

**APROVECHAMIENTO DE UN SISTEMA HÍBRIDO BIOGÁS – SOLAR EN LA
ZONA DEL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO” PARA LA GENERACIÓN
DE ENERGIA ELÉCTRICA**

**DEISSY JOHANNA PEREZ ACEROS
PAOLA JULIANA RODRIGUEZ PARADA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA EN ENERGÍA
BUCARAMANGA
2021**

**APROVECHAMIENTO DE UN SISTEMA HÍBRIDO BIOGÁS – SOLAR EN LA
ZONA DEL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO” PARA LA GENERACIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**DEISSY JOHANNA PEREZ ACEROS
PAOLA JULIANA RODRIGUEZ PARADA**

Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO EN ENERGÍA

Director del proyecto
Prof. Álvaro Alyamani Triana Ramírez, MSc.
Codirector del proyecto
Prof. Yecid Alfonso Muñoz Maldonado, PhD.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA EN ENERGÍA
BUCARAMANGA
2021**

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité Curricular
en cumplimiento de los requisitos
exigidos por la Universidad
Autónoma de Bucaramanga para
optar el título de Ingeniero en
Energía

Firma del director

Firma del codirector

Firma del evaluador

Firma del evaluador

Bucaramanga, Santander, 16 de Julio de 2021

DEDICATORIA

A Dios, quien me ha dado la fortaleza para continuar en cada etapa de mi carrera; por ello, con toda la humildad que de mi corazón puede emanar, dedico primeramente mi trabajo a él.

A mi madre Omaira Aceros Baez, por ser el pilar más importante en mi vida y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones, tus esfuerzos son impresionantes y tu amor es para mí invaluable, me has proporcionado todo lo que he necesitado. Tus enseñanzas las aplico cada día, me haces llenar de orgullo y no habrá manera de devolverte tanto amor que me has ofrecido; de verdad que tengo mucho por reconocerte de mí éxito.

A mi padre Rafael Perez Gallo, por haberme forjado con el carácter de la persona que soy hoy en día para salir adelante, muchos de mis logros en mi vida son debido a sus enseñanzas y la forma de enfrentarme a cada una de ellas. Me formó con reglas que, a la final de cuenta, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

A mi hermano Jorman Perez Aceros, quien desde sus conocimientos y su cariño aportó su grano de arena en los momentos que lo necesité. Gracias por no solo ayudarme en gran manera a concluir el desarrollo de esta tesis, sino por todos los bonitos momentos que pasamos en el proceso.

A Brayan Edixon Pabon Duran quien me brindó su ayuda durante todo el transcurso de mi carrera, con su conocimiento y paciencia aportó en gran parte al desarrollo de esta tesis, puesto que, sin su acompañamiento, colaboración y entendimiento el proceso hubiera sido más complejo de sobrellevar. Es una gran persona, amigo y confidente con quien espero seguir creciendo tanto personal como profesionalmente.

Para finalizar, dedico esta tesis a todas las personas que me ayudaron de forma directa o indirectamente en la realización de este proyecto, el cual es el reflejo de lo aprendido y aportado por mis docentes durante mis años de estudio.

Deissy Johanna Perez Aceros.

En primera instancia, quiero agradecer a mi madre, que siempre ha estado en los momentos difíciles y me ha dado las fuerzas necesarias para continuar ante las adversidades. A mi abuela, que sin ella no hubiera podido llegar hasta aquí y con su carácter me ha enseñado que lo más importante de todo es la perseverancia.

A mi hermano y mi novio, que me han impulsado y llenado de motivación, se esforzaron por nunca dejarme sentir sola, y ayudarme a resolver mis dudas cuando más lo necesité. A mis amigos de infancia, los cuales han crecido, me han acompañado y han compartido conmigo momentos inolvidables en los que han sacado lo mejor de mí.

A todos mis profesores, los cuales han dejado una huella en mi con sus enseñanzas y me han ayudado a crecer personal y profesionalmente. A María Eugenia Castillo Diaz, la cual desde mi llegada a la universidad ha sido uno de mis apoyos más grandes dentro de la institución. El doctor German Oliveros Villamizar, que fue pieza fundamental en mi etapa universitaria y aunque ya no se encuentre entre nosotros, siempre recordaré sus palabras. A mi director de programa, Cesar Acevedo Arenas, el cual ha sido un guía fundamental y con su orientación hizo este camino mucho más ameno.

Paola Juliana Rodríguez Parada.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a los profesores Carlos Alirio Diaz Gonzalez, Álvaro Alyamani Triana Ramírez, Yecid Alfonso Muñoz Maldonado, Cesar Yobany Acevedo Arenas, sin ustedes y sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiésemos logrado tan fácil. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de nuestros pensamientos las ideas para escribir lo que hoy hemos logrado. Ustedes formaron parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que los caracterizan. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento. Gracias por sus orientaciones

A nuestros docentes durante el desarrollo de la carrera, sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a ustedes les debemos nuestros conocimientos. Donde quiera que vayamos, los llevaremos con nosotras en el transitar profesional. Su semilla de conocimientos, germinó en el alma y el espíritu. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia.

A nuestros padres que han sido siempre el motor que impulsa nuestros sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a nuestro lado en los días y noches más difíciles durante nuestras horas de estudio. Siempre han sido los mejores guías de vida. Hoy cuando concluimos nuestros estudios, les dedicamos a ustedes este logro, como una meta más conquistada. Gracias por ser quienes son y por creer en nosotras.

A William Alberto Botero Mantilla quien, desde su conocimiento y manejo en distintos ámbitos, nos apoyó en el desarrollo de este proyecto, prestando parte de su tiempo en la constitución de las bases de cada modelo estudiado, en la asesoría de las distintas tecnologías registradas en este documento. Gracias por brindarnos su apoyo en momentos de duda.

A cada una de las personas que indirectamente aportaron un granito de arena en el desarrollo de la investigación, aquellos que nos atendieron en cada una de las entidades a las que nos acercamos buscando información de ciertos productos o para la adquisición de información importante para la estimación de nuestro sistema a estudiar, aquellos que de una u otra forma estuvieron allí haciendo su trabajo en cada una de las etapas que constituye la investigación hasta la parte administrativa de la universidad.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	16
ABSTRACT.....	17
1. INTRODUCCIÓN.....	18
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
3.1 COLOMBIA Y SU EXTREMA DEPENDENCIA DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA.....	21
3.2 TERMOELÉCTRICAS UNA SEGUNDA OPCIÓN ALTAMENTE CONTAMINANTE.....	22
4. MARCO REFERENCIAL.....	23
4.1 ANTECEDENTES.....	23
4.1.1 RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA DE MANIZALES.....	24
4.1.2 PROYECTO DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN BOGOTÁ D.C.....	24
4.2 ESTADO DEL ARTE.....	25
4.2.1 ARTÍCULOS.....	25
4.2.2 LIBROS.....	26
4.2.3 TESIS.....	26
5. MARCO TEÓRICO.....	29
5.1 RELLENO SANITARIO.....	29
5.2 RESIDUOS SÓLIDOS EN COLOMBIA.....	29
5.3 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	29
5.4 ASPECTOS GENERALES Y DEFINICIONES.....	30
5.4.1 BIOMASA.....	30

5.4.2	BIODIGESTORES.....	33
5.4.3	RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	34
5.4.4	SISTEMA DE EXTRACCIÓN DEL BIOGAS.....	35
5.4.5	PROCESOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS	36
5.4.6	SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO	38
5.4.7	CICLO RANKINE	38
5.5	ENERGÍA SOLAR.....	39
5.5.1	PANEL SOLAR - MÓDULO FOTOVOLTAICO	40
5.5.2	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO/BATERÍAS	40
5.5.3	REGULADOR DE CARGA	40
5.5.4	INVERSOR.....	40
5.5.5	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.....	41
6.	METODOLOGÍA.....	43
7.	EL CASO DEL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO EN BUCARAMANGA SANTANDER.....	44
7.1	LOCALIZACION	44
7.2	SITUACIÓN ACTUAL DEL CARRASCO	44
7.3	DISTRIBUCION DE LAS ZONAS DE DISPOCION FINAL DE RESIDUOS EN EL CARRASCO	45
7.4	PROBLEMÁTICAS AMBIENTALES DEL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO.....	46
7.5	INFORMACION TECNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS QUE INGRESAN EN EL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO	46
7.5.1	PRODUCCION PER CAPITA	47
7.5.2	CARACTERIZACION DE RESIDUOS	47
7.5.3	COMPOSICIÓN QUÍMICA	49
7.5.4	POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE BIOGÁS.....	49
7.5.5	METEOROLOGÍA DE LA ZONA	50
7.5.6	SITUACIÓN SOCIOECONÓMICA	50
8.	ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE BIOGÁS.....	52
8.1	IPCC	52

8.2	SWANA	52
8.3	LandGem (MODELO COLOMBIANO)	53
8.4	MODELO MEXICANO.....	53
8.5	MODELO ECUATORIANO	54
9.	GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGAS	55
9.1	PRODUCCIÓN DE METANO EN EL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO.....	55
9.2	SELECCIÓN DE EQUIPAMIENTO PARA LA GENERACIÓN DE BIOGAS	63
9.3	CAPACIDAD DE GENERACIÓN ENERGÉTICA.....	66
10.	GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA	70
10.1	DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO	73
11.	ANÁLISIS FINANCIERO	84
	CONCLUSIONES	91
	RECOMENDACIONES.....	94
	BIBLIOGRAFÍA	130

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Artículos consultados.....	25
Tabla 2. Libros consultados.....	26
Tabla 3. Tesis consultadas.....	26
Tabla 4. Porcentajes de Biogás.....	31
Tabla 5. Cantidad de residuos depositados durante el 2020.....	46
Tabla 6. Producción per cápita de residuos sólidos por usuario de 2008-2019.....	47
Tabla 7. Caracterización de los desechos sólidos generados.....	48
Tabla 8. Composición química de los residuos sólidos.....	49
Tabla 9. Simulación de potencial de recuperación de biogás por SCS Engineers.....	50
Tabla 10. Parámetros meteorológicos.....	50
Tabla 11. Crecimiento poblacional 2010-2020 DANE.....	51
Tabla 12. Clasificación de proyección del tipo de residuo en El Carrasco.....	56
Tabla 13. Clasificación porcentual del tipo de residuo.....	57
Tabla 14. Índices de generación del metano seleccionados.....	58
Tabla 15. Producción de <i>DDOCmo</i> por año y tipo de residuo.....	58
Tabla 16. Producción de metano en el relleno sanitario El Carrasco.....	59
Tabla 17. Generación energética con biogás.....	66
Tabla 18. Generación energética en MWh al día.....	68
Tabla 19. Comportamiento de consumo de energía en la comuna Mutis por hora-2021.....	72
Tabla 20. Características del módulo FV.....	77
Tabla 21. Características del inversor.....	79
Tabla 22. Factores de pérdidas del conjunto FV.....	79
Tabla 23. Costos de implementación del sistema de Biogas.....	84
Tabla 24. Costos de mantenimiento anual de la planta de Biogás.....	84
Tabla 25. Costos de implementación del sistema fotovoltaico.....	85
Tabla 26. Características de generación y consumo por hora.....	85
Tabla 27. Generación de energía e ingresos por venta.....	88
Tabla 28. Balance.....	89
Tabla 29. Parámetros financieros de la propuesta.....	91

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Intensidad Vs Voltaje de panel solar	41
Gráfica 2. Proyección de generación de residuos relleno sanitario El Carrasco.....	55
Gráfica 3. Comportamiento de producción de metano en el relleno sanitario El Carrasco	61
Gráfica 4. Comportamiento de la caída de presión de acuerdo a las características de la trampa de condensación	64
Gráfica 5. Tiempo de producción del sistema FV	82
Gráfica 6. Generación de energía eléctrica a la salida del inversor.	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema típico de rellenos sanitarios	36
Figura 2. Ciclo Rankine.....	39
Figura 3. Ubicación relleno sanitario el carrasco	44
Figura 4. Localización.	45
Figura 5. Pozos con conexión ramificada múltiple	62
Figura 6. Características del cabezal de pozo	64
Figura 7. Estratificación urbana en Bucaramanga	70
Figura 8. Costo de kWh	71
Figura 9. Distribución del porcentaje de consumo diario per cápita.....	72
Figura 10. Uso de herramienta PVGIS para la determinación de las características solares en Girón.....	73
Figura 11. Inclusión del sitio	74
Figura 12. Datos meteorológicos Girón	75
Figura 13. Panel de configuración de la simulación.....	76
Figura 14. Parámetros de simulación.	78
Figura 15. Ejecución de la simulación.....	80
Figura 16. Comportamiento del rendimiento del sistema FV por meses.....	81
Figura 17. Producciones normalizadas del sistema FV	81

LISTA DE ANEXOS

Anexo A	95
Anexo B	103
Anexo C	105
Anexo D	107
Anexo E	109
Anexo F	112
Anexo G	115
Anexo H	118
Anexo I	120
Anexo J	125
Anexo K	129

GLOSARIO

Basura. Sinónimo de residuos sólidos municipales y de desechos sólidos. Basurero. Botadero, vertedero o vaciadero.

Botadero. Lugar donde se arrojan los residuos a cielo abierto en forma indiscriminada sin recibir ningún tratamiento sanitario.

Aprovechamiento. Actividad complementaria del servicio público de aseo que comprende la recolección de residuos aprovechables, el transporte selectivo hasta la estación de clasificación y aprovechamiento o hasta la planta de aprovechamiento, así como su clasificación y pesaje por parte de la persona prestadora.

Caracterización de los residuos. Determinación de las características cualitativas y cuantitativas de los residuos sólidos, identificando sus contenidos y propiedades.

Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS): Es el conjunto de actividades encaminadas a reducir la generación de residuos, a realizar el aprovechamiento teniendo en cuenta sus características, volumen, procedencia, costos, tratamiento con fines de valorización energética, posibilidades de aprovechamiento y comercialización. También incluye el tratamiento y disposición final de los residuos no aprovechables.

Chimenea. Estructura de ventilación que permite la salida de los gases producidos por la biodegradación de los residuos sólidos.

Cobertura diaria. Capa de material natural y/o sintético con que se cubren los residuos depositados en el relleno sanitario durante un día de operación.

Cobertura final. Revestimiento de material natural y/o sintético que confina el total de las capas de que consta un relleno sanitario, para facilitar el drenaje superficial, interceptar las aguas filtrantes y soportar la vegetación superficial.

Contenedor. Recipiente de capacidad variable empleado para el almacenamiento de residuos sólidos.

Disposición final de residuos sólidos. Es el proceso de aislar y confinar los residuos sólidos en especial los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares especialmente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación, y los daños o riesgos a la salud humana y al ambiente.

Gas generado en el relleno. Es el gas producido durante el proceso de fermentación anaerobia y/o aerobia, o por efectos de reacciones químicas de los residuos sólidos dispuestos.

Lixiviado. Líquido residual generado por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de los residuos sólidos bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas y/o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación.

Material de cobertura. Material de origen natural o sintético, utilizado para cubrir los residuos sólidos depositados en un relleno sanitario.

Metano. Es un hidrocarburo, componente principal del gas natural. Es también un “gas de efecto invernadero” (GHG, por sus siglas en inglés), lo que significa que su presencia en la atmósfera afecta la temperatura y el sistema climatológico de la Tierra.

Monitoreo. Actividad consistente en efectuar observaciones, mediciones y evaluaciones continuas de una característica, elemento, parámetro o de un proceso en un sitio y periodo determinados, con el objeto de verificar los impactos y riesgos potenciales hacia el ambiente y la salud pública.

Relleno sanitario. Es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura Diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final.

Residuo sólido o desecho. Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, 17 industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. Los residuos sólidos se dividen en aprovechables y no aprovechables. Igualmente, se consideran como residuos sólidos, entre otros, aquellos provenientes del barrido y limpieza de áreas y vías públicas, corte de césped y poda de árboles.

Vertedero controlado. Se depositan en lugares específicos, preparados de manera previa para el almacenamiento de basura. A diferencia de los vertederos incontrolados, estos cuenta con un marco legal y una regulación que establece las normas a seguir, los controles que se deben realizar y las autoridades responsables de este tipo de recintos.

RESUMEN

El concepto de Generación Alternativa (GA) ha surgido en los últimos años debido a la evolución significativa que ha tenido el sistema eléctrico, el cual ha mostrado interés por este tipo de infraestructura debido a diversos factores como: la liberación del sector eléctrico, la creciente demanda energética, el agotamiento de las fuentes convencionales de energía, la incursión de las microrredes y la generación con base en energías renovables, entre otros.

En este contexto uno de los mayores sino el más grande consumidor de energía de un país en desarrollo es el sector industrial, el cual se proyecta como el que más horas diarias de energía consume y el que más desechos produce por MW consumido. Por su parte el sector eléctrico pasa a ser una palanca fundamental para el desarrollo futuro de las ciudades y de la industria, por cuanto es el llamado para proponer la correcta distribución y aprovechamiento de residuos industriales y espacios factibles para generación de energía eléctrica a partir de las fuentes renovables.

En el caso particular de este proyecto se hará énfasis en el potencial energético que representa el relleno sanitario de “EL CARRASCO”, el cual produce residuos que pueden ser aprovechados para la generación de energía, basados en los datos de cantidad de residuos que ingresan (tonelada de basura o desechos) y su composición para analizar su capacidad eléctrica a partir del biogás. También se analizará y estimará el potencial de generación que ofrecen los sistemas fotovoltaicos para el aprovechamiento de la energía solar, permitiendo presentar una oportunidad de implementación de generación alternativa en un sector específico de Bucaramanga.

Para finalizar se realizará un análisis financiero para la implementación de estos procesos de energías renovables, en una ciudad como Bucaramanga para una población objetivo limitada para la finalidad de este proyecto.

PALABRAS CLAVE: Biogás, Residuos sólidos urbanos, Relleno sanitario.

ABSTRACT

The concept of Alternative Generation (AG) has emerged in recent years due to the significant evolution that the electricity system has had, which has shown interest in this type of infrastructure due to various factors such as: the release of the electricity sector, the growing energy demand, the depletion of conventional energy sources, the incursion of microgrids and generation based on renewable energies, among others.

In this context, one of the largest if not the largest consumer of energy in a developing country is the industrial sector, which is projected as the one that consumes the most hours of energy per day and the one that produces the most waste per MW consumed. For its part, the electricity sector becomes a fundamental lever for the future development of cities and industry, as it is the call to propose the correct distribution and use of industrial waste and feasible spaces for the generation of electricity from renewable sources.

In the particular case of this project, emphasis will be placed on the energy potential represented by the "EL CARRASCO" sanitary landfill, which produces waste that can be used for energy generation, based on data on the amount of waste that enters (ton of garbage or waste) and its composition to analyze its electrical capacity from biogas. The generation potential offered by photovoltaic systems for the use of solar energy will also be analyzed and estimated, allowing to present an opportunity to implement alternative generation in a specific sector of Bucaramanga.

Finally, a financial analysis will be carried out for the implementation of these renewable energy processes, in a city like Bucaramanga for a limited target population for the purpose of this project.

KEY WORDS: Biogas, Urban Solid Waste, Landfill.

1. INTRODUCCIÓN

La generación excesiva de residuos sólidos y la falta de disposición de los mismos se ha convertido en un problema a nivel mundial. Los problemas ambientales originados por el sistema económico, político y social actual no han dejado de aumentar desde que la industria se volvió el eje principal sumado al excesivo aumento de la población se traducen en una producción desmedida de residuos sólidos cada vez más grande y más difícil de manejar.

La búsqueda de la producción de energía en un futuro debe ir unida al medio ambiente fomentando el uso racional de energías alternativas. Es por esto que se ha incentivado la implementación de una gran variedad de métodos para la generación de energía como lo son las fuentes de generación a través de biomasa, biogás y energía solar (PV), en el cual se centra este estudio. Dichas fuentes se caracterizan por su capacidad de ofrecer un servicio eficiente y de calidad, ayudando a abastecer la demanda de energía actual.

