45,6	43,0	63,6	3331	322	45,2	43,0	68,2
	J624	4507	3957	46,9	46,1	63,0	4459	3957	46,4	46,1	67,5
250 mg/m <sup>3</sup>	J612	2007	190	44,6	42,5	67,2	3279	190	44,0	42,5	66,5
	J616	2678	2530	44,9	42,4	67,3	2646	2530	44,4	42,4	66,8
	J620	3360	3291	44,8	42,5	67,3	3331	3291	44,4	42,5	66,9
	J624	4507	4023	45,9	46,0	67,0	4459	4023	45,5	46,0	66,5
<b>Biogás</b>		1500 1/min   50 Hz					1500 1/min   60 Hz				
NO <sub>x</sub> <sup>1</sup>	Tipo	P <sub>el</sub> (kW) <sup>1</sup>	P <sub>th</sub> (kW) <sup>1</sup>	η <sub>el</sub> (%) <sup>1</sup>	η <sub>th</sub> (%) <sup>1</sup>	η <sub>tot</sub> (%)	P <sub>el</sub> (kW) <sup>1</sup>	P <sub>th</sub> (kW) <sup>1</sup>	η <sub>el</sub> (%) <sup>1</sup>	η <sub>th</sub> (%) <sup>1</sup>	η <sub>tot</sub> (%)
500 mg/m <sup>3</sup>	J612	2000	1770	44,6	39,5	64,1	3279	1770	44,1	39,5	63,6
	J616	2677	2390	44,8	39,5	64,2	2646	2390	44,3	39,5	63,7
	J620	3360	2950	45,0	39,5	64,4	3328	2950	44,5	39,5	64,0
250 mg/m <sup>3</sup>	J612	2004	1925	43,7	39,8	63,5	3279	1925	43,2	39,8	63,0
	J616	2677	2432	43,8	39,8	63,6	2646	2432	43,3	39,8	63,1
	J620	3360	3042	44,0	39,8	63,8	3328	3042	43,6	39,8	63,4

<sup>1</sup> Valores típicos de generación en un motor ISO 9048