Considerando de la misma forma el impacto que tiene tecnologías limpias implementadas actualmente durante lo largo del país, cuyas consecuencias ha ido apareciendo a medida que se depende cada vez mas de ellas, que en su momento y hasta ahora conforman una de las alternativas más aceptadas para la generación de energía, pero que factores como deforestaciones, cambios de ecosistemas y hasta alteración del desarrollo natural de la fauna y flora con nuestra sociedad, como son los cambios químicos de los embalses de agua, llegan a ser factores que de una u otra forma, han hecho de estos enormes proyectos como las hidroeléctricas, se consideren como las causantes de muchos problemas al medio ambiente.

En este trabajo de grado se propone alternativas viables, como solución a las problemáticas ambientales y energéticas del país, haciendo uso del mismo problema y convirtiéndolo en una solución viable para la generación de energía eléctrica y un mejor tratamiento para los rellenos sanitarios, dichos rellenos operan sin un proceso adecuado que permita el correcto tratamiento de estos, sin el riesgo de ser parte del problema de la contaminación del medio ambiente que tanto aqueja, no solo a esta nación, sino que es un problema mundial.

Mediante el estudio de técnicas y el aprovechamiento de la materia sólida, como son la energía solar PV, biomasa y biogás para la producción de energía, se busca combatir los problemas ambientales y las desbordantes cifras de residuos generadas por la población estudiada que a lo largo del uso de vertederos como el Carrasco que ha tenido impacto en la salud y bienestar de los ciudadanos.

Así mismo, debe mencionarse que se descartó el uso de técnicas de generación como la eólica, al considerar que la velocidad promedio de los vientos en el relleno sanitario El Carrasco oscila entre 4.3 km/h (mes de junio) a 5.7 km/h (mes de

febrero), siendo estos medidos a una altura de 10 m. Ahora, aunque el requerimiento para generar un potencial eléctrico significativo solicita de una velocidad de vientos superiores a 3,5 km/h, dichos valores no son posibles de obtener durante un tiempo representativo del día en el lugar del emplazamiento.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de generación eléctrica basado en energías renovables que tenga como entorno el terreno del relleno sanitario “El carrasco” y su potencial en producción de energía solar PV y biogás como subproducto de la acumulación de biomasa disponible en dicho sitio final de disposición de residuos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Definir el potencial de generación eléctrica que a partir de la biomasa del relleno sanitario “El Carrasco” se puede producir en las condiciones actuales.
2. Estructurar el sistema de captación y disposición de energía eléctrica de naturaleza solar fotovoltaica, para complementar la red de alimentación alterna a la red convencional.
3. Realizar un análisis financiero de la implementación de los procesos de energías renovables escogidas.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 COLOMBIA Y SU EXTREMA DEPENDENCIA DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA

Por años las hidroeléctricas han sido consideradas como sinónimo de desarrollo y Colombia, gracias a su topografía, pluviosidad y recurso hídrico cuenta con un potencial excepcionalmente alto para desarrollar este tipo de macro proyectos de ingeniería. En efecto, este tipo de tecnología aportaba para el 2018, 70% de la demanda del país.

Son múltiples las razones que hacen que este tipo de obras sean consideradas como una opción atractiva para la generación de energía: su operación es más económica que las termoeléctricas, su construcción es menos costosa que las plantas nucleares, pueden proveer energía a gran escala y tienen el potencial de generar bajas emisiones de gases contaminantes que contribuyen al efecto invernadero. Todas estas son razones suficientes que han considerado los tomadores de decisiones a nivel estatal para que en varias regiones del país se hayan levantado, sobre importantes afluentes, centrales hidroeléctricas como Guavio, Urrá, Salvajina, Chivor, Calima, Alto Chicamocha, Hidromiel, Hidrosogamoso, Peñol-Guatapé, Ituango, San Carlos, Betania, El Quimbo, entre otras, que suman 33 en el caso colombiano. [1]

Colombia es una de las naciones con la más rica diversidad de terreno, al igual que posee grandes afluentes de agua, razón por la cual la principal fuente para la generación de energía eléctrica es precisamente la de tipo hidroeléctrico, satisfaciendo de esta forma la demanda de una nación en más de un 70%, pero denotando a la vez una dependencia que se proyecta con cierta preocupación, pues lo que antes se consideraba como un recurso confiable, hoy día se ve como posible desventaja en un futuro próximo con la proyección de sequías y nuevos fenómenos del niño en años venideros para América del Sur. [2]

Adicional a esto el desastre que actualmente la rodea, la construcción y el mantenimiento de hidroeléctricas representan un innegable costo económico, social y ambiental, en particular para la población más desprotegida de la sociedad. Es así como en el planeamiento de estos proyectos, se suele desprestigiar el impacto ambiental a largo plazo, ya que, es considerado como parte de progreso, sin tener en cuenta los índices de bosque que llegan a ser deforestados por los granjeros y agricultores para recuperar sus asentamientos, y el alto costo ambiental debido a la eutrofización del agua, proceso de alteración de un cuerpo hídrico, causado por una excesiva acumulación de nutrientes que se manifiestan mediante cambios en la flora, fauna y en la composición química del agua.

3.2 TERMOELÉCTRICAS UNA SEGUNDA OPCIÓN ALTAMENTE CONTAMINANTE

La generación de energía termoeléctrica es una de las formas más convencionales para la producción de energía en el país, sin embargo, es importante destacar que no es 100% segura ya que presenta inconvenientes que afectan el desarrollo del ecosistema. [3]

Entre las desventajas de este tipo de generación se encuentran las chimeneas de las centrales, que por su gran altura se ven a la distancia, emiten continuamente, día y noche, diversos tipos de gases como producto de la combustión de un tipo de carbón bituminoso, conocido internacionalmente como petcoke, su fuente de abastecimiento. Estas emisiones contienen NH_3 , NO , óxidos de azufre, y sulfuros, óxidos de Azufre, CO_2 en enorme cantidad y otros elementos químicos más, todos muy contaminantes. Todos ellos terminan por depositarse, cerca o lejos de las fuentes de emisión, sobre suelos, rocas, mares, salares o pampas, se disuelven (sulfuros) para actuar como ácidos (H_2SO_3 , o H_2SO_4), o son conducidos, hasta cientos de kilómetros de distancia, a centros poblados, ciudades o quebradas donde se practica la agricultura desde antaño. Varias de estas substancias, al mezclarse con el H_2O contenido en la alta humedad atmosférica costera (camanchaca), se convierten en ácidos como es el caso del ácido sulfuroso, sulfúrico o ácido nitroso. Una vez en el suelo, son absorbidas por los seres vivos, plantas o animales (insectos, reptiles, etc.). [3]

El costo final de este tipo de energía es más elevado debido a factores como el precio de los combustibles fósiles, por lo que implicaría realizar grandes y variadas inversiones lo que causaría problemas en el costo de la generación de energía. El uso de combustibles fósiles genera emisiones de gases contaminantes (SO_2 , CO , NO_x) y lluvia acida a la atmosfera además de que afectan negativamente a los ecosistemas fluviales debido a los vertidos de agua caliente que evacua. [3]

Además, el rendimiento de este tipo de centrales es bajo, pues solo un 30 o 40 por ciento de la energía liberada en la combustión se convierten en electricidad. De igual forma el recurso limitado y las condiciones cambiantes inducirán a los consumidores a reemplazar el petróleo y el gas como combustibles que ya cumplieron su tiempo y de los cuales se ha pagado un fuerte daño colateral. [3]

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES

La elección del sitio como área de disposición de residuos de la región, el cual tiene por nombre El Carrasco, fue realizado por un convenio suscrito en 1977, entre el municipio de Bucaramanga, Empresas Públicas de Bucaramanga y una firma consultora canadiense “GEORGE RIVOCHÉ”, que localizó y determinó la zona como apta para la realización de este proyecto. [4]

Este territorio se remonta en el año de 1978, como botadero a cielo abierto durante más de 20 años, hasta el año 1998 en donde Empresas Públicas de Bucaramanga decide presentar ante la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) un plan de manejo ambiental, por la cual se establece la Resolución 753 del 13 de Agosto del mismo año. [5]

En marzo de 2005, el Gobierno Nacional expidió el Decreto 838 de 2005, el cual consagró formalmente los procedimientos, criterios, metodología, restricciones y prohibiciones para la localización de áreas para disposición final de residuos mediante la tecnología de relleno sanitario, conocido como PGIRS. [4]

En los años consecutivos, la EMAB ha venido recibiendo una serie de sanciones referentes al deficiente manejo técnico y ambiental de este relleno sanitario, conllevado a que la Alcaldía de Bucaramanga y su Área Metropolitana, decretaran emergencia sanitaria en 2011 para poder continuar la disposición en el sitio, a partir de la cual se han proferido un total de 4 emergencias sanitarias así:

- Decreto 0234 de 01 de octubre de 2011: Mediante el cual la Alcaldía de Bucaramanga declaró inicialmente por seis (6) meses la emergencia sanitaria, a raíz de la orden de cierre definitivo dada por el tribunal. [5]
- Decreto 0056 de 30 de marzo de 2012: Mediante el cual la Alcaldía de Bucaramanga prorrogó, a partir del 1 de abril del 2012, por un término de diez y ocho meses (18) el estado de emergencia sanitaria declarado por el municipio de Bucaramanga mediante el decreto 0234 del 2011. [5]
- Decreto 0190 de 30 de septiembre de 2013, el cual amplía la situación de riesgo de calamidad pública y estado de emergencia sanitaria en el municipio de Bucaramanga hasta el 30 de septiembre de 2015, fecha para la cual se dispuso la orden de judicial de cierre definitivo del Relleno Sanitario El Carrasco. [5]
- Decreto 0158 del 25 de septiembre de 2015, por medio del cual el alcalde de Bucaramanga prorrogó a partir del 01 de octubre de 2015, y hasta por el

término de veinticuatro (24) meses, la declaratoria de existencia de situación de riesgo de calamidad pública que da lugar al estado de emergencia sanitaria y ambiental en el Municipio de Bucaramanga. [5]

Actualmente, a partir del 1 de febrero de 2019 el sitio de disposición de residuos sólidos El Carrasco viene realizando la fase de cierre, fase en la que los residuos sólidos que ingresen a partir de dicha fecha se dispondrán únicamente con el fin de construir las estructuras de contención que garanticen la estabilización de las celdas existentes, y que por consiguiente tendrán un término definitivo en relación con el ingreso de residuos al sitio de disposición final, de acuerdo con el análisis técnico presentado en el Plan de Desmantelamiento y Abandono por medio de la Resolución 153 de 2019. [6]

4.1.1 RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA DE MANIZALES

El proyecto consistirá de la instalación de un sistema de colección de biogás para extraer el biogás y ser utilizado como combustible en generadores de combustión interna en una planta de energía. Los ingresos del proyecto serán creados por las ventas de la energía (exportándola a la red eléctrica) y de la venta de Reducciones Certificadas de Emisiones (CER) de gases invernadero. [7]

Con una capacidad total de aproximadamente 2.8 millones de toneladas de residuos sólidos de 19 municipios, con una extensión de 54 hectáreas. Actualmente, el relleno sanitario acepta cerca de 400 toneladas diariamente. Asumiendo que el sistema de colección y combustión comience su funcionamiento en el 2006 se reduciría aproximadamente 455.005 toneladas de emisiones de CO_2eq para el 2006 al 2012 y de 874.399 ton de reducción de emisiones de CO_2eq para el periodo del 2006 al 2019. [7]

4.1.2 PROYECTO DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN BOGOTÁ D.C

El proyecto ubicado en el Distrito Capital de Colombia, Bogotá, implica la captación de biogás, combustión, uso de motores alternativos en el emplazamiento del relleno sanitario de Doña Juana, y el uso para la producción de energía térmica en las industrias cercanas. El proyecto tiene como propósito disminuir las emisiones de GEI a través de la recuperación y quema del gas de relleno sanitario de Doña Juana, en Colombia. [7]

- Reducciones anuales: 827.384 *Ton CO₂eq/año*
- Reducciones totales durante el período de acreditación: 5.971.686 *Ton CO₂eq* (2009 a 2016) con la opción de renovarse como máximo 2 veces, duración máxima 21 años.

- Reducciones totales hasta 2012: 2.645.931 *Ton CO₂*. Desarrollo del modelo a utilizar Modelo EPA.

4.2 ESTADO DEL ARTE

4.2.1 ARTÍCULOS

Tabla 1. Artículos consultados.

Nombre del artículo	Resumen	Aporte del proyecto
Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. [8]	Se avaluó pasto de las áreas verdes públicas de la ciudad de Palmira para determinar su potencial para producir energía renovable a través de la digestión anaerobia.	La digestión anaerobia como alternativa viable y sostenible para el manejo de residuos sólidos.
Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia. [9]	Presenta la evaluación del modelo colombiano de biogás, con el objetivo de estimar el potencial de generación de biogás proveniente de diferentes rellenos sanitarios.	El modelo colombiano permite tener en cuenta diferentes regiones del país en las cuales varían los pisos térmicos y los niveles de pluviosidad.
Valorización energética del biogás en un relleno sanitario. [10]	Se realizó la proyección con el modelo colombiano de generación de Biogás y se crearon alternativas desde el punto de vista técnico y ambiental.	Alternativas de aprovechamiento del biogás, como son la generación de electricidad y el uso como combustible directo.
Estrategia de manejo ambiental sobre el biogás en la fase de cierre del relleno sanitario el carrasco, Bucaramanga (Santander). [6]	Se inició con el diagnóstico ambiental del estado actual del relleno, para lo cual se tuvo en cuenta las variables que permitieron calcular la generación y recuperación de biogás mediante el modelo de la EPA US	Teorías como las implicaciones del gas metano y los rendimientos teóricos de biogás a partir de los residuos sólidos para aprovechar el potencial energético del biogás

Fuente: Autores

4.2.2 LIBROS

Tabla 2. Libros consultados.

Nombre del libro	Resumen	Aporte
Energía de la biomasa (Volumen I). [11]	Se trata sobre las generalidades de la biomasa, pre tratamientos y aspectos generales de combustión.	Conocimiento sobre la biomasa y cada aspecto que implica el aprovechamiento de los biocombustibles sólidos para producción de energía.
Reciclaje de residuos industriales (Segunda Edición). [12]	Se habla del problema de la contaminación atmosférica, las aguas residuales y los residuos contribuyen al deterioro del ambiente y la salud.	Conceptos de residuo, clasificación y sostenibilidad, en particular la energética.
Tratado de Biomasa con especial incidencia sobre la Biomasa como fuente energética. [13]	Trata sobre la biomasa como fuente de energía, describe los sectores, los procesos físicos y químicos para la transformación de biomasa, además de que llega abarcar análisis económico y medio ambiental.	Una visión general de la biomasa y su capacidad energética, vista desde la generación hasta el aprovechamiento del potencial que posee y sus efectos en el medio ambiente.

Fuente: Autores

4.2.3 TESIS

Tabla 3. Tesis consultadas.

Nombre de la tesis	Resumen	Aporte
Biomasa: estudio de factibilidad para implementar un sistema de generación de energía a partir de residuos vegetales. [14]	La biomasa es una de estas fuentes de energía contenida en residuos orgánicos, que es adsorbida de la luz solar por medio de la fotosíntesis. se plantea el aprovechamiento de esta materia orgánica.	Se plante los resultados y metodología para el desarrollo y aprovechamiento residuos como un medio para adquirir un poder energético para la transformación de energía eléctrica.

<p>Generación de energía eléctrica a partir de la biomasa en Uruguay. La dendroenergía. [15]</p>	<p>La realización de distintos estudios ante la viabilidad termo-económica generada a partir de biomasa y recurso energéticos obtenidos de la deforestación.</p>	<p>Se marca el gran índice de energía que se puede extraer de ella y a medida que se plantee un sistema, se proyecta a aumentar su rentabilidad.</p>
<p>Utilización de biomasa para la generación de energía eléctrica. [16]</p>	<p>Busca analizar la factibilidad de construir una central eléctrica que funcione a partir de biomasa que es un tipo de energía limpia y renovable.</p>	<p>Recalca los beneficios de hacer uso de esta fuente renovable de energía eléctrica a partir de un medio limpio sin agregar gases de efecto invernadero a la atmósfera.</p>
<p>Producción de energía eléctrica a partir de biogás procedente de vertederos de residuos sólidos urbanos. [17]</p>	<p>La producción descontrolada de residuos ha creado la necesidad de gestionarlos, además del aprovechamiento posterior a su producción tradicional.</p>	<p>Se busca la viabilidad para un desarrollo sostenible con fines no energéticos, al estudiarse diferentes tipos de medios para la adquisición de materia orgánica.</p>
<p>Aplicaciones de la energía solar al tratamiento térmico de suelos de invernadero. [18]</p>	<p>El uso de sistemas para la eliminación de patógenos perjudiciales para el desarrollo de productos agrícolas en el suelo. Se ha venido haciendo uso de sistemas de energía solar para el tratamiento para este.</p>	<p>La energía solar fotovoltaica se puede utilizar en el control y/o automatización de instalaciones para tratamiento térmico de suelos de invernadero.</p>
<p>Estudio, diseño e implementación de un sistema de energía solar en la comuna puerto roma de la isla Mondragón del golfo de Guayaquil, provincia de Guayas. [19]</p>	<p>La falta de energía de forma continua en lugares de Ecuador, motivo la implementación de un sistema de energía renovable, para esto se plantea el proyecto sobre la ventaja de hacer uso de un sistema de transformación de</p>	<p>La capacidad de cambiar las condiciones que vivienda de una población con la implementación de un sistema de adquisición de energía solar, para su posterior transformación en energía eléctrica para el uso de la comunidad.</p>

	energía mediante una fuente solar	
--	--------------------------------------	--

Fuente: Autores

5. MARCO TEÓRICO

5.1 RELLENO SANITARIO

La normativa vigente en el país, define relleno sanitario o vertedero controlado como una “técnica de ingeniería para el adecuado confinamiento de los residuos sólidos municipales; comprende el esparcimiento, acomodo y compactación de los residuos, su cobertura con tierra u otro material inerte, por lo menos diariamente; el control de los gases, de los lixiviados, y de la proliferación de vectores, con el fin de evitar la contaminación del ambiente y proteger la salud de la población. [20]

5.2 RESIDUOS SÓLIDOS EN COLOMBIA

Con el incremento de la población, se intensifican algunos de los principales problemas ambientales que ha generado la humanidad desde hace tiempo, por ejemplo, la alta generación y acumulación de residuos, la escasa separación de las basuras, el poco uso y tratamiento de los residuos reciclables, así como un manejo inadecuado de residuos peligrosos. Estos son algunos de los principales problemas que el país afronta respecto al tratamiento de residuos, generando un gran impacto de contaminación sobre los recursos naturales, los ecosistemas, la salud y la calidad del ambiente.

Una vía alternativa para minimizar los impactos negativos de estos factores de contaminación y baja eco eficiencia es la gestión adecuada de residuos, los cuales pueden ser aprovechados para diversos procesos como la generación distribuida de energía, consignada en la ley 1715 de 2014, la cual busca impulsar las fuentes no convencionales de energía (FNCE) a partir del empleo de técnicas e implementación de energías renovables.

5.3 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

El exceso de residuos sólidos principalmente en las grandes ciudades y el inadecuado tratamiento de dichos residuos por parte de los entes territoriales ha provocado un impacto ambiental, social y económico negativo, optando por establecer el desarrollo de programas de seguimiento y control para el cumplimiento de las normas ambientales, y así mismo, poner en marcha programas de modernización y reconversión industrial orientados a aumentar la eficiencia ambiental y económica. [21]

Para poder tener una buena gestión de los residuos sólidos es necesario cuantificar la producción día a día de un barrio, una industria, empresa o ciudad. Así mismo, identificar su calidad y composición, la cual varía dependiendo del estrato socioeconómico, la ciudad, la densidad poblacional, etc. El sector de los residuos sólidos tiene preponderancia en el marco del cumplimiento de los ODS, puesto que

la inadecuada gestión de los residuos sólidos tiene múltiples impactos en escalas sociales, ambientales y económicas.

5.4 ASPECTOS GENERALES Y DEFINICIONES

5.4.1 BIOMASA

Hace referencia a “la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía”. Dichos recursos pueden ser agrupados de manera general en agrícolas y forestales. [22]

Según la Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, se define biomasa como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales. [22]

5.4.1.1 CLASIFICACION SEGÚN SU ORIGEN

- A. NATURAL:** Es la biomasa que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas que no hayan sufrido intervención humana. [22]
- B. RESIDUAL:** Es la biomasa que procede de los residuos generados por el desarrollo de diferentes actividades humanas y los vertidos denominados biodegradables. Se clasifican en secos y húmedos, o en sólidos y líquidos. [22]
- C. CULTIVO ENERGÉTICO:** Son aquellos cultivos con fines no alimentarios destinados a la producción de energía. Son seleccionados en base a la producción de cantidad de biomasa, y no de calidad, y suelen ser especies caracterizadas por su robustez a fin de abaratar los costos de cultivo y, por tanto, el precio de la biomasa final. [22]

Se distingue dentro de la bioenergía, o biomasa en sentido amplio, cuatro fuentes energéticas las cuales son: (1) biomasa sólida, (2) biogás, (3) fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y (4) biocarburantes. [23]

5.4.1.2 BIOMASA SÓLIDA

Aprovechamiento térmico o eléctrico de la materia orgánica de origen vegetal o animal (excluyendo aquellos usos que se definen en las siguientes categorías). Dependiendo del origen y composición de cada uno de los materiales y residuos utilizados, la biomasa sólida se divide en: [23]

A. PRIMARIA: Formada por cultivos energéticos, que son cultivos de especies vegetales destinados específicamente a la producción de biomasa para uso energético. [23]

B. RESIDUAL O SECUNDARIA: Residuos forestales (como los generados en operaciones de limpieza o poda), residuos agrícolas leñosos (como podas de olivos, viñedos y frutales), residuos agrícolas herbáceos (como la paja de cereales de invierno o el cañote del maíz), residuos de industrias forestales y agrícolas (astillas, cortezas, serrín, huesos de aceitunas, cáscaras de frutos secos, cascarilla de arroz etc.). [23]

5.4.1.3 BIOGÁS

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de degradación de la materia orgánica (biomasa) mediante la acción de microorganismos y otros factores, en un ambiente anaerobio, es decir, en ausencia de oxígeno. A dicho proceso de degradación se le denomina digestión anaerobia. [24]

Las emisiones atmosféricas de un relleno sanitario, llamadas comúnmente biogás, son producidas principalmente por reacciones anaeróbicas. La cantidad y composición de este gas depende de la masa depositada de residuos; la composición y el tipo de desecho orgánico; su estado y las condiciones del medio. [25] La composición típica de biogás en los rellenos nacionales contienen aproximadamente 50% - 54% metano (CH_4), 45% - 48% dióxido de carbono (CO_2), 1% - 3% nitrógeno (N_2) y 0,2% - 0,9% oxígeno (O_2). [26]

Tabla 4. Porcentajes de Biogás.

Componente	Residuos Ganaderos	Residuos Agrícolas	Aguas Residuales	Residuos municipales	Gases de basureros
Metano	50-80 %	50-80 %	50-80 %	50-70 %	45-60 %
CO ₂	30-50 %	30-50 %	20-50 %	30-50 %	40-60 %
Hidrogeno	0-2 %	0-2 %	0-5 %	0-2 %	0-0,2 %
H ₂ S	0-1 %	0-2 %	0-1 %	0-8 %	0-1 %
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	0,1-1 %
CO	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-0,2 %
N	0-1 %	0-1 %	0-3 %	0-1 %	2-2,5 %

0	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0,1-1 %
---	-------	-------	-------	-------	---------

Fuente: [27]

5.4.1.3.1 FACTORES QUE CONDICIONAN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

El biogás se genera como resultado de reacciones físicas, químicas y microbianas que ocurren dentro de los rellenos sanitarios, debido a la naturaleza orgánica de gran parte de los residuos, el proceso microbiano gobierna la producción de biogás.

- **COMPOSICIÓN DE RESIDUOS:** Es el máximo potencial de generación de biogás, depende del porcentaje de residuos orgánicos sobre el total, además del tipo de desecho orgánico, pues estos son la fuente de producción de biogás. [26]
- **DENSIDAD DE RESIDUOS Y TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS:** Esto afecta el transporte de nutrientes y humedad en el relleno, la presencia de partículas pequeñas favorece el transporte, lo que aumenta la tasa de formación de biogás. [26]
- **TEMPERATURA:** La temperatura de un relleno sanitario es mayor que la ambiental, debido a que ocurren reacciones exotérmicas en su interior. El rango óptimo para la existencia de bacterias anaeróbicas es de 30°C a 41°C. En rellenos sanitarios con temperaturas bajo los 10°C hay una drástica caída en la actividad de dichas bacterias. [26]
- **HUMEDAD:** El contenido óptimo de humedad para la producción de biogás es de 50% a 60%. [26]
- **pH Y NUTRIENTES:** La generación de metano en rellenos sanitarios es máxima cuando existen condiciones de pH neutro. El pH óptimo durante la formación de metano es en el rango de 6.5 a 8.0. [26]
- **COBERTURA:** El recubrimiento diario tiene una serie de efectos en el relleno sanitario, ya que evita el contacto de los desechos con el oxígeno. Una producción óptima requiere condiciones anaeróbicas y, por lo tanto, recubrimiento diario. El espesor debe impedir que la temperatura de la basura se vea afectada por las condiciones meteorológicas y obstaculizar el ingreso del aire. [26]
- **EDAD DE LOS RESIDUOS:** Una vez que las condiciones anaeróbicas se establecen, la generación de biogás es significativa durante 10 a 20 años. [26]

5.4.1.3.2 FASES EN LA GENERACIÓN DE BIOGÁS

- I. **DESCOMPOSICIÓN AERÓBICA:** Ocurre inmediatamente después del depósito de residuos, en presencia de oxígeno, produciendo dióxido de carbono, agua y calor. [26]
- II. **DESCOMPOSICIÓN ANÓXICA, NO METANOGÉNICAS:** En esta fase se originan compuestos ácidos y gas hidrógeno, además de sostenerse la producción de dióxido de carbono. También se destruyen grandes moléculas, que forman pequeñas cadenas en las que se incluye amoníaco, dióxido de carbono, hidrógeno y agua. [26]
- III. **ANAERÓBICA METANOGÉNICAS INESTABLE:** Aquí la creación de dióxido de carbono decrece, porque la descomposición comienza la transición desde una fase aeróbica a una anaeróbica. La descomposición anaeróbica produce calor, agua y metano. [26]
- IV. **ANAERÓBICA METANOGÉNICAS ESTABLE:** En esta fase el gas metano se produce en concentraciones entre 40% a 70% del volumen total y, generalmente, en forma estable. [26]
- V. **ANAERÓBICA METANOGÉNICAS EN DISMINUCIÓN:** Después de convertirse gran parte del material biodegradable en metano y dióxido de carbono durante la fase IV, la humedad sigue migrando a través de los desperdicios y convierte el material orgánico que antes no estaba disponible. [26]

5.4.1.4 FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU).

La Directiva 2008/98/CE incluye como biorresiduos los residuos orgánicos procedentes de jardines y parques, los residuos procedentes de las cocinas y de los alimentos de los hogares, bares, restaurantes, proveedores y redes de distribución de alimentos y residuos procedentes de las plantas de tratamiento de los alimentos. Su transformación en energía se realiza por incineración. [23]

5.4.2 BIODIGESTORES

Es un contenedor de cualquier forma, tamaño o material y además hermético donde se lleva a cabo la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas y facilita la extracción del gas como producto. El biodigestor cuenta principalmente con la entrada para el material orgánico, un espacio para su descomposición, una salida con válvula para el biogás y una salida para el material que ya ha sido procesado. Los elementos que comúnmente integran un biodigestor son: [28]

- **CÁMARA DE FERMENTACIÓN:** Lugar de almacenamiento de la biomasa durante el proceso de descomposición.
- **CÁMARA DE ALMACÉN DE GAS:** Lugar donde se lleva a cabo la acumulación del biogás antes de ser extraído.
- **PILA DE CARGA:** Entrada de la biomasa.
- **PILA DE DESCARGA:** La salida, sirve para retirar los residuos que ya están gastados y no son útiles para el biogás.
- **AGITADOR:** Mover los residuos que están en el fondo hacia la parte superior del biodigestor para aprovechar toda la biomasa.
- **TUBERÍA DE GAS:** La salida del biogás. Se puede conectar a una estufa o se puede transportar por medio de la misma tubería a su lugar de aprovechamiento.

5.4.3 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

5.4.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS R.S.U

- **ORIGEN:** Originados principalmente en los hogares, comercios, instituciones, en construcciones, en la industria, en el agro, etc.
- **COMPOSICIÓN:** Estos residuos pueden ser orgánicos o inorgánicos
- **GRADO DE PELIGRO:** Entre los residuos con mayor grado de peligrosidad están los inertes, inflamables, sanitarios, radiactivos, infecciosos, etc.
- Residuos que serán tenidos en cuenta para la recuperación energética: [26]
- **DOMICILIARIOS:** Está constituido por desperdicios de cocina, papeles, plásticos, depósitos de vidrio y metálicos, cartones, textiles, desechos de jardín, tierra, etc.
- **COMERCIALES:** Generadas principalmente por actividades de comercio diarias como restaurantes, oficinas, mercados, etc.
- **SERVICIOS MUNICIPALES:** Son los residuos que se obtienen en el barrido de las vías públicas y en la limpieza de espacios públicos. Se componen principalmente de residuos inertes, papel, restos de poda de jardinería, etc.

5.4.3.2 COMPOSICIÓN DE LOS R.S.U

- **COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS:** Entre las características físicas a tener en cuenta, podemos observar: composición gravimétrica, densidad, compresibilidad y producción per cápita. [26]
- **COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS RESIDUOS:** Entre las características están: poder calorífico, potencial de hidrógeno, composición química (humedad, nitrógeno, cenizas, carbono, relación C/N , fósforo, potasio, pH, capacidad calorífica). [26]

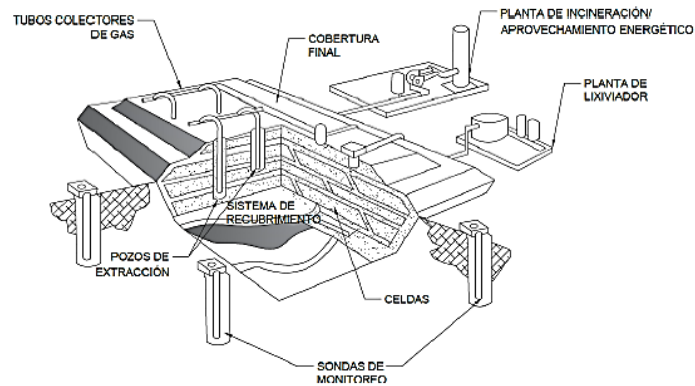
5.4.4 SISTEMA DE EXTRACCIÓN DEL BIOGAS

Los rellenos sanitarios asociados con el proceso de extracción de biogás para el aprovechamiento energético pueden ser de naturaleza pasiva o activa. Los sistemas pasivos drenan el biogás al interior del relleno por medio de la implementación de chimeneas que proveen un paso de baja pérdida de carga para el biogás, mientras que los sistemas activos utilizan equipos de extracción que generan la diferencia de presión indispensable para evacuar el biogás al interior del relleno. [26]

Para temas de aprovechamiento energético, se debe contemplar sistemas activos, los cuales incluyen los siguientes componentes:

- A. POZOS DE EXTRACCIÓN:** Un pozo de extracción corresponde al trayecto que provee una menor pérdida de carga para evacuar el biogás de manera controlada y evitar accidentes. Los esquemas más comunes en proyectos de captura de biogás son pozos verticales, que se instalan en áreas de disposición ya clausuradas e ideales para profundidades de residuos de al menos 10 metros. [26] Anexo A.
- B. CABEZAL DE POZO:** Se sitúan en la parte superior de los pozos de extracción y tienen funciones enfocados en el control de la extracción de gas, medir caudal de gas de cada pozo, regular el flujo, eliminar el agua, manejo combinado de lixiviados y gas, y constituir un acople telescópico para considerar el movimiento de la superficie del relleno sanitario. El material más utilizado es polietileno (PE). [26] Anexo A.

Figura 1. Esquema típico de rellenos sanitarios



Fuente: [26]

C. TUBERÍAS COLECTORAS: Su función es transportar el biogás de los pozos de extracción a la estación de aprovechamiento. Generalmente las tuberías se constituyen de polietileno o polipropileno, materiales con óptima resistencia mecánica y química. Sumado a lo anterior, el sistema debe contar con puntos de drenaje de agua y válvulas suficientes para aislarlos en secciones. [26] Anexo A.

D. SISTEMA DE BOMBEO DE EXTRACCIÓN: Usualmente se utilizan compresores o sopladores centrífugos para la extracción del biogás. Los compresores son usados en el intervalo de capacidad de 150 m³/h a 3000 m³/h. Sumado a lo anterior, se debe contemplar el uso de supresores de llama en caso de auto combustión con el fin de reducir el riesgo de explosión y de la instrumentación para el balanceo del flujo extraído del pozo. [26] Anexo A.

E. SISTEMA DE CONDENSADO: Un elemento fundamental en el diseño de la planta de biogás se debe considerar es el sistema de control y extracción del condensado del mismo. El condensado se da por el enfriamiento del biogás durante su transporte a la estación de bombeo, el cual suele estar a la temperatura interior del relleno y saturado en humedad. [26] Anexo A.

5.4.5 PROCESOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS

5.4.5.1 COMBUSTIÓN DIRECTA

La materia orgánica reacciona de forma química con el oxígeno mediante el proceso de combustión a través de una reacción exotérmica, la cual transmite calor al medio, obteniéndose dióxido de carbono y agua. Si los compuestos que reaccionan tienen azufre y nitrógeno, aparece óxido de azufre y óxido de nitrógeno: [26]

- Temperatura entre 600 y 1300 °C
- Se aconseja humedad menor a 15% (biomasa seca) logra rendimientos de cerca de 80%
- Rendimiento de 60% humedad >50%
- Granulometría
- Densidad

5.4.5.2 GASIFICACIÓN

Transforma el combustible sólido en gaseoso el cual contiene CO , CO_2 , H_2 , CH_4 y vapor de agua, la biomasa debe tener una humedad baja para evitar pérdidas de energía en la evaporación y mejorar el rendimiento del proceso. Temperatura entre 700 y 1500 °C, del proceso se tiene un gas pobre con PCI 5,5 MJ/m³, se usa en equipos de combustión destinados a generar electricidad mediante turbinas de gas y generadores eléctricos. [26]

5.4.5.3 PIRÓLISIS

Se realiza en ausencia de oxígeno, la biomasa es destilada térmicamente con temperaturas superiores a los 250°C hasta temperaturas de 500°C. Mediante este proceso resultan ácidos piroleñosos o alquitrán y agua, y el residuo gaseoso que constituye precisamente una mezcla de gases (CO , H_2 , Hidrocarburos Ligeros y N). [29]

5.4.5.3 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia, también denominada biometanización, es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, en el cual la materia orgánica compleja se descompone, gracias a la acción de varios grupos de microorganismos (bacterias y arqueas), dando como productos finales un biogás y digerido (residuo estabilizado). [30]

El producto principal de este proceso es el biogás, que es una mezcla de metano (50% a 70%) y dióxido de carbono (30% a 50%) con pequeñas proporciones de otros componentes como nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), hidrógeno (H_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí. Además, la masa restante, llamada biol, puede ser utilizada como fertilizante de suelos o en la alimentación animal. [31]

5.4.5.4 LA INCINERACIÓN

Consiste en la combustión directa del combustible, por oxidación térmica, con exceso de oxígeno. El exceso de oxígeno se da para asegurar que el proceso de oxidación se realiza de manera completa. Como resultado de la combustión se

generan los gases de combustión y residuos sólidos (escorias). La eficiencia térmica de la incineración es de alrededor del 80%. El vapor procedente de la combustión alimenta a una turbina de gas para la transformación de la energía térmica en eléctrica. La eficiencia de este proceso es mucho menor, debido a las pérdidas energéticas. [32]

5.4.6 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO

La elección del tipo de aprovechamiento energético que se puede considerar va ligada a condiciones del terreno y área del relleno sanitario, la tasa de producción de biogás disponible y condiciones específicas que puedes favorecer el proyecto, algunos factores como: [26]

- Normas y regulaciones locales
- Cantidad, calidad y duración de la recuperación de biogás
- Costos de inversión y operación, incluyendo costos de transporte
- Disponibilidad de provisión de equipos o tecnologías
- Precios de mercado para productos finales.

Un aspecto clave para el éxito de la elección de una tecnología de aprovechamiento es determinar el tamaño óptimo del proyecto de biogás. Esto es fundamental y requiere un cuidadoso balance entre la máxima capacidad de utilización del biogás y su tasa de extracción. A partir de los criterios anteriores, se debe seleccionar una tecnología de aprovechamiento a partir de las cuatro tecnologías seleccionadas: [26] Anexo B.

1. Motores de combustión interna
2. Microturbinas
3. Calderas para uso directo del biogás en calefacción mediante suministro de agua caliente o vapor.
4. Evaporación de lixiviados

5.4.7 CICLO RANKINE

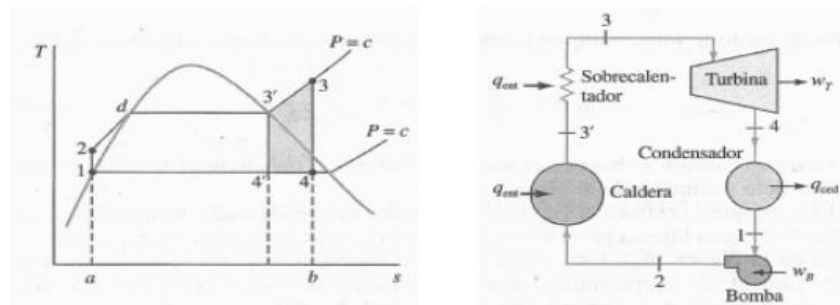
El ciclo Rankine es una modificación del ciclo Carnot, esto con el fin de mejorar el sistema térmico corrigiendo los problemas que este produce, entre estas modificaciones están: [33]

- Primero en el proceso 4-1 se lleva a cabo de manera que el vapor húmedo expandido en la turbina se condensa por completo, hasta el estado líquido saturado a la presión de la salida de la turbina.
- El proceso de compresión 1-2 se realiza ahora mediante una bomba de líquido, que eleva isoentrópicamente la presión del líquido que sale del condensador hasta la presión deseada para el proceso 2-3.

- Durante el proceso 2-3 se sobrecalienta el fluido hasta una temperatura que es con frecuencia superior a la temperatura crítica. [33]

Se considera todas estas modificaciones, para lograr un modelo práctico de un ciclo de planta de potencia de vapor, estaremos en presencia del Ciclo Rankine, a continuación, se realizará una descripción de los componentes del ciclo y el comportamiento termodinámico registrado en el diagrama Ts. [33]

Figura 2. Ciclo Rankine.



Fuente: [33]

El sistema que funciona según este ciclo consta de una caldera, donde el agua (que es el fluido más conveniente por ser abundante y barato) entra a la caldera en 2 como líquido y sale al estado de vapor en 3'. Después de que el vapor saturado sale de la caldera en el estado 3' pasa a través del sobre calentador recibiendo energía, incrementado la temperatura del vapor a presión constante hasta el estado 3 (vapor sobrecalentado). Luego hay una máquina de expansión (turbina) donde el vapor se expande produciendo trabajo, saliendo en el estado 4. A continuación este vapor entra a un aparato de condensación de donde sale como líquido al estado 1. Este a su vez es tomado por una bomba de inyección necesaria para vencer la presión de la caldera, que lo lleva al estado 2 donde ingresa a la caldera. [33]

5.5 ENERGÍA SOLAR

Este tipo de energía es una de las novedades tecnológicas que impacta a la sociedad a nivel mundial, ya que representa una forma fácil pero no tan económica de reemplazar las fuentes de energía convencionales. La obtención de energía eléctrica y energía calorífica proviene de combustibles fósiles, los mismos que no solo contaminan nuestra atmósfera, sino que ayudan al calentamiento global al arrojar enormes emisiones de CO_2 , representando una fuerte carga en el presupuesto destinado a la obtención de energía. [18]

5.5.1 PANEL SOLAR - MÓDULO FOTOVOLTAICO

El módulo está formado por células conectadas en serie, muchos son de 36, que hacen una tensión aproximada de 18-21 voltios (0,5-0,6 V cada célula), también hay módulos de 60 células que están compuestas por algunos elementos químicos tales como el silicio cristalino y arseniuro de galio, que ayudan a transformar la energía calorífica emanada por el sol en energía eléctrica a niveles de tensión continua que marcarán los niveles de tensión que trabajarán los paneles solares. (6V, 12V, 24V). El encapsulante que es un químico que ayuda a la célula solar preservar su funcionamiento y evitar su deterioro, puesto que la protege de las inclemencias de la naturaleza como el sol, la lluvia y el polvo. [18]

5.5.2 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO/BATERÍAS

Las baterías dan una energía constante, aunque los paneles capten a intervalos. Pueden suministrar una potencia más alta, como en el arranque de fluorescentes o motores. La capacidad dependerá de la radiación solar; las baterías más utilizadas son las estacionarias o de ciclo profundo. La mayoría de Plomo-Ácido, ya que las de Níquel o Litio son más caras. [18] Como desventajas podemos decir que:

- Aumentan los costos
- Mantenimiento
- E instalación más compleja

5.5.3 REGULADOR DE CARGA

Este elemento permite proteger a la batería en caso de sobrecarga o descargas, protegiéndola y evitando averías. El regulador monitorea constantemente la tensión de la batería o del banco de baterías y cuando la misma se encuentra cargada interrumpe el proceso de carga abriendo el circuito entre los paneles y la batería, entonces cuando el sistema comienza a ser utilizado y las baterías inician la descarga el regulador nuevamente conecta el sistema. [18]

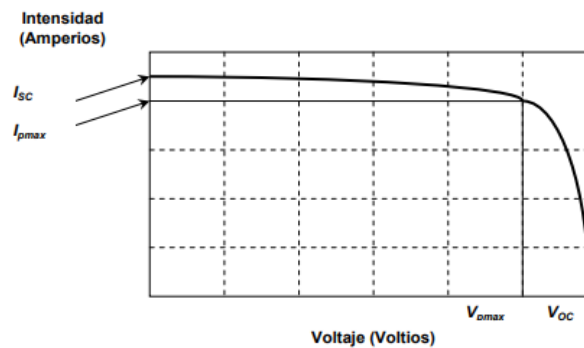
5.5.4 INVERSOR

La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua desde los paneles solares, a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador. Específicamente los inversores están diseñados para instalaciones aisladas, sin conexión a la red y entregan la electricidad en corriente alterna al voltaje y frecuencias en que operan normalmente los equipos eléctricos y electrónicos. [18]

5.5.5 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.

Las características eléctricas de un módulo fotovoltaico vienen definidas por su curva I-V, que se define en condiciones estándar de medida: distribución espectral de la radiación incidente, nivel de radiación de 1000 W/m² y temperatura de 25 °C. [19]

Gráfica 1. Intensidad Vs Voltaje de panel solar



Fuente: [19]

Los parámetros eléctricos más importantes, que también pueden aplicarse al estudio de las células fotovoltaicas individualmente, son:

- **INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO, I_{SC} :** Es la intensidad de corriente eléctrica que circula por el panel cuando se cortocircuitan los terminales ($V=0$). Puede ser medida directamente con un amperímetro conectado a la salida del panel solar. [19]
- **TENSIÓN EN CIRCUITO ABIERTO, V_{OC} :** Constituye la máxima tensión que puede obtenerse del panel cuando no hay ningún consumo y la intensidad que circula es nula ($I=0$). Para medirla se debe conectar un voltímetro entre los bornes. [19]
- **POTENCIA PICO, P_{max} :** Es la potencia eléctrica máxima que puede suministrar el panel y se define por el punto de la curva donde el producto de la intensidad por la tensión es máximo. Se observa que tanto en cortocircuito como en circuito abierto la potencia generada es nula. Los valores de la corriente y la tensión que corresponden al punto de potencia pico se conocen con el nombre de corriente en el punto de máxima potencia (I_{p_max}) y tensión en el punto de máxima potencia (V_{p_max}), respectivamente. Su expresión matemática sería la siguiente: [19]

$$P_{max} = I_{p_{max}} * V_{p_{max}} \quad (1)$$

- **FACTOR DE FORMA, FF:** Es un indicador de la calidad de la célula. Se expresa con la ecuación: [19]

$$FF = \frac{I_{p_{max}} * V_{p_{max}}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (2)$$

- **EFICIENCIA, η :** Se define como el cociente entre la potencia eléctrica máxima que puede ser suministrada a una carga y la potencia de la radiación solar incidente de valor IS (irradiancia) por S (superficie del panel). La fórmula que expresa el valor de la eficiencia es la siguiente: [19]

$$\eta = \frac{P_{max}}{I_S * S} \quad (3)$$

En la práctica, los paneles no operan bajo condiciones de certificación estándar, por lo que hay que considerar los efectos de ciertos factores sobre los parámetros característicos. [19]

6. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el desarrollo del presente trabajo, se enmarca en el cumplimiento de los objetivos planteados, a través de las siguientes fases:

- I. Fase de caracterización de potencial de vectores de generación a partir de energía renovable.

Para iniciar el proyecto realizará dos actividades principales que son:

- a. Encontrar la viabilidad de 2 tipos de energías renovables potenciales para desarrollar como parte de la oferta de una futura y cercana generación distribuida.
 - b. Estimar la energía disponible con base en la materia prima de gas y radiación por metro cuadrado, para el entorno del relleno sanitario de “El Carrasco”.
- II. Fase de identificación de capacidades energética en el relleno sanitario el carrasco.

En esta fase se determinará la capacidad energética de los dos mecanismos de energía alternativa y su posible transferencia a la red eléctrica convencional.

- III. Fase de evaluación del costo beneficio para implementar la generación distribuida en el sector de “El carrasco”.

En esta última etapa se desarrollará un estudio del costo beneficio para implementar la generación distribuida en el sector de “El carrasco”, con base en lo estipulado en las anteriores etapas del proyecto.

7. EL CASO DEL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO EN BUCARAMANGA SANTANDER

7.1 LOCALIZACION

El relleno sanitario El Carrasco, está ubicado en la parte sur-occidental de la ciudad de Bucaramanga, en una depresión o cañada natural dentro de los depósitos aluviales de la terraza de Bucaramanga, en el sector central de la zona del Distrito de Manejo Integrado (DMI) de la Corporación de la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB) en Malpaso, limitando con el barrio El Porvenir hacia el oriente, se tiene un acceso a la zona sobre la margen derecha de la carretera que conduce de Girón a Bucaramanga, aproximadamente a quince minutos en automóvil, tomando el carreteable al oriente de las instalaciones del centro de ferias de Bucaramanga (Cenfer). [34]

Figura 3. Ubicación relleno sanitario el carrasco



Fuente: [34]

7.2 SITUACIÓN ACTUAL DEL CARRASCO

La historia de El Carrasco, que es el relleno sanitario del Área Metropolitana de Bucaramanga, se remonta a 1978, cuando se estableció como botadero a cielo abierto, desde entonces ha sido utilizado como sitio para disponer los residuos sólidos que se generan en la región, causando problemas de tipo ambiental, social y jurídico. [35]

Desde sus inicios este sitio ha tenido diferentes inconvenientes de tipo técnico y legislativo, pues no ha cumplido con las obligaciones requeridas por las autoridades ambientales competentes, convirtiéndolo de acuerdo con el SIU (Sistema Único de Información de Residuos Sólidos) en uno de los puntos de disposición más críticos del país. Debe anotarse que El Carrasco ya cumplió su ciclo de vida y a pesar de ello sigue funcionando aún bajo la declaratoria de una emergencia sanitaria. [35]

7.3 DISTRIBUCION DE LAS ZONAS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS EN EL CARRASCO

El relleno sanitario el Carrasco está dividido en tres cárcavas las cuales se describen a continuación

1. **CÁRCAVA I:** Está compuesta por la zona 1 (clausurada) y la zona 2 que es el sitio donde se dispone y opera actualmente tiene un área de 7 ha aproximadamente, esta zona cuenta con un volumen de disponibilidad de 667,000 m³ para disponer residuos en forma escalonada. [35]
2. **CÁRCAVA II:** Esta cárcava fue el sitio donde se ubican los residuos desde 1978 hasta 1985, conocido en su momento como botadero a cielo abierto Malpaso. En dicha zona se dispusieron más de 500,000 t de desechos provenientes de Bucaramanga y su área metropolitana. [35]
3. **CÁRCAVA III:** Se encuentra localizada al suroccidente del predio, con un área aproximada de 12 ha que se extienden en sentido oriente-occidente, con una altura que va desde los 770 msnm a los 830 msnm. Actualmente no se ha realizado ningún tipo de intervención encontrándose cubierta por vegetación natural. [35]

Figura 4. Localización.



Fuente: [36]

7.4 PROBLEMÁTICAS AMBIENTALES DEL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO

- 1. RECURSO AIRE:** Existen serias afectaciones debido a la generación de olores ofensivos por las deficiencias en las labores de cobertura diaria de los residuos, lixiviados generados y vertidos a las fuentes hídricas aledañas al sector, y lixiviados almacenados. Los gases emitidos comprenden compuestos nitrogenados y sulfurados (NH_3 , N_3 , H_2S) dióxidos de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4) en mayor proporción. [35]
- 2. RECURSO AGUA:** Un estudio determinó la presencia de acuíferos en la zona. Se hace imprescindible entonces contar con un sistema de piezómetros y realizar el respectivo seguimiento a los mismos para lograr cuantificar la afectación al agua subterránea. [35]
- 3. RECURSO SUELO:** Se han presentado problemáticas por agrietamiento y fractura de taludes, asentamiento diferencial por extracción de lixiviados y el acomodamiento de los materiales o el proceso de drenaje de las lagunas de lixiviados. [35]

7.5 INFORMACION TECNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS QUE INGRESAN EN EL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO

Para los cálculos de este proyecto, se tomaron como referencia los datos de la cantidad de residuos depositados mes a mes durante el año 2020 en el relleno sanitario “El Carrasco” en la ciudad de Bucaramanga, según informe realizado por Intermis ingeniería SAS.

Tabla 5. Cantidad de residuos depositados durante el 2020.

CONCEPTO	TON DISPUESTAS EN CELDA	TON DISPUESTAS EN ESCOMBRERA	TON GENERADAS
ENERO	31412,25	342,23	31754,48
FEBRERO	29296,67	464,99	29761,66
MARZO	29347,77	454,86	29802,63
ABRIL	24233,25	576,56	24809,81
MAYO	27183,02	729,66	27912,68
JUNIO	28963,44	851,18	29814,62
JULIO	30671,91	869,04	31540,95
AGOSTO	30068,77	570,72	30639,49
SEPTIEMBRE	30383,43	838,73	31222,16
OCTUBRE	30031,82	1279,42	31311,24

NOVIEMBRE	30279,65	1320,18	31599,83
TOTAL	321871,98	8297,57	330169,55

Fuente: [37]

7.5.1 PRODUCCION PER CAPITA

La Producción Per Cápita es la cantidad de residuos sólidos generada por un habitante en un día, expresada en Kilogramos / habitante / día (Kg/habitante-día) y para este caso ha sido calculado a partir de la relación existente entre la producción por usuario (*PPU*) anual y el número total de habitantes del municipio de Bucaramanga. En la tabla 6 podemos observar la producción per cápita 2008-2019.

Tabla 6. Producción per cápita de residuos sólidos por usuario de 2008-2019.

AÑO	Variable (fuente) total residuos sólidos Ton (EMAB) Población Urbana		RSPC
	TONELADAS	POBLACION	
2008	158005	514553	0,84
2009	156505	515994	0,83
2010	175084	517286	0,93
2011	184036	518471	0,97
2012	169010	519516	0,89
2013	186563	520344	0,98
2014	194482	521024	1,02
2015	196569	521520	1,03
2016	196812	521946	1,03
2017	198066	522224	1,04
2018	200250	528610	1,04
2019	359729,54	528855	1,86

Fuente: [37]

7.5.2 CARACTERIZACION DE RESIDUOS

Un aspecto importante a tener en cuenta, es la determinación de la composición física típica de los residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario “El Carrasco”, con el fin de conocer la cantidad de materia apta para la implementación de una nueva fuente de energía alterna (Biogás). A continuación, se caracteriza la variedad de desechos sólidos generados:

Tabla 7. Caracterización de los desechos sólidos generados.

	%
RESIDUOS CON CARACTERISTICAS FISICAS DE BIOTRANSFORMACION	
Residuos de comida	50,30%
Papel y cartón sucios o pequeños	0,20%
Maderas forestales, aserrín	7,80%
Carbón, cenizas y escorias	2,50%
Pañales desechables, toallas higiénicas, etc.	2,90%
Hueso, vísceras, cueros	0%
RESIDUOS CON CARACTERISTICAS FISICAS DE RECICLAJE	
Envases plásticos	2,30%
Plásticos laminados	4,00%
Plásticos expandidos desechables	0,50%
Cartón y papel	4,10%
Textiles	2,10%
Vidrio	1,30%
Zapatos	1,50%
Metales ferrosos y chatarras	0,70%
Aluminio	0,10%
RESIDUOS CON CARACTERISTICAS FISICAS PARA DISPOSICION DIRECTA	
Llantas, cauchos	1,40%
Especiales, baterías, teléfonos, Etc.	0,10%
Plásticos no reciclables	0,90%
Papel pequeño sucio	3,10%
Textiles no reciclables	3,60%
Cueros industriales	4,20%
Plásticos expandidos desechables	0,10%
Otros	1,50%
RESIDUOS CON CARACTERISTICAS FISICAS DE ESCOMBRERA	
Escombros	4,30%
RESIDUOS CON CARACTERISTICAS FISICAS DE INCINERACION	

Otros, hospitalarios	0,20%
Patógenos, hospitalarios	0,10%
TOTAL	100%
Alcaldía de Bucaramanga (2016-2027)	

Fuente: [38]

7.5.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA

La composición química es un parámetro significativo al momento de analizar la descomposición del elemento orgánico constituyente de los residuos sólidos. Específicamente diríamos que la humedad que contienen los residuos sólidos que ingresan al carrasco influyen en la descomposición de los residuos con propiedades de biotransformación. En la tabla 8, se indica la composición química de los residuos sólidos del Área Metropolitana de Bucaramanga, tomada de un artículo realizado por la empresa de aseo de Bucaramanga.

Tabla 8. Composición química de los residuos sólidos.

PARAMETRO	RANGO DE OSCILACION	
	Mínimo	Máximo
Humedad	63,3	78,7
Nitrógeno total	1,1	2
Cenizas	9	29,1
Carbono	39,4	50,6
Relación C/N	22,7	46
Fosforo	0,45	3
Potasio	1,2	2
pH Suspensión 1:2	5,4	6
Capacidad calorífica	3011	3924

Fuente: [6]

7.5.4 POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE BIOGÁS

La Simulación del potencial de recuperación de biogás tomada por el SCS Engineers, actualmente realizada sobre los índices de recuperación de biogás y la potencia a datos futuros. A continuación, se muestran los resultados:

Tabla 9. Simulación de potencial de recuperación de biogás por SCS Engineers.

SIMULACIÓN DE POTENCIAL DE RECUPERACIÓN DE BIOGÁS POR SCS ENGINEERS			
AÑO	índices de R recuperación de potencial de biogás (m3/h)	Cobertura del sistema estimada (%)	índices de recuperación actual de biogás (m3/h)
2013	1095	80	876
2014	935	80	748
2015	811	80	648,8
2016	713	80	570,4
2017	635	80	508
2018	574	80	459,2
2019	525	80	420

Fuente: [39]

7.5.5 METEOROLOGÍA DE LA ZONA

Monitoreo de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y amoníaco (NH₃) en el área de influencia del sitio de disposición final El Carrasco, ubicado en el municipio de Girón en el departamento de Santander, para la Empresa de Aseo de Bucaramanga S.A E.S.P. Bucaramanga.

Tabla 10. Parámetros meteorológicos.

PARAMETROS METEOROLOGICOS					
PARAMETRO	TEMPERATURA (°C)	PRESION BAROMETRICA (mmHg)	PRECIPITACION (MM)	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	HUMEDAD (%)
Promedio	24	685,8	33,3	0,1	84,2
Máximo	25,1	686,7	25,9	0,3	87,9
Mínimo	22,4	684,8	0	0	79,9

Fuente: [6]

7.5.6 SITUACIÓN SOCIOECONÓMICA

A continuación, se muestra el crecimiento poblacional de cada municipio desde el 2010 – 2020, según estadísticas tomadas del DANE donde se puede evidenciar el crecimiento exponencial de la población siendo un factor significativo en la sobreproducción de residuos

Tabla 11. Crecimiento poblacional 2010-2020 DANE.

CRECIMIENTO POBLACIONAL	
AÑO	POBLACION
2010	1199092
2011	1209244
2012	1219359
2013	1229322
2014	1239246
2015	1249103
2016	1258968
2017	1268783
2018	1278564
2019	1288338
2020	1298035

Fuente: [40]

8. ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE BIOGÁS

8.1 IPCC

Este modelo está basado en la población y en la cantidad de materia orgánica degradable existente en los residuos. El modelo del IPCC también ofrece la posibilidad de utilizar los datos propios sobre la composición de residuos, siempre que sea adecuado. Este modelo puede aplicarse en todo el mundo, ya que tiene en cuenta las condiciones climáticas. [41]

$$Q = \left(MSW_T * MSW_F * MCF * DOC * DOC_F * F * \frac{16}{12} R \right) * (1 - OX) \quad (4)$$

Donde:

- Q : Emisiones de metano ($Gg CH_4/año$)
- MSW_T : Residuos totales generados en base a la población ($Ton RSU/año$)
- MSW_F : Fracción de residuos depositados en el vertedero
- MCF : Fracción de corrección del metano
- DOC : Carbono orgánico que se degrada ($kg C/kg RSU$)
- DOC_F : Fracción de DOC que realmente se degrada
- F : Fracción de metano presente en el biogás (0,5)
- $\frac{16}{12}$: Conversión de C a CH_4
- R : Metano recuperado ($Gg CH_4/año$)
- OX : Factor de oxidación (0)

8.2 SWANA

Según el SWANA la composición de los residuos y la edad de los mismos no tiene efecto en la generación de biogás. El modelo de orden cero supone que durante el periodo en el que los residuos generan biogás (15-25 años) lo hacen de forma constante, por lo que la cantidad de biogás generado dependerá únicamente de la cantidad de residuos depositados. para calcular la generación de metano en vertederos. [41]

$$Q = \frac{M * Lo}{t_0 - t_1}, \quad \text{para } t_0 < t < t_1 \quad (5)$$

- Q : Generación de metano ($m^3/año$)
- W : Cantidad de residuos depositados (Ton)
- Lo : Potencial de generación de metano (m^3/Ton)
- t : Tiempo (años)
- t_0 : Tiempo de desfase (años)

- t_1 : Tiempo de cese de generación (años)

8.3 LandGem (MODELO COLOMBIANO)

Es un modelo que se basa en una ecuación de descomposición de primer orden que cuantifica las emisiones provenientes de la descomposición de los residuos depositados en los vertederos. [42] Este modelo no ofrece la posibilidad de adaptar el potencial de generación de metano a la composición de los residuos. Además, considera que la vida media de los residuos es elevada, lo que conlleva una estimación relativamente baja de los gases de vertedero durante el periodo de explotación y justo tras este. [42]

$$QCH_4 = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=0,1}^1 k * Lo * \left(\frac{Mi}{10} \right) * e^{-ktij} * (MCF) * (F) \right) \quad (6)$$

Donde:

- QCH_4 : Generación anual de metano en el año calculado ($m^3/año$)
- Mi : Índice de disposición de residuos ($Mg/año$)
- Lo : Potencial de la generación de metano (m^3 /Mg)
- k : Constante del índice de generación de metano ($1/año$)
- n : (año calculado) – (año inicial de aceptación de los residuos)
- i : 1 incremento del año
- j : 0,1 incremento del año
- tij : Año de la j sección de residuos aceptados en el i año
- MCF : Factor de corrección de metano
- F : Factor de ajuste por incendios

8.4 MODELO MEXICANO

El modelo asume que el período es de un año desde la colocación de los residuos y el comienzo de la generación de biogás, además que, por cada unidad de residuos, después de un año la generación disminuye exponencialmente mientras la fracción orgánica de los residuos es consumida. [43]

$$Q_{LFC} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=0,1}^1 2 * k * Lo * \left(\frac{Mi}{10} \right) * e^{-ktij} * (MCF) * (F) \right) \quad (7)$$

Donde:

- : Flujo de biogás ($m^3/año$)
- Mi : Masa de disposición de residuos en el año ($Mg/año$)
- Lo : Generación potencial de metano (m^3 /Ton)
- k : Índice de generación de metano ($1/año$)

- n : Es la edad de los residuos
- i : 1 incremento del año
- j : Es la sección del relleno
- t_{ij} : Edad de los residuos dispuestos
- MCF : Factor de corrección de metano
- F : Factor de ajuste por incendios

8.5 MODELO ECUATORIANO

El modelo ecuatoriano de biogás provee una herramienta automática para estimar la generación y recuperación de biogás en sitios de disposición final en Ecuador. El biogás es generado por la descomposición de desechos sólidos en un sitio de disposición final, y puede ser recuperado bajo la operación de un sistema de captación de biogás construido en el sitio. [44]

$$Q = \sum_0^n \frac{1}{\%vol} * k * M * L_0 * e^{-k(t-t_{lag})} \quad (8)$$

Donde:

- Q : Cantidad total de biogás generado en m^3
- n : Número total de años modelados
- t : Tiempo en años desde que los desechos fueron depositados
- t_{lag} : Tiempo estimado entre la disposición de desechos y la generación de metano
- $\%vol$: Porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás
- L_0 : Volumen estimado de metano generado por tonelada de desecho solido
- k : Tasa estimada de decaimiento de desecho orgánico
- M : Masa de desechos colocados en el lugar en el año t en toneladas

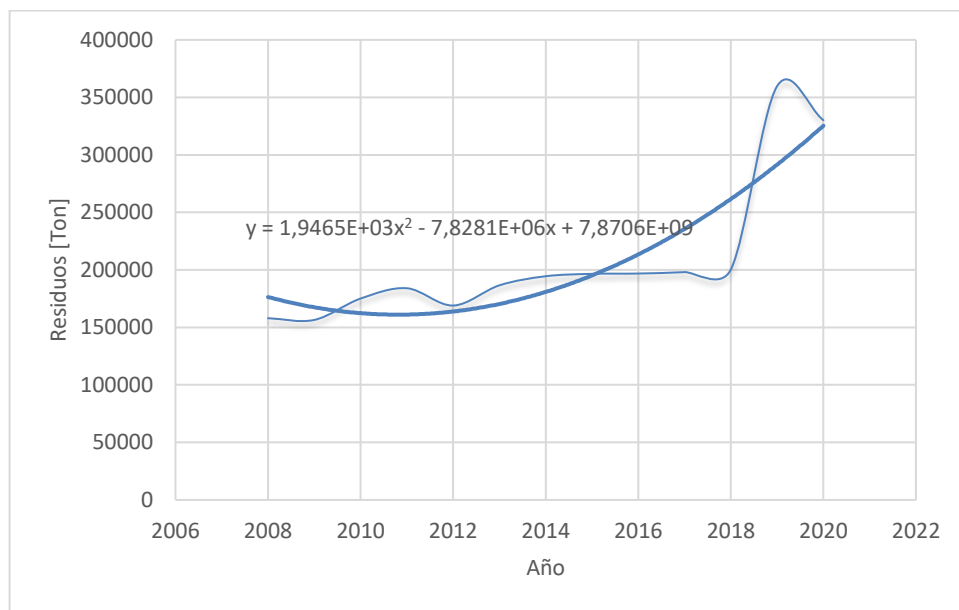
9. GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGAS

9.1 PRODUCCIÓN DE METANO EN EL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO

A continuación, se presenta la proyección de producción de metano en el relleno sanitario El Carrasco ubicado en la ciudad de Bucaramanga, para lo cual se contempló la disposición de residuos desde el año 2008 al 2020.

A partir de la información anterior, se determinó el comportamiento esperado en torno a la generación de los residuos, considerando así mismo que la vida útil del relleno es hasta el año 2022, momento a partir del cual se espera un descenso en la producción de metano y por ende en la capacidad productiva de energía a partir de la biomasa.

Gráfica 2. Proyección de generación de residuos relleno sanitario El Carrasco



Fuente: Autores

En función a lo dispuesto en la gráfica 2, se tiene una proyección de recepción de residuos sólidos de alrededor de 374.307 toneladas para el año 2021 y de 415.906 toneladas para el 2022. Así mismo, debe resaltarse que la capacidad de producción de biogás dependerá de las características de los residuos, hecho por el cual es fundamental conocer el porcentaje de cada uno de estos, los cuales son dispuestos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** tabla 12, en donde A corresponde a Papel, Cartón y Textiles; B los desechos de jardín y desechos

orgánicos putrescibles (excepto alimentos); C a residuos de alimentos y D a residuos de madera y paja.

Tabla 12. Clasificación de proyección del tipo de residuo en El Carrasco

Año	RSS [Ton]	RESIDUO [Ton]			
		A	B	C	D
2008	158005	316,01	4582,145	79476,515	12324,39
2009	156505	313,01	4538,645	78722,015	12207,39
2010	175084	350,168	5077,436	88067,252	13656,552
2011	184036	368,072	5337,044	92570,108	14354,808
2012	169010	338,02	4901,29	85012,03	13182,78
2013	186563	373,126	5410,327	93841,189	14551,914
2014	194482	388,964	5639,978	97824,446	15169,596
2015	196569	393,138	5700,501	98874,207	15332,382
2016	196812	393,624	5707,548	98996,436	15351,336
2017	198066	396,132	5743,914	99627,198	15449,148
2018	200250	400,5	5807,25	100725,75	15619,5
2019	359730	719,45908	10432,157	180943,96	28058,904
2020	330170	660,3391	9574,917	166075,28	25753,225
2021	374307	748,613	10854,889	188276,17	29195,907
2022	415906	831,812	12061,274	209200,72	32440,668

Fuente: Autores

Una vez conocido la proyección y características de los residuos asociados con la operación del relleno sanitario El Carrasco, se procede a definir los parámetros fundamentales a considerar en el modelo de generación de metano bajo la metodología IPCC.

El Factor de Corrección del Metano (MCF) es función de las características del relleno sanitario en términos de profundidad y tipo de tratamiento dado. En el caso puntual de El Carrasco, aunque se conoce de antemano que el mismo tiene una profundidad promedio de 13 m, no se tiene mayor información respecto al tipo de gestión del mismo, por lo cual el valor del MCF se tomó como un parámetro predefinido o sin clasificación como 0,6 según el Anexo C.

En cuanto a la Fracción de Carbono Orgánico Degradable (*DOC*), su valor depende de la composición de los residuos, por lo que puede variar de ciudad en ciudad y se estima usando la ecuación.

$$DOC = 0,40 * A + 0,17 * B + 0,15 * C + 0,30 * D \quad (9)$$

Donde:

- *A*: Es el porcentaje de los residuos que corresponde al papel, cartón y los textiles
- *B*: Es el porcentaje de los residuos que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos)
- *C*: Es el porcentaje de los residuos que corresponde a los restos de alimentos
- *D*: Es el porcentaje de los residuos que corresponde a madera y paja.

A partir de la caracterización de los residuos en la tabla 13, se encontró que el valor del *DOC* es de 0,10458.

Tabla 13. Clasificación porcentual del tipo de residuo

%Residuos	
Parámetro	%
Papel, Cartón y Textiles (A)	0,002
Desechos de jardín y desechos orgánicos putrescibles (excepto alimentos) (B)	0,029
Residuos de Alimentos (C)	0,503
Residuos de Madera y Paja (D)	0,078

Fuente: Autores

En lo que respecta a la fracción de carbono orgánico degradable asimilado (DOC_F), es una porción de *DOC* que es convertida en biogás y su estimación es basada en el modelo teórico que varía solo con la temperatura en la zona anaerobia del relleno sanitario. El valor predeterminado utilizado por la IPCC es de 0,77. Para el caso de El Carrasco, se toma dicho valor preestablecido ante el desconocimiento de la temperatura anaeróbica del relleno. Debe mencionarse que el 0,77 se obtiene de suponer una temperatura de 35°C, que corresponde a la temperatura en régimen mesofílico del relleno.

$$DOC_F = 0,014 * T + 0,28 \quad (10)$$

Donde *T* es la temperatura anaeróbica del relleno, expresada en °C.

En cuanto al índice de generación del metano (*k*), estos son función específicamente de las características del sitio del emplazamiento, específicamente del tipo de clima. En el caso de la ciudad de Bucaramanga y área metropolitana, el

valor anual de las precipitaciones es de 1155 mm para el año 2019, con temperaturas promedio de 23°C, lo cual la consolida como una zona climática tropical humedad y seca.

Así mismo ante el desconocimiento de las características físico-químicas de los residuos, se procedió a tomar los valores por defecto dispuestos en el Anexo C, siendo los índices de generación del metano descrito en la tabla 14.

Tabla 14. Índices de generación del metano seleccionados

Parámetro	k
Papel, Cartón y Textiles (A)	0,07
Desechos de jardín y desechos orgánicos putrescibles (excepto alimentos) (B)	0,17
Residuos de Alimentos (C)	0,4
Residuos de Madera y Paja (D)	0,035

Fuente: [45]

A partir de la información anterior, se determina la cantidad de carbono orgánico degradable disuelto ($DDOC_m$) como:

$$DDOC_{m_o} = W * DOC * DOC_f * MCF \quad (11)$$

Donde:

- W : Es la masa de desechos depositados
- DOC : Es el carbono orgánico degradable durante el año de deposición
- DOC_f : Es la fracción del $DDOC$ que puede descomponerse
- MCF : Es el factor de corrección de CH_4 para la descomposición aeróbica durante el año de deposición.

Basado en lo anterior podemos disponer de la tabla 15.

Tabla 15. Producción de $DDOC_{mo}$ por año y tipo de residuo

Año	$DDOC_{mo}$ [Ton]			
	A	B	C	D
2008	15,2683265	221,390735	3839,98412	595,464734
2009	15,1233786	219,28899	3803,52973	589,811767
2010	16,9187031	245,321195	4255,05382	659,82942
2011	17,783752	257,864404	4472,61364	693,566329

2012	16,3317608	236,810532	4107,43784	636,938671
2013	18,0279409	261,405143	4534,02713	703,089695
2014	18,7931691	272,500951	4726,48202	732,933594
2015	18,9948399	275,425178	4777,20223	740,798755
2016	19,0183214	275,765661	4783,10784	741,714536
2017	19,1394979	277,522719	4813,58371	746,440417
2018	19,350542	280,582859	4866,66131	754,671137
2019	34,7613561	504,039664	8742,48107	1355,69289
2020	31,9049175	462,621304	8024,08676	1244,29178
2021	36,1699558	524,464359	9096,74387	1410,62827
2022	40,1897953	582,752032	10107,7335	1567,40202

Fuente: Autores

Posteriormente, se obtiene el $DDOC_m$ descompuesto en el año t como:

$$DDOC_m \text{ descompt}_T = DDOC_m_o * [e^{-k(t-1)} - e^{-k*t}] \quad (12)$$

Los valores de metano obtenido se muestran en la tabla 16, siendo estas descrito en toneladas. Para obtener los valores en término de flujo, se considera que la densidad del metano es de 0,714 kg/m³, y se calcula a partir de lo descrito en la ecuación 13.

$$CH_4 \text{ Gen} \left[\frac{m^3}{\text{Año}} \right] = DDOC_m \text{ descompt}_T * \frac{1000}{0,714} \quad (13)$$

El flujo en m³/h, se obtiene de dividir el CH_4 Generado al año entre el número de días al año por veinticuatro (365*24=8760 horas).

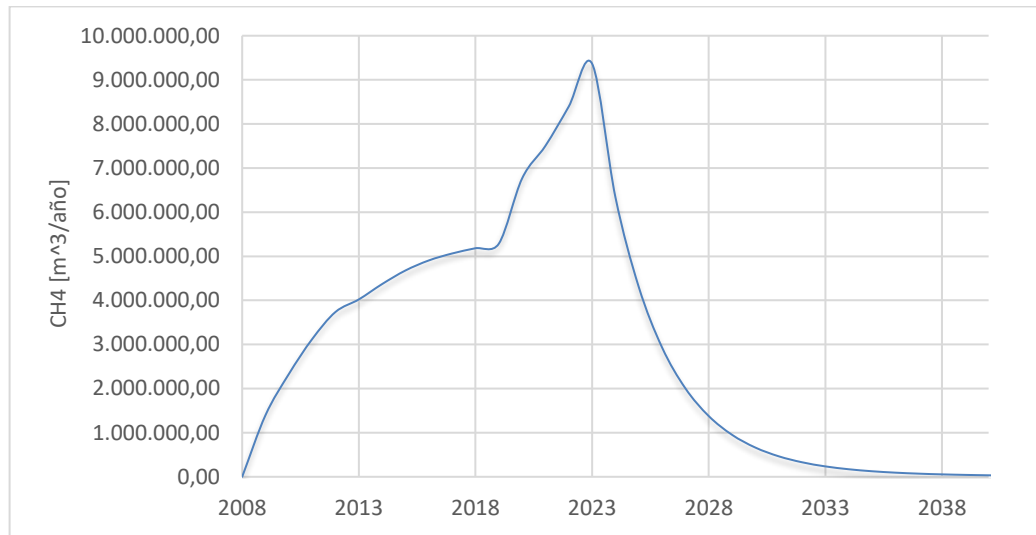
Tabla 16. Producción de metano en el relleno sanitario El Carrasco

AÑO	CH₄ GENERADO [Ton]	CH₄ GENERADO [m3/Año]	CH₄ GENERADO [m3/h]
2008	0	0,00	0,00
2009	998,6146455	1.398.619,95	159,66
2010	1662,705965	2.328.719,84	265,84
2011	2228,784621	3.121.547,09	356,34
2012	2668,278033	3.737.084,08	426,61
2013	2871,085675	4.021.128,40	459,03
2014	3120,264073	4.370.117,75	498,87

2015	3339,755972	4.677.529,37	533,96
2016	3502,335365	4.905.231,60	559,96
2017	3614,826501	5.062.782,21	577,94
2018	3699,842775	5.181.852,63	591,54
2019	3772,1016	5.283.055,46	603,09
2020	4829,779401	6.764.396,92	772,19
2021	5357,271535	7.503.181,42	856,53
2022	5993,555545	8.394.335,50	958,26
2023	6687,331837	9.366.010,98	1.069,18
2024	4528,590296	6.342.563,44	724,04
2025	3074,610193	4.306.176,74	491,57
2026	2094,112729	2.932.930,99	334,81
2027	1431,901431	2.005.464,19	228,93
2028	983,8051554	1.377.878,37	157,29
2029	679,8778504	952.209,87	108,70
2030	473,1336154	662.652,12	75,65
2031	331,9927183	464.975,80	53,08
2032	235,2155866	329.433,59	37,61
2033	168,5049162	236.001,28	26,94
2034	122,2262734	171.185,26	19,54
2035	89,87871317	125.880,55	14,37
2036	67,06837665	93.933,30	10,72
2037	50,8194367	71.175,68	8,13
2038	39,1113368	54.777,78	6,25
2039	30,56785525	42.812,12	4,89
2040	24,24805611	33.960,86	3,88
2041	19,50563392	27.318,82	3,12
2042	15,89418636	22.260,77	2,54
2043	13,10334226	18.352,02	2,09
2044	10,91563111	15.288,00	1,75
2045	9,177305186	12.853,37	1,47
2046	7,778556054	10.894,34	1,24
2047	6,64006325	9.299,81	1,06
2048	5,703817269	7.988,54	0,91
2049	4,926832626	6.900,33	0,79
2050	4,276819284	5.989,94	0,68

Fuente: Autores.

Gráfica 3. Comportamiento de producción de metano en el relleno sanitario El Carrasco



Fuente: Autores

De acuerdo con [46], la extensión del relleno sanitario El Carrasco es de aproximadamente 93 ha, de los cuales alrededor en 36 ha se ha dispuesto alrededor de 3.200.000 toneladas de residuos. Por ende y considerando que se disponen de 2.8 pozos por hectárea, es necesario el uso de 100 pozos verticales.

Para determinar el biogás extraído por cada pozo se contempla el método del cilindro en el que se considera que el volumen de influencia de un pozo es un cilindro definido por el radio de influencia escogido y la profundidad del pozo. Este método contempla que todo el biogás que se genera en el cilindro se extrae del pozo sin fugas a la atmósfera.

El flujo del biogás de cada pozo se obtiene como:

$$Q = \pi * (R^2 - r^2) * t * \rho * G \quad (14)$$

Donde:

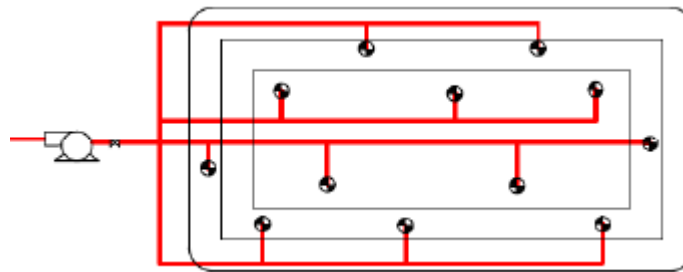
- Q: Es el flujo de biogás del pozo
- R: Es el radio de influencia
- r: Es el radio del pozo de extracción
- ρ: Es la densidad del residuo
- G: Es la generación de biogás por unidad de residuos.

Ahora, así mismo y ante desconocimiento de algunos de los parámetros, los valores típicos de extracción de los pozos verticales oscilan entre los 15 ft³/min a 45 ft³/min.

Para el caso del presente proyecto se considera que los pozos verticales proveen un valor promedio de 30 ft³/min.

En lo que respecta a la distribución de los ductos, se propende el uso de sistemas ramificados múltiples, que consiste en conexiones laterales individuales para cada pozo, que conducen el biogás a ductos principales conectados directamente al sistema de extracción. Son usados principalmente en rellenos sanitarios pequeños y su ventaja radica en el uso mínimo del largo de tuberías.

Figura 5. Pozos con conexión ramificada múltiple



Fuente: [47]

Sumado a lo anterior, debe considerarse que el diseño del sistema de ductos colectores debe contar con puntos de monitoreo de gas, prevenir el taponamiento del flujo y estar aislado en segmentos, de forma que se pueda intervenir el sistema. Sumado a ello, se recomiendan que los ductos tengan al menos una inclinación del 5% que posibilita el flujo condensado al interior de las tuberías.

Así mismo, cada pozo es conectado a un manifold que se compone de una válvula de regulación para el flujo de salida, que permite un rápido y fácil control de la succión y flujo de biogás, teniendo la posibilidad de aislar el sistema de ductos colectores en secciones.

Los ductos anteriormente descritos se disponen sobre el suelo, lo cual representan ventajas como el bajo costo de instalación, es más fácil de inspeccionar, mantener y reparar y es sencillo su expansión. La principal desventaja recae en que se encuentran más expuestos a la degradación y reduce el acceso vehicular.

Para la selección de los diámetros de los ductos, la práctica sugiere los siguientes valores:

- 50 mm a 100 mm de diámetro nominal para ductos laterales de pozos individuales.
- 300 mm de diámetro nominal para los ductos que agrupan varios pozos.
- Más de 450 mm de diámetro nominal para los ductos principales o anillos.

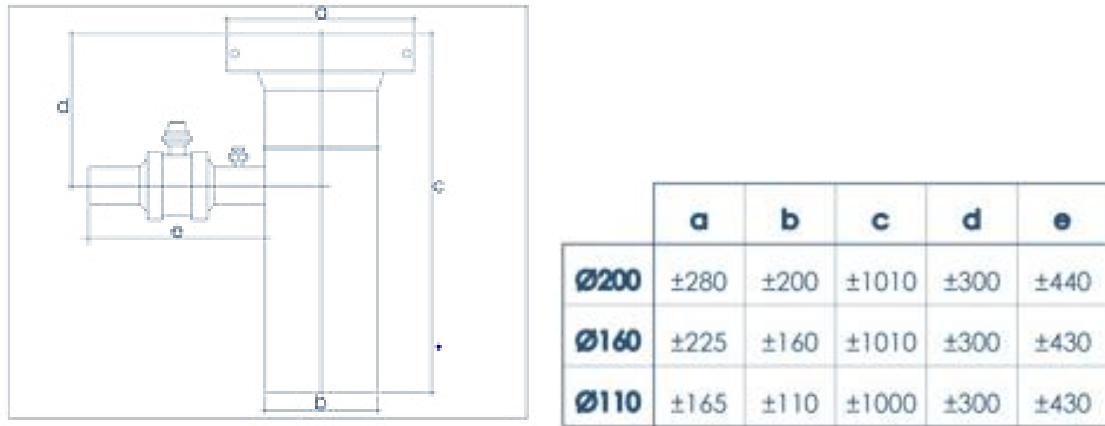
9.2 SELECCIÓN DE EQUIPAMIENTO PARA LA GENERACIÓN DE BIOGAS

A continuación, se hace una descripción del equipamiento necesario para la implementación de la planta generadora de biogás en el relleno sanitario El Carrasco, para lo cual se consideraron una serie de lineamientos en función de la revisión bibliográfica.

- Los diámetros de perforación de los pozos son de 250 mm.
- El diámetro de la tubería colectora de los pozos es de 110 mm y su material es de HDPE.
- La profundidad de perforación es de 10 m y se asegura una distancia de 3 m del final de la perforación a la base del relleno.
- La primera perforación de la tubería se da a 3 m de la superficie, con el fin de evitar la probabilidad de ingreso de aire al interior del relleno sanitario. En total se realizan tres perforaciones a lo largo de la profundidad del pozo, equiespaciados (3 m; 6 m y 9 m).
- La región perforada tiene un diámetro de 15 mm.
- Se utiliza sello de bentonita con una longitud de 300 mm.
- A partir de los 5 m en la región perforada se usa grava como material de relleno con una granulometría de 25 mm.
- Se dispone de 2.8 pozos por hectárea del relleno sanitario para un total de 100 pozos.
- Se establece que el diámetro nominal de los ductos de los pozos individuales a la salida del cabezal del pozo es de 100 mm.
- El diámetro nominal para los ductos que agrupan varios pozos es de 300 mm (unificando máximo 12 pozos).
- El diámetro de nominal para el ducto principal es de 450 mm.
- La distancia entre pozos es de 26.8 m.

En función a lo dispuesto anteriormente, se establece que el cabezal para pozo de captación de biogás de un diámetro “b” de 110 mm y las dimensiones descritas a continuación.

Figura 6. Características del cabezal de pozo

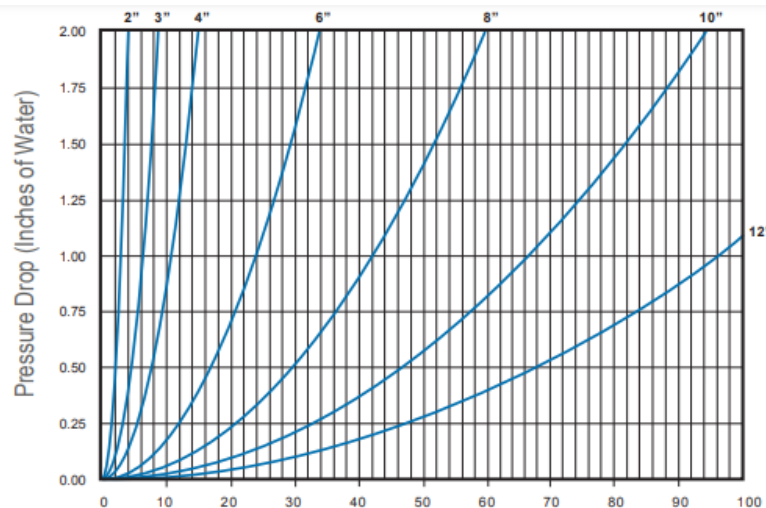


Fuente: Anexo D.

Basado en los elementos del Anexo D, se establece que se cuentan con siete agrupaciones de pozos verticales (cada uno compuesto por 12 pozos) y dos agrupaciones con ocho pozos verticales.

Considerando que el flujo máximo de metano es de 37757,72 ft³/h, se establece que la trampa de condensación es de un tamaño de 12 pulgadas, la cual genera una caída en la presión por debajo de 0.25 pulgadas de agua.

Gráfica 4. Comportamiento de la caída de presión de acuerdo a las características de la trampa de condensación



Fuente: Anexo E.

En lo que respecta al soplador, se escoge un soplador centrífugo de lóbulos, el cual maneja caudales típicos de 1000 m³/h y genera un aumento de la presión de 1.500 mbar, valores consecuentes con el flujo máximo generado por el relleno que es de 1.069 m³/h. Este tipo de equipos es adecuado para impulsar el biogás para equipos de generación eléctrica, aunque tiene la desventaja que no admite humedad en el gas.

Respecto a los sopladores centrífugos de una o dos etapas que manejan un mayor caudal, el soplador de lóbulos provee un mayor aumento en la presión, esencial para los propósitos de generación de electricidad. Así mismo y en comparación con los compresores, el costo de operación y de mantenimiento son menores.

Bajo los parámetros anteriores y de acuerdo a fichas técnica se selecciona un soplador de tres lóbulos Robox Bio&Gas ES65, está especialmente desarrollado para el transporte y la compresión de biogás, así como de gases naturales y de vertedero, y gases especiales en aguas residuales, generación de energía y aplicaciones industriales. Tiene una capacidad de generar una presión a la salida de hasta 1000 mbar, con una generación de vacío de 500 mbar y un manejo de caudal hasta de 1070 m³/h a la salida (especificaciones Anexo F.).

En lo que respecta a la alternativa tecnológica para la generación de energía, se selecciona el uso de motores de combustión (Anexo G.), quienes generalmente tienen una capacidad de generación de 800 kW a 3 MW por motor. La selección del mismo, se hizo considerando que el flujo del gas para este tipo de tecnología debe ser mayor a 150 ft³/min a 5.000 ft³/min. En el caso puntual del relleno sanitario El Carrasco, el valor máximo es de 629 ft³/min.

Sumado a los elementos anteriormente descritos, debe considerarse que las capacidades de los motores comerciales en términos de generación dependen del flujo mismo del biogás. En dicho orden, debe mencionarse que para flujos alrededor de 204 ft³/min la capacidad de generación alcanza los 540 kW nominal, para flujos de 500 ft³/min, dicha capacidad aumenta a 1200 kW. Para el caso del flujo máximo que es de 630 ft³/min, se espera una capacidad máxima de generación de 1456 kW.

Por los motivos anteriores, se ha seleccionado el motor G3520C de Caterpillar (Anexo H.), que tiene una capacidad de generación eléctrica de hasta 1622 kW que tiene una eficiencia eléctrica de 39.8%.

Se estableció el uso de una antorcha de llama cerrada como elemento de seguridad cuando se requiera realizar el quemado del biogás y ante la inoperabilidad de la planta. Se trata de una antorcha en la que la llama se está quemando dentro de una chimenea de acero inoxidable. Se caracteriza por la presencia de una llama invisible, el encendido en dos pasos y la incineración se da a alta temperatura. Se utiliza esta tecnología cuando se requieren niveles estrictos de emisión.

9.3 CAPACIDAD DE GENERACIÓN ENERGÉTICA

Considerando lo anteriormente dispuesto, y que la capacidad de generación energética es función del flujo de biogás que llega al motor de combustión, se determina la energía que se puede obtener a través de la planta de biogás en el relleno El Carrasco.

Debe mencionarse en este punto, que la capacidad de generación energética está dada por la ecuación 15.

$$E = 2,1534 * f_{bg} + 99,858 \text{ [kW]} \quad (15)$$

De donde f_{bg} corresponde al flujo de biogás expresado en ft³/min. Los valores de generación energética son descritos en la tabla 17.

Tabla 17. Generación energética con biogás

AÑO	GENERACIÓN [kW]
2008	0,00
2009	302,22
2010	436,79
2011	551,50
2012	640,56
2013	681,66
2014	732,15
2015	776,63
2016	809,57
2017	832,37
2018	849,60
2019	864,24
2020	1078,57
2021	1185,46
2022	1314,40
2023	1454,98
2024	1017,53
2025	722,90
2026	524,21
2027	390,02
2028	299,22
2029	237,63
2030	195,73

2031	167,13
2032	147,52
2033	134,00
2034	124,63
2035	118,07
2036	113,45
2037	110,16
2038	107,78
2039	106,05
2040	104,77
2041	103,81
2042	103,08
2043	102,51
2044	102,07
2045	101,72
2046	101,43
2047	101,20
2048	101,01
2049	100,86
2050	100,72

Fuente: Autores.

Considerando que, aunque la eficiencia del motor de combustión es de 39.8%, para este ejercicio práctico se considera que de acuerdo a la bibliografía el porcentaje real de aprovechamiento oscila entre el 30% al 40%, considerando posibles pérdidas del sistema. Por ello, para calcular el valor de la generación energética por día, se utiliza la ecuación 16.

$$G_e = \frac{E * 12 * 0,3}{1000} \left[\frac{MW}{día} \right] \quad (16)$$

El factor multiplicativo se utiliza al considerar que la planta de biogás entrará a funcionar en alrededor 12 horas al día (6 p.m a 6 a.m), 0.3 es el porcentaje de eficiencia del sistema y el divisor de 1000 es usado para hacer la conversión de kW a MW.

Los valores correspondientes son descritos en la tabla 18, en el que se destaca una capacidad máxima de generación de 5,24 MWh al día en el año 2023, presentandose posteriormente una tendencia decreciente, siendo la capacidad de generación en 2050 de 0.36 MWh al día.

Tabla 18. Generación energética en MWh al día

AÑO	GENERACIÓN [MWh]
2008	0,00
2009	1,09
2010	1,57
2011	1,99
2012	2,31
2013	2,45
2014	2,64
2015	2,80
2016	2,91
2017	3,00
2018	3,06
2019	3,11
2020	3,88
2021	4,27
2022	4,73
2023	5,24
2024	3,66
2025	2,60
2026	1,89
2027	1,40
2028	1,08
2029	0,86
2030	0,70
2031	0,60
2032	0,53
2033	0,48
2034	0,45
2035	0,43
2036	0,41
2037	0,40
2038	0,39
2039	0,38
2040	0,38
2041	0,37
2042	0,37
2043	0,37

2044	0,37
2045	0,37
2046	0,37
2047	0,36
2048	0,36
2049	0,36
2050	0,36

Fuente: Autores.

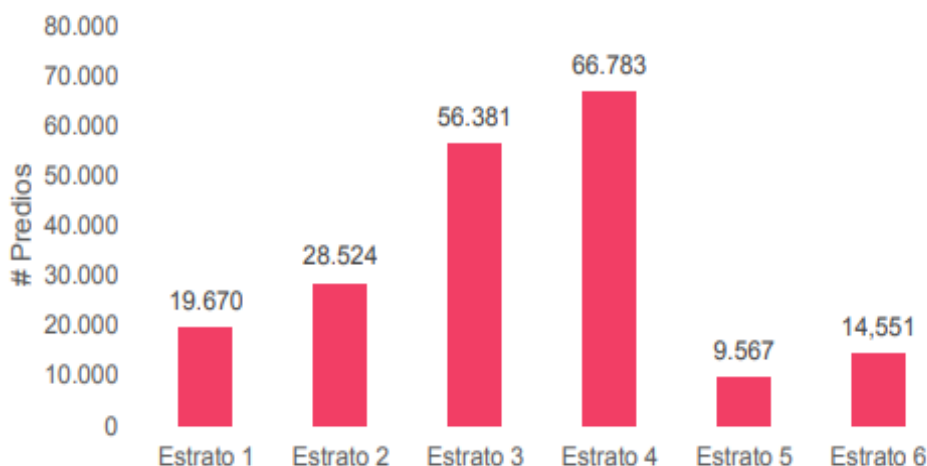
10. GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Con el fin de determinar el valor de los ingresos para suplir la energía a la red eléctrica, se debe considerar las características de consumo de la población. Contemplando que de acuerdo al Banco Mundial, el consumo per cápita anual en Colombia es de 1312,199 kWh, lo que representa un consumo per cápita de 3,595 kWh al día.

De acuerdo con el objetivo del proyecto, se busca suplir el consumo energético de los habitantes de la comuna Mutis de la ciudad de Bucaramanga, en la cual existe alrededor de 30344 habitantes que representa un consumo anual de 39817,366 MWh.

En lo que respecta a las características sociodemográficas de los usuarios conectados a la red eléctrica provista por ESSA, el 10% corresponden a usuarios de estrato 1, el 15% estrato 2, el 29% a estrato 3, el 34% a estrato 4, el 5% a estrato 5 y el 7% a estrato 6 (ver figura 7.)

Figura 7. Estratificación urbana en Bucaramanga



Fuente: [48]

Así mismo, debe contemplarse que el costo del kWh no es igual para todos los estratos, hecho por el cual a continuación se muestra estos valores, fundamentales para la determinación del costo de venta de energía.

Figura 8. Costo de kWh

Subsidio				Contribución
Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5 y 6 Comercial / Industrial
\$233,58	\$291,98	\$496,37	\$583,97	\$700,76

Fuente: [49]

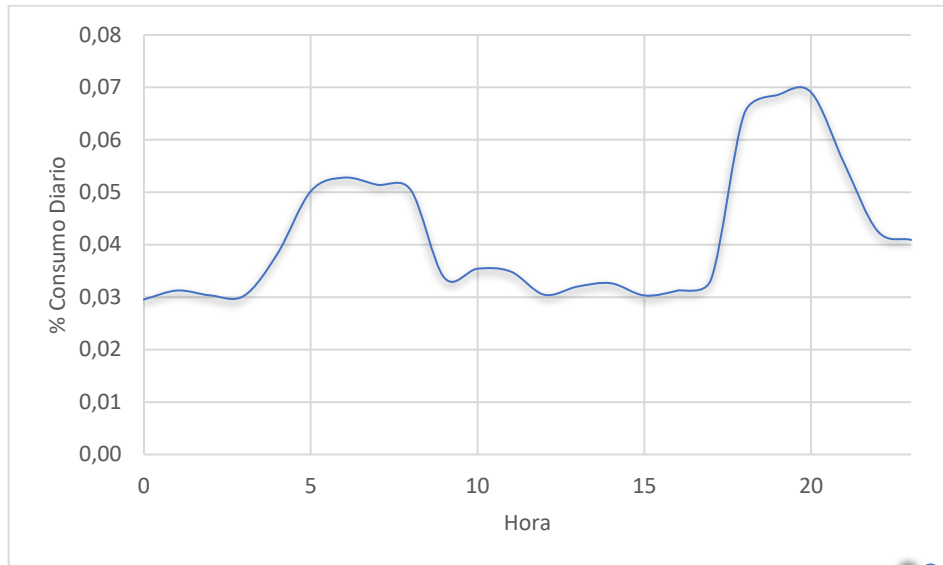
En el Anexo I se muestra la tasa de consumo anual de energía por parte de los habitantes de la comuna Mutis de la ciudad de Bucaramanga. Para ello se contempló proyecciones de un crecimiento poblacional de 1.4% al año, lo cual representa un incremento en la tasa de demanda.

Así mismo, se muestra el costo que deben pagar los usuarios por el servicio de energía eléctrica en la misma comuna, y que es en parte el recurso que se espera recuperar como parte de la inversión y de operación del sistema fotovoltaico y de gas. Debe mencionarse en este punto, que para la proyección de los costos del kWh, se contempló el IPC del año 2020 que fue de 1.7%.

Aunque actualmente y de acuerdo a la información provista por la ESSA, no se tiene un registro accesible sobre el comportamiento de consumo de energía por hora, se consideró un estudio desarrollado por [50].

De acuerdo a lo descrito en la Figura 9, se tienen que las horas de mayor consumo energético se da entre las 5 am y las 8 am y de las 6 pm a las 8 pm, horarios en los que se encuentran el mayor número de usuarios en sus respectivas viviendas.

Figura 9. Distribución del porcentaje de consumo diario per cápita



Fuente: [50]

Con base a lo anterior, se puede establecer el consumo de energía eléctrica en la comuna Mutis. De acuerdo con lo descrito en la tabla 19, se tiene que la mayor demanda es alrededor de 7.64 MWh y ocurre a las 8 pm, momento en el cual estaría en funcionamiento el sistema de Biogás.

Tabla 19. Comportamiento de consumo de energía en la comuna Mutis por hora-2021

Hora	Consumo [kWh]	Consumo [MWh]
0	3269,409	3,269
1	3458,182	3,458
2	3353,204	3,353
3	3345,588	3,346
4	4231,142	4,231
5	5549,873	5,550
6	5839,379	5,839
7	5687,952	5,688
8	5578,374	5,578
9	3731,067	3,731
10	3917,678	3,918
11	3856,552	3,857
12	3368,773	3,369

13	3540,787	3,541
14	3611,235	3,611
15	3353,581	3,354
16	3456,952	3,457
17	3687,057	3,687
18	7192,462	7,192
19	7582,899	7,583
20	7638,689	7,639
21	6130,828	6,131
22	4708,310	4,708
23	4525,943	4,526

Fuente: Autores

10.1 DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para el diseño del sistema fotovoltaico se consideró el uso del software PVSyst. Para esto, se parte estableciendo las características de irradiación global horizontal y la temperatura media del emplazamiento, que corresponde en el caso puntual, la población de Girón en el municipio de Santander. Se toma la información provista en Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), tal y como se muestra en la siguiente figura.

Figura 10. Uso de herramienta PVGIS para la determinación de las características solares en Girón

The screenshot displays the PVGIS web interface. On the left, a map shows the location of Girón, Santander, with a blue pin. The interface includes a sidebar with navigation options like 'CONECTADO A RED', 'FV CON SEGUIMIENTO', and 'DATOS MENSUALES'. The main panel shows the 'DATOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN' configuration. Key settings include:

- Cursor: Seleccionado 075, -73.168; Elevación: 687 (m).
- Utilizar las sombras del terreno: Horizonte calculado.
- Base de datos de radiación solar: PVGIS-NSRDB.
- Año inicial: 2005; Año final: 2005.
- Irradiación: Irradiación global horizontal; Irradiación directa normal; Irradiación global con el ángulo óptimo; Irradiación global con el ángulo: (0-90).
- Ratio: Ratio difusa/global.
- Temperatura: Temperatura media.

Fuente: [51]

Una vez conocido los parámetros respecto al emplazamiento, se procedió a constituirlo en el software PVSyst, el cual debe contener entre otras cosas

elementos como la latitud, longitud, altitud sobre el nivel del mar y zona horaria (Ver figura 11.).

Figura 11. Inclusión del sitio

Parámetros del sitio geográfico para New.SIT (Base de datos PVsyst original)

Coordenadas Geográficas | Meteorología Mensual | Mapa interactivo

Ubicación

Nombre del sitio:

País: Región:

Coordenadas Geográficas

	Decimal	Deg.	min.	sec.	
Latitud	7.0682	[°] 7	4	5	(+ = Norte, - = Hemisferio Sur)
Longitud	-73.1698	[°] -73	10	11	(+ = Este, - = Oeste Greenwich)
Altitud	706	Metros sobre el nivel del mar			
Huso horario	-5.0	Corresponde a una diferencia media			
		Hora Legal - Hora Solar = 0h -6m			

Importación meteorología

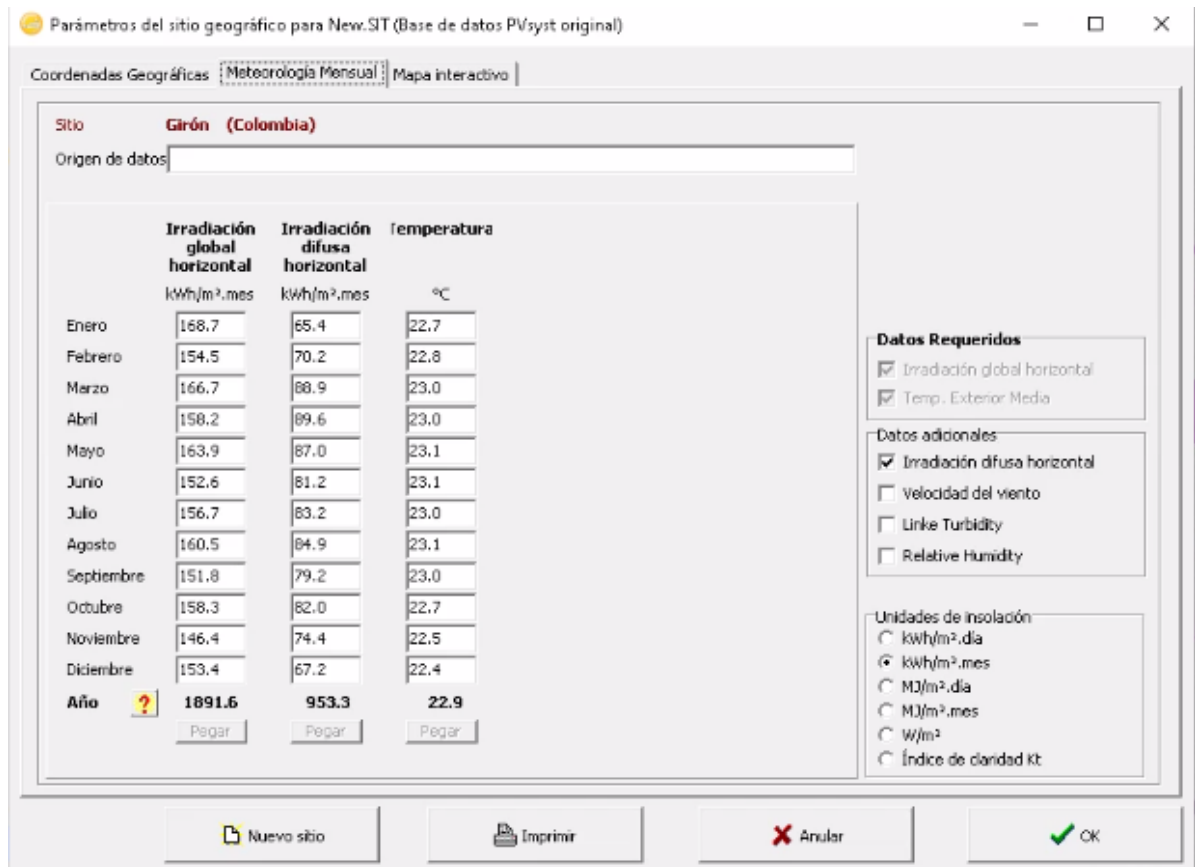
Meteonorm 7.2
 NASA-SSE
 PVGIS TMY
 NREL / NSRDB TMY

Tabla E/S (Excel)

Fuente: Autores.

En cuanto al lugar de implementación del sistema de generación energética fotovoltaica, esta se ubica en el municipio de Girón-Santander. Los datos respecto a la irradiación global horizontal, la irradiación difusa horizontal y la temperatura, es provista por la aplicación PVGIS (Ver figura 12.)

Figura 12. Datos meteorológicos Girón

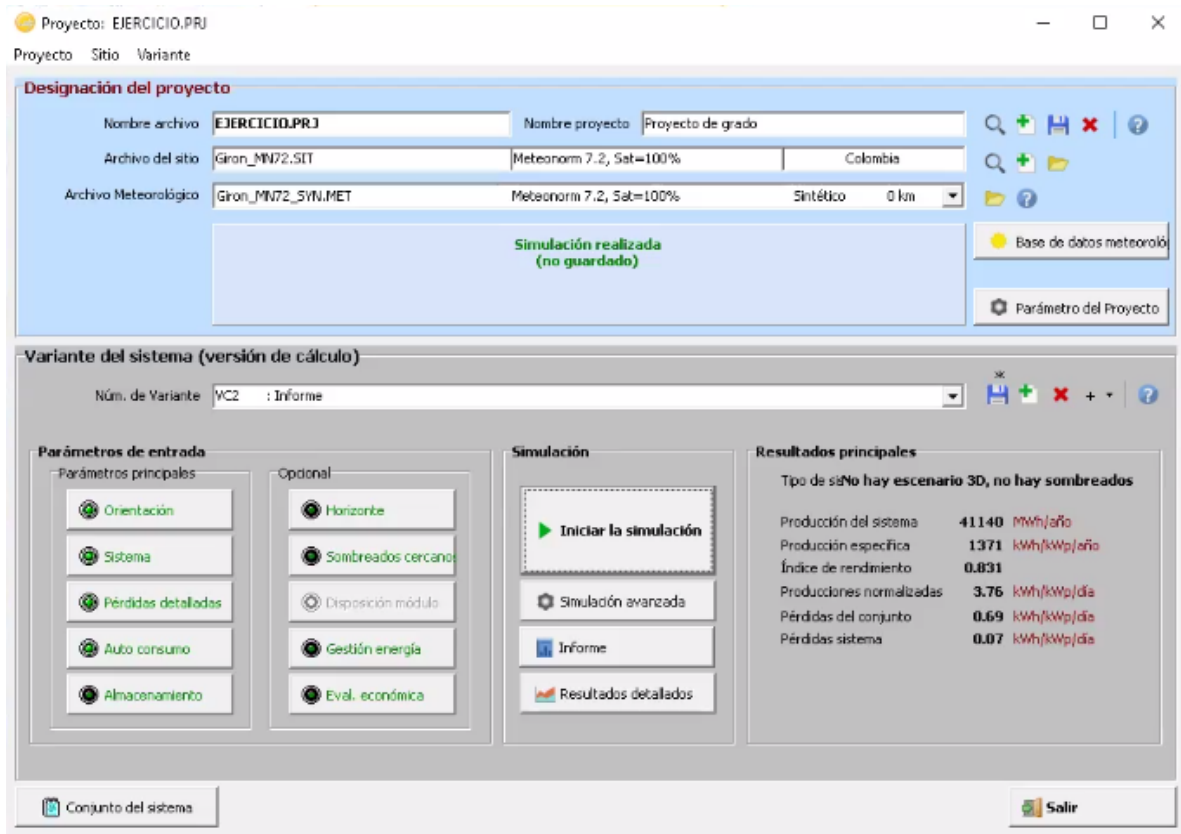


Fuente: Autores.

Los datos correspondientes a los parámetros descritos en la figura 12, se obtuvieron a partir del valor promedio de los años 2005 a 2015, tal y como se muestran en el Anexo J.

Posteriormente, se procede a seleccionar las características de disposición de los paneles solares. Se seleccionó paneles de posición fija con un ángulo de inclinación de 30°.

Figura 13. Panel de configuración de la simulación.



Fuente. Autores

En lo que respecta las características de los paneles e inversores, se partió de la consideración que se quiere proveer el suministro de energía de 10 MW a determinada población. Ante ello y contemplando un factor de seguridad de diseño de 0.8 y un periodo diario de radiación de 5 horas, el sistema fotovoltaico estaría funcionando entre las 6 a.m a 6 p.m (12 horas), se concluyó que la energía a suplir corresponde a:

$$E_n = \frac{(10 \text{ MW})}{5 * 0,8} * 12 = 30 \text{ MW} \quad (17)$$

Basado en lo anterior, fue este valor de energía el contemplado para el respectivo diseño. Se seleccionó unos paneles que previese la potencia mayor posible y consecuente con la tensión de entrada del inversor en términos de voltaje. Con base en esto, y contemplando una potencia a suministrar de 30 MW, se definió que el número de paneles requeridos son:

$$N_p = \frac{E_n}{P_n} = \frac{30000 \text{ kW}}{300 \text{ W}} = 100000 \quad (18)$$

De donde E_n es la potencia requerida a suministrar y P_n es la potencia nominal de los paneles. A partir de la ecuación 18, se pudo establecer que el número mínimo de paneles requeridos es de 100000 unidades.

En lo que respecta a la configuración de los paneles, se estableció el uso de diez módulos en serie y 10000 cadenas en paralelo. Esto requeriría un espacio para el proyecto de 212672 m² o aproximadamente 21.26 ha. En cuanto a las características técnicas del panel solar son descritas en la tabla 20.

Tabla 20. Características del módulo FV

Parámetro	Valor	Unidad
Material	Silicio Monocristalino	-
Fabricante	Auversun	-
Modelo	AV300M104NB-5P	-
Potencia Nominal del Conjunto	30000	kWp
Voltaje	499	V
Corriente	55005	A
Potencia en condiciones de funcionamiento	27463 (@50°C)	kWp

Fuente: Anexo K.

Figura 14. Parámetros de simulación.

Fuente: Autores.

En lo que respecta a las características de los inversores, estos se escogieron considerando el voltaje proporcionado por los paneles y que los mismos operarían a una frecuencia de 60 Hz. En este orden, se escogió un inversor de 500 kWac, por lo cual para determinar el número de unidades del inversor son:

$$N_I = \frac{E_n}{P_I} = \frac{30000 \text{ kW}}{500 \text{ kW}} = 60 \quad (19)$$

De donde E_n es la energía a suplir o suministrar y P_I es la potencia nominal del inversor. Ante esto, se requiere un total de 60 inversores, estando manejando 56 inversores de 165 líneas en paralelo y los cuatro inversores restantes cadenas de 190 líneas en paralelo (para un total de 10000 líneas en paralelo). En cuanto al

voltaje de operación de los mismos estos son consecuentes con el voltaje de salida del conjunto de serie de los paneles FV que corresponde a 499 V.

Las características del inversor son dispuestas en la tabla 21.

Tabla 21. Características del inversor

Parámetro	Valor	Unidad
Fabricante	ChintPower	-
Modelo	CPS SC500KT	-
Voltaje de funcionamiento	450-820	V
Potencia Unitaria	500	KWac
Potencia Total	30000	KWac

Fuente: Anexo K.

En los que respecta a los factores de pérdida del conjunto FV, se escogieron los valores predefinidos por el software, los cuales se disponen en la tabla 22.

Tabla 22. Factores de pérdidas del conjunto FV

Parámetro	Valor	Unidad
Factor de perdidas por suciedad del conjunto	2.0	%
Factor de pérdidas térmicas	29	W/m ² K
Pérdidas óhmicas en el Cableado	0.15	mΩ
Fracción de pérdidas por Calidad Módulo	3.0	%
Fracción de pérdidas por desajuste del módulo	1.0	%
Fracción de pérdidas por desajuste de cadenas	0.10	%

Fuente: Anexo K.

Figura 15. Ejecución de la simulación.



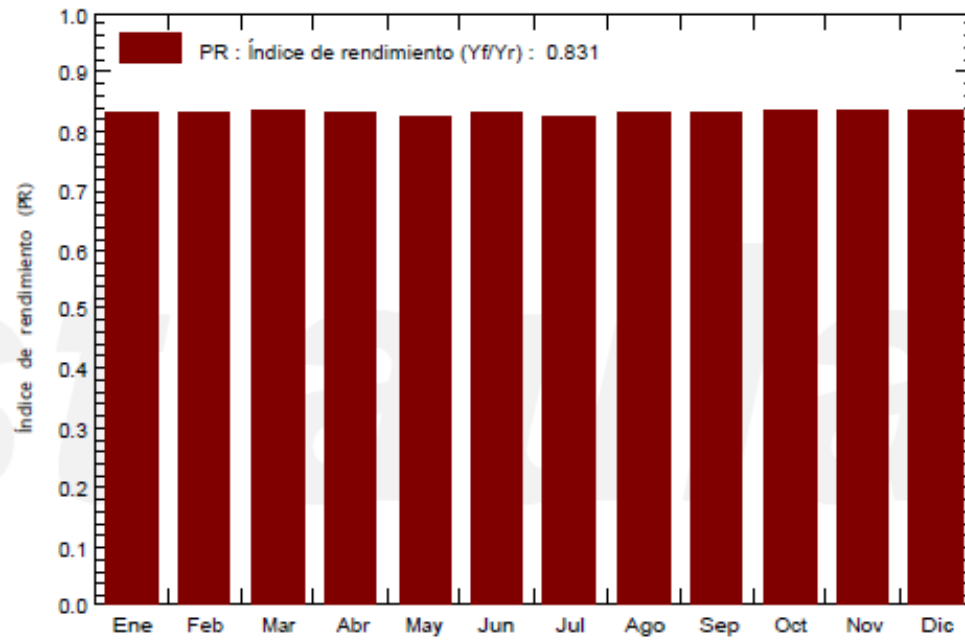
Fuente: Autores.

Una vez definidos los parámetros se dispuso a ejecutar la respectiva simulación, siendo los resultados mostrados en el Anexo K.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se estableció que la energía inyectada a la red es de 41140 MWh./año, con una producción específica de 1371 kWh/kWp/año, con un índice de rendimiento del sistema fotovoltaico de 83.14% y una fracción solar de 47.03%.

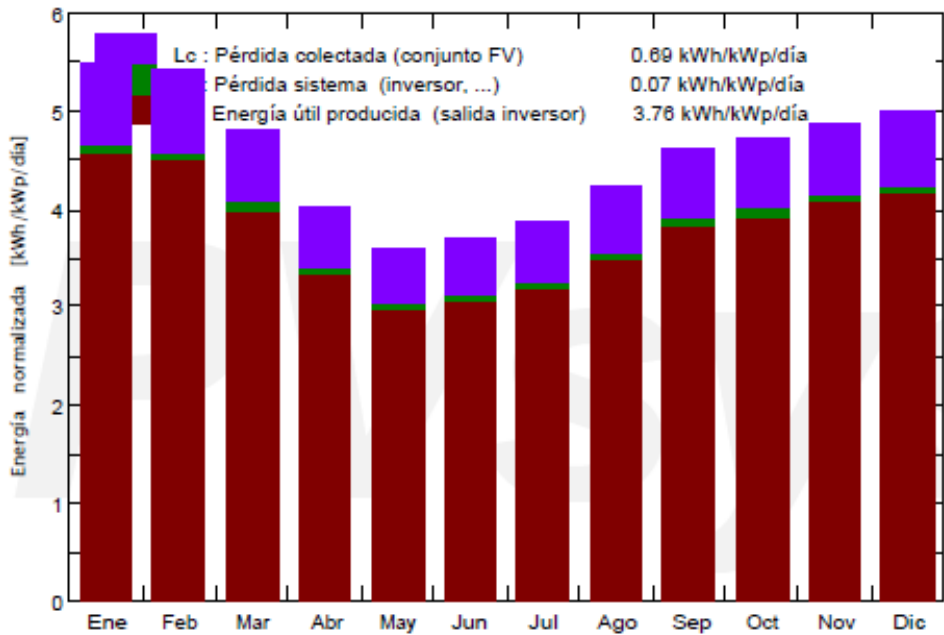
De acuerdo a lo descrito en la figura 16, se evidencia un comportamiento de la eficiencia del sistema fotovoltaico cercano al 80%, con pequeñas oscilaciones para algunos meses explícitos, lo cual se relaciona directamente con la cantidad de radiación solar recibida.

Figura 16. Comportamiento del rendimiento del sistema FV por meses.



Fuente: Anexo K.

Figura 17. Producciones normalizadas del sistema FV

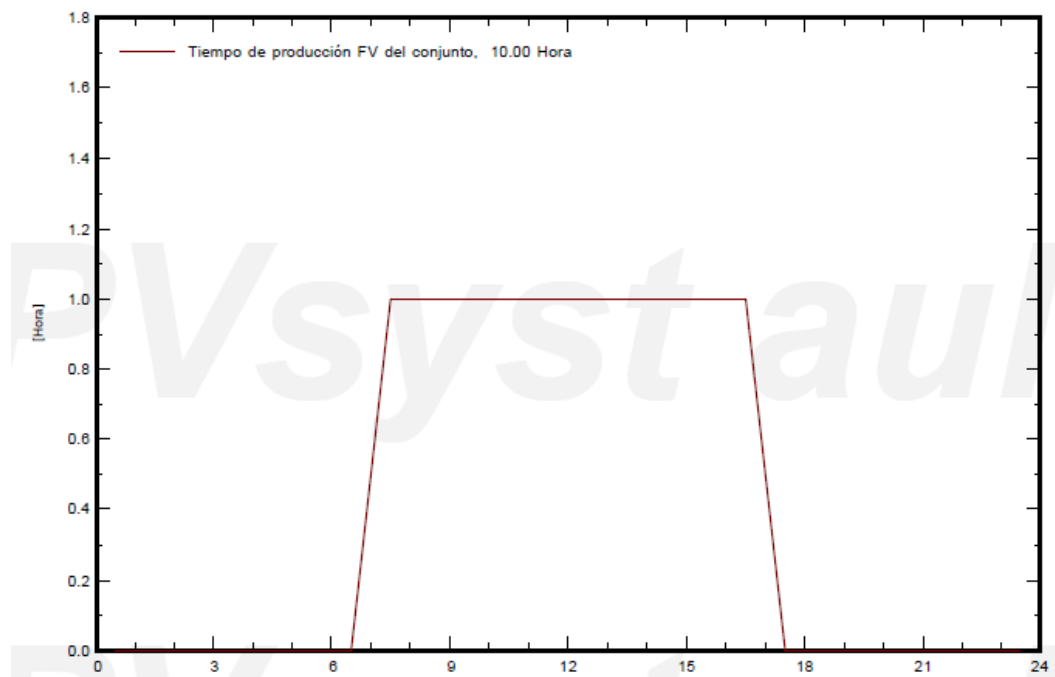


Fuente: Anexo K.

En lo que respecta a las producciones normalizadas del sistema FV, se estableció que la pérdida del conjunto alcanza valores de 0.68 kWh/día, mientras que las asociadas con las pérdidas del inversor son de 0,07 kWh/día, mientras que la energía útil a la salida del inversor es de 3,76 kWh/día. Como se aprecia en la figura 17, la energía producida no es constante en todos los meses, es función directamente de la radiación solar recibida por los paneles. Por esto, se visualiza una menor producción en los meses de mayo y junio y los valores más altos para el mes de enero y febrero.

Un elemento fundamental a considerar como parte del análisis es el tiempo en el cual el sistema fotovoltaico asegura la producción de energía eléctrica, esto debido a que no se contará con banco de baterías que almacenen la misma, sino que será suministrada directamente a la red tras su conversión a un voltaje de AC por medio del inversor. De acuerdo con la grafica 5, la producción de energía se da desde la 7 a.m hasta las 5 p.m, hecho por el cual fuera de estos periodos de tiempo, el sistema encargado de suplir los requisitos energéticos es el de biogás.

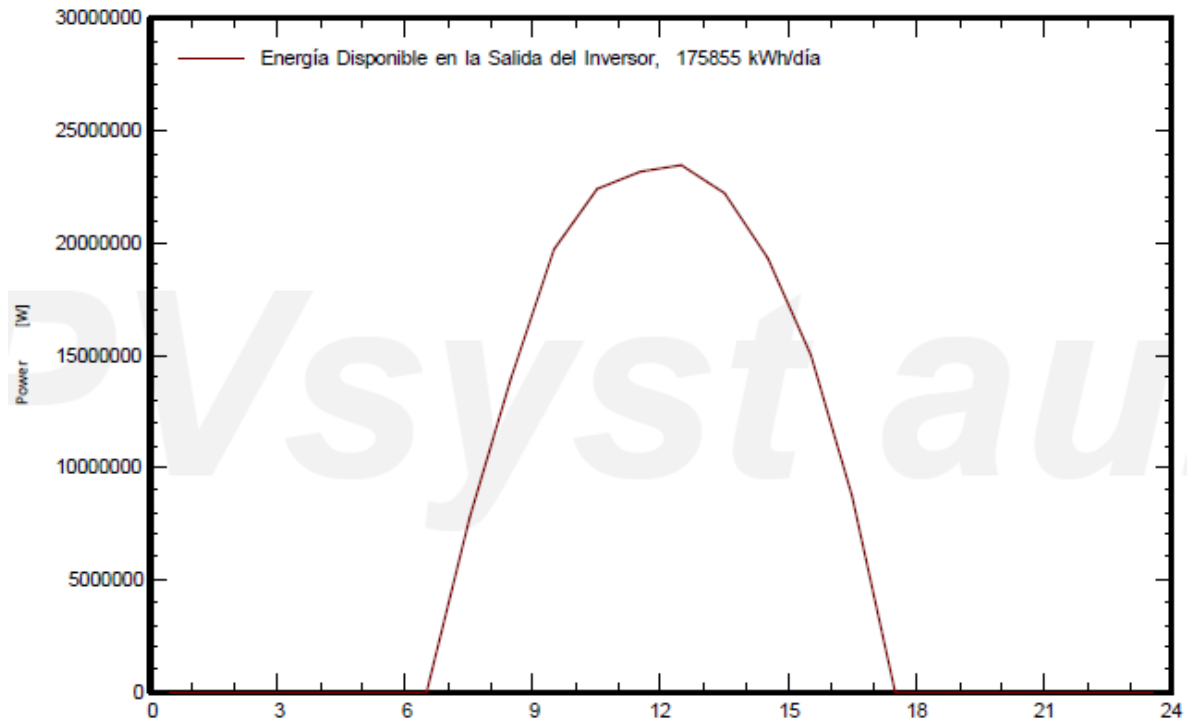
Gráfica 5. Tiempo de producción del sistema FV



Fuente: Autores.

En lo que respecta a la energía disponible a la salida del inversor, el valor promedio del mismo es de 175855 kWh/ día. De acuerdo con la grafica 6, a medio día se logra el valor máximo de generación de energía con un valor cercano a los 23 MWh.

Gráfica 6. Generación de energía eléctrica a la salida del inversor.



Fuente: Autores.

11. ANÁLISIS FINANCIERO

A continuación, se presenta el análisis en torno a la viabilidad financiera del proyecto, para lo cual se contempla la evaluación de parámetros como el valor presente neto, el índice de beneficio costo y la tasa interna de retorno.

En lo que respecta a los costos de implementación del sistema de generación de Biogás, se consideraron diferentes aspectos. Debe mencionarse que algunos costos fueron contemplados de estudios previos, como lo es el de mantenimiento, el costo de las obras civiles y eléctricas.

Tabla 23. Costos de implementación del sistema de Biogás

Descripción	Valor Unitario	Unidad	Cantidades	Total
Cabezal de pozo	\$ 1.017.817		100	\$ 101.781.704
Trampa de Condensado	\$ 319.200.000		1	\$ 319.200.000
Soplador	\$ 68.336.664		1	\$ 68.336.664
Equipo de Comprensión	\$ 790.000.000		1	\$ 790.000.000
Motor de Combustión	\$ 3.744.000.000		1	\$ 3.744.000.000
Antorcha de llama cerrada	\$ 135.000.000		1	\$ 135.000.000
Obra Civil	\$ 150.000	COP/m2	93000	\$ 13.950.000.000
Obras eléctricas	\$ 150.000	COP/kW	5240	\$ 786.000.000
Total				\$ 19.894.318.368
Imprevistos				\$ 1.989.431.837
Total				\$ 21.883.750.205

Fuente: Autores.

De acuerdo a lo expuesto en la tabla 23, se define que el costo total de puesta en marcha de la planta de biogás es de 21.883.750.205 COP. Debe mencionarse que los costos de la obra civil y de las obras eléctricas fueron tomadas en función a lo descrito en [52].

En lo que respecta a los costos variables anuales asociados con el mantenimiento de la planta de biogás, estos se disponen a través de la tabla 24, siendo esta función de la capacidad de producción de la planta.

Tabla 24. Costos de mantenimiento anual de la planta de Biogás

Descripción	Valor
Operación y mantenimiento ductos y pozos	\$ 64.860.000
Operación y mantenimiento antorcha	\$ 917.500
Operación y mantenimiento unidades de generación	\$ 117.277.260

Total	\$ 183.054.760
-------	----------------

Fuente: Autores.

En cuanto al sistema fotovoltaico, la mayor inversión se relaciona con la adquisición de los paneles solares, al igual que las adecuaciones u obras civiles. En función a los mismos, se determinó que el costo de este corresponde a 40.045.412.000 COP, valor por encima al obtenido con el sistema de Biogás (Ver tabla 25.).

Tabla 25. Costos de implementación del sistema fotovoltaico.

Descripción	Valor	Cantidades	Subtotal
Paneles Solares	\$ 429.400	10000	\$ 4.294.000.000
Inversores	\$ 6.900.000	60	\$ 414.000.000
Obra Civil	\$ 150.000	COP/m2	\$ 29.446.920.000
Obras eléctricas	\$ 150.000	COP/kW	\$ 2.250.000.000
Subtotal			\$ 36.404.920.000
Imprevistos (10%)			\$ 3.640.492.000
Total			\$ 40.045.412.000

Fuente: Autores.

Sumado a los elementos anteriormente descritos, debe mencionarse que el costo de mantenimiento anual del sistema fotovoltaico es alrededor de 117.277.260 COP, inferior a los costos operacionales anuales del sistema de Biogás.

De acuerdo a lo dispuesto en la tabla 26, se tiene que la energía provista por Biogás no es suficiente para garantizar el suministro eléctrico de los habitantes de la comuna Mutis, por lo cual es fundamental contar con el respaldo de la red convencional o proveer dicho suministro a un tamaño de población específica que corresponde a alrededor del 2% de la original.

En cuanto al sistema fotovoltaico, debe mencionarse que cuando este entra en operación, se logra suplir la demanda de los usuarios. Así mismo, es indispensable contar con el respaldo de la red convencional en los momentos en que la generación energética con el de Biogás no logra suplir los requerimientos, especialmente en horas de la noche. Ante ello, se tiene que se requerirá de la red un total de 65.02 MWh al día, y se venderá a la electricadora un total de 136.17 MWh.

Tabla 26. Características de generación y consumo por hora

Hora	Consumo [MWh]	Generación FV	Generación Biogás [MWh]	Total	Vendido a la red [MWh]	Requerido de la red [MWh]
------	---------------	---------------	-------------------------	-------	------------------------	---------------------------

		[MWh]	[MWh]	[MWh]		
0	3,269	0	0,356	0,35564	0,000	2,914
1	3,458	0	0,356	0,35564	0,000	3,103
2	3,353	0	0,356	0,35564	0,000	2,998
3	3,346	0	0,356	0,35564	0,000	2,990
4	4,231	0	0,356	0,35564	0,000	3,876
5	5,550	0	0,356	0,35564	0,000	5,194
6	5,839	0	0,356	0,35564	0,000	5,484
7	5,688	5	0,000	5,00000	0,000	0,688
8	5,578	11	0,000	11,00000	5,422	0,000
9	3,731	17	0,000	17,00000	13,269	0,000
10	3,918	21	0,000	21,00000	17,082	0,000
11	3,857	23	0,000	23,00000	19,143	0,000
12	3,369	23,5	0,000	23,50000	20,131	0,000
13	3,541	23	0,000	23,00000	19,459	0,000
14	3,611	21	0,000	21,00000	17,389	0,000
15	3,354	17	0,000	17,00000	13,646	0,000
16	3,457	11	0,000	11,00000	7,543	0,000
17	3,687	5	0,000	5,00000	1,313	0,000
18	7,192	0	0,000	0,00000	0,000	7,192
19	7,583	0	0,356	0,35564	0,000	7,227
20	7,639	0	0,356	0,35564	0,000	7,283
21	6,131	0	0,356	0,35564	0,000	5,775
22	4,708	0	0,356	0,35564	0,000	4,353
23	4,526	0	0,356	0,35564	0,000	4,170
Total	110,616	177,500	4,268	181,768	134,398	63,246

Fuente: Autores.

En lo que respecta a los ingresos por venta del recurso energético, este se obtiene de multiplicar el porcentaje de energía suplida con el sistema de generación de energía por Biogás y Fotovoltaica respecto a la demanda anual, por el valor del ingreso esperado que se describe en el Anexo I.

En la tabla 27, se describe los valores de venta por generación de energía suplida respecto a la requerida. Se aprecia un incremento constante hasta el 2023 y posteriormente inicia el descenso producto de la reducción de la producción de energía con Biogás.

En lo que respecta al balance financiero, se establece que el primer año de operación define altos egresos producto de la implementación de la planta de producción tanto de biogás como la fotovoltaica. Así mismo, se encontró que es a partir del año 2025 (5 años después de la puesta en marcha de la planta), se logra obtener un balance positivo en las finanzas del proyecto (Ver tabla 28.).

Tabla 27. Generación de energía e ingresos por venta.

Año	Generación Biogás [MWh]	Generación FV [MWh]	Energía Total Generada [MWh]	Energía Requerida [MWh]	% Energía Suplida	Ingreso por Venta
2020	1416,2	64787,5	66203,7	39817,36646	166,27%	\$ 11.077.404.093
2021	1558,55	64787,5	66346,05	40374,80959	164,33%	\$ 11.088.177.441
2022	1726,45	64787,5	66513,95	40940,05692	162,47%	\$ 11.103.346.043
2023	1912,6	64787,5	66700,1	41513,21772	160,67%	\$ 11.121.676.666
2024	1335,9	64787,5	66123,4	42094,40277	157,08%	\$ 11.013.063.151
2025	949	64787,5	65736,5	42683,7244	154,01%	\$ 10.936.419.416
2026	689,85	64787,5	65477,35	43281,29655	151,28%	\$ 10.881.322.458
2027	511	64787,5	65298,5	43887,2347	148,79%	\$ 10.839.820.801
2028	394,2	64787,5	65181,7	44501,65598	146,47%	\$ 10.808.840.913
2029	313,9	64787,5	65101,4	45124,67917	144,27%	\$ 10.784.114.094
2030	255,5	64787,5	65043	45756,42468	142,15%	\$ 10.763.202.281
2031	219	64787,5	65006,5	46397,01462	140,11%	\$ 10.746.091.441
2032	193,45	64787,5	64980,95	47046,57283	138,12%	\$ 10.730.959.619
2033	175,2	64787,5	64962,7	47705,22485	136,18%	\$ 10.717.196.775
2034	164,25	64787,5	64951,75	48373,09799	134,27%	\$ 10.704.797.005
2035	156,95	64787,5	64944,45	49050,32136	132,40%	\$ 10.693.153.564
2036	149,65	64787,5	64937,15	49737,02586	130,56%	\$ 10.681.662.152
2037	146	64787,5	64933,5	50433,34423	128,75%	\$ 10.670.920.484
2038	142,35	64787,5	64929,85	51139,41105	126,97%	\$ 10.660.325.527
2039	138,7	64787,5	64926,2	51855,3628	125,21%	\$ 10.649.875.251
2040	138,7	64787,5	64926,2	52581,33788	123,48%	\$ 10.640.165.821
2041	135,05	64787,5	64922,55	53317,47661	121,77%	\$ 10.629.998.393
2042	135,05	64787,5	64922,55	54063,92128	120,08%	\$ 10.620.566.830
2043	135,05	64787,5	64922,55	54820,81618	118,43%	\$ 10.611.271.069
2044	135,05	64787,5	64922,55	55588,30761	116,79%	\$ 10.602.109.240

2045	135,05	64787,5	64922,55	56366,54391	115,18%	\$ 10.593.079.497
2046	135,05	64787,5	64922,55	57155,67553	113,59%	\$ 10.584.180.023
2047	131,4	64787,5	64918,9	57955,85499	112,01%	\$ 10.574.814.463
2048	131,4	64787,5	64918,9	58767,23695	110,47%	\$ 10.566.170.651
2049	131,4	64787,5	64918,9	59589,97827	108,94%	\$ 10.557.651.790
2050	131,4	64787,5	64918,9	60424,23797	107,44%	\$ 10.549.256.159

Fuente: Autores.

Tabla 28. Balance

Año	Ingresos	Egresos	Ganancias	Balance
2021	\$ 11.088.177.441	\$ 62.229.494.224	-\$ 51.141.316.782	-\$ 51.141.316.782
2022	\$ 11.103.346.043	\$ 300.332.019	\$ 10.803.014.024	-\$ 40.338.302.759
2023	\$ 11.121.676.666	\$ 305.437.663	\$ 10.816.239.002	-\$ 29.522.063.756
2024	\$ 11.013.063.151	\$ 310.630.104	\$ 10.702.433.047	-\$ 18.819.630.709
2025	\$ 10.936.419.416	\$ 315.910.815	\$ 10.620.508.600	-\$ 8.199.122.109
2026	\$ 10.881.322.458	\$ 321.281.299	\$ 10.560.041.158	\$ 2.360.919.050
2027	\$ 10.839.820.801	\$ 326.743.081	\$ 10.513.077.720	\$ 12.873.996.770
2028	\$ 10.808.840.913	\$ 332.297.714	\$ 10.476.543.199	\$ 23.350.539.969
2029	\$ 10.784.114.094	\$ 337.946.775	\$ 10.446.167.319	\$ 33.796.707.288
2030	\$ 10.763.202.281	\$ 343.691.870	\$ 10.419.510.411	\$ 44.216.217.699
2031	\$ 10.746.091.441	\$ 349.534.632	\$ 10.396.556.810	\$ 54.612.774.509
2032	\$ 10.730.959.619	\$ 355.476.721	\$ 10.375.482.899	\$ 64.988.257.408
2033	\$ 10.717.196.775	\$ 361.519.825	\$ 10.355.676.951	\$ 75.343.934.358
2034	\$ 10.704.797.005	\$ 367.665.662	\$ 10.337.131.344	\$ 85.681.065.702
2035	\$ 10.693.153.564	\$ 373.915.978	\$ 10.319.237.586	\$ 96.000.303.288
2036	\$ 10.681.662.152	\$ 380.272.550	\$ 10.301.389.602	\$ 106.301.692.890

2037	\$ 10.670.920.484	\$ 386.737.183	\$ 10.284.183.301	\$ 116.585.876.190
2038	\$ 10.660.325.527	\$ 393.311.715	\$ 10.267.013.812	\$ 126.852.890.002
2039	\$ 10.649.875.251	\$ 399.998.014	\$ 10.249.877.237	\$ 137.102.767.239
2040	\$ 10.640.165.821	\$ 406.797.981	\$ 10.233.367.840	\$ 147.336.135.079
2041	\$ 10.629.998.393	\$ 413.713.546	\$ 10.216.284.847	\$ 157.552.419.926
2042	\$ 10.620.566.830	\$ 420.746.676	\$ 10.199.820.153	\$ 167.752.240.079
2043	\$ 10.611.271.069	\$ 427.899.370	\$ 10.183.371.699	\$ 177.935.611.778
2044	\$ 10.602.109.240	\$ 435.173.659	\$ 10.166.935.580	\$ 188.102.547.359
2045	\$ 10.593.079.497	\$ 442.571.611	\$ 10.150.507.886	\$ 198.253.055.245
2046	\$ 10.584.180.023	\$ 450.095.329	\$ 10.134.084.694	\$ 208.387.139.938
2047	\$ 10.574.814.463	\$ 457.746.949	\$ 10.117.067.513	\$ 218.504.207.451
2048	\$ 10.566.170.651	\$ 465.528.648	\$ 10.100.642.003	\$ 228.604.849.454
2049	\$ 10.557.651.790	\$ 473.442.635	\$ 10.084.209.155	\$ 238.689.058.610
2050	\$ 10.549.256.159	\$ 481.491.159	\$ 10.067.765.000	\$ 248.756.823.609

Fuente: Autores.

De acuerdo a lo dispuesto en la tabla 29, se establece que el valor presente neto asociado con los ingresos es superior a los de los egresos. A ello se suma el hecho que el índice de beneficio costo es superior a 1, lo cual permite entender que el proyecto es viable financieramente, aspecto que se ratifica con la tasa interna de retorno (TIR), cuyo valor fue de 20%, superior a la tasa de interés que es del 10%.

Tabla 29. Parámetros financieros de la propuesta

Parámetro	Valor
Valor Presente Neto Ingresos	\$ 102.418.132.869,78
Valor Presente Neto Egresos	\$ 3.246.543.390,90
Índice B/C	1.56
TIR	20,6%

Fuente: Autores.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados, se pudo establecer que la implementación de un sistema híbrido (biogás y fotovoltaica) para suplir las necesidades de consumo de la comuna del barrio Mutis es viable desde el aspecto técnico y financiero. En cuanto a la energía a suplir, este se determinó estableciendo el valor del consumo per cápita dispuesto por el Banco Mundial, el número de habitantes del sector de interés. A partir de esto, se obtuvo que el valor máximo a suplir en la hora de mayor consumo es de 7.64 MWh; lo cual se multiplicó por un factor de seguridad de 1.3, para obtener un valor final de diseño de 10 MWh. Debe mencionarse que dicho factor oscila entre 1.2 a 1.5, y contempla posibles incrementos en el consumo de energía.

En lo que respecta al sistema de generación de Biogás, la mayor tasa de flujo de metano se obtiene para el año 2023 con un valor de 629.29 ft³/min, que representó una capacidad máxima de generación de energía de 5,23 MWh. Debe mencionarse, que la capacidad de generación se realizó usando la metodología IPCC y que al momento del estudio no se contaba con información respecto a las cantidad y características de los residuos depositados en el relleno sanitario El Carrasco antes del año 2008, por lo cual se esperaba que la cantidad de metano que se pueda extraer sea mayor.

En cuanto al sistema de generación de energía a partir del biogás, se seleccionó un motor de combustión interna, específicamente el motor G3520C de Caterpillar, que tiene una capacidad de generación eléctrica de hasta 1622 kW que tiene una eficiencia eléctrica de 39.8%. Entre las desventajas que prevé el uso del motor de combustión a gas, se destaca que requieren de mayor cantidad de metano para la generación energética en comparación con otros sistemas de generación, suelen perder potencia, por lo cual solicita de una mayor mantenimiento, así mismo su eficiencia se ve restringida por la presencia de otros elementos en el metano, especialmente cuando se encuentra presencia de humedad, lo cual a su vez puede generar daños en el sistema.

Uno de los aspectos a destacar en este punto, es el que El Carrasco estaría en funcionamiento hasta el año 2022, hecho por el cual, a partir del año 2023 se tendría un descenso en la capacidad de generación de metano. Por ende, se recomienda la implementación de sistemas de Biogás para rellenos sanitarios cuyo tiempo de funcionamiento es amplio respecto al momento en que se realiza el análisis.

En cuanto al sistema fotovoltaico, el diseño del mismo se fundamentó en la necesidad de suplir el consumo mismo de la comuna de Barrio Mutis, contemplando de antemano el hecho o restricción que existe en la operación del relleno sanitario, el cual genera un decrecimiento en la capacidad de generación del metano y por ende de funcionamiento de la planta de generación de energía alterna a la solar.

La selección de los paneles solares se realizó contemplando aspectos como la tecnología, la tensión provista, la potencia y la tolerancia. En dicho orden, se promovió el uso de paneles de potencia elevadas y buenas características de tolerancia, con lo cual se reduciría el número de unidades a instalar y a su vez el número de hectáreas o tamaño del terreno a adecuar.

El panel seleccionado de referencia AV300M104NB-5P silicio monocristalino presenta las características técnicas de Voltaje, Potencia, regulación adecuadas y mejoradas respecto del panel ODA170-24-P Monocristalino escogido previamente como acoplable para el caso planteado y estudiado. Estos paneles se encuentran disponibles en el mercado por la empresa Auversus en el cual se obtiene la información de estas y otras opciones para escoger la opción realmente más pertinente y adecuada en cada caso.

Para el caso del número de paneles en serie, se seleccionaron de acuerdo a las características del inversor, específicamente la tensión a la entrada que este puede soportar o manejar. Por ende, se plantea usar paneles solares fotovoltaicos con tensiones máximas de salida de 499.28 V, se seleccionó inversores con frecuencia de salida de 60 Hz con tensiones de entrada entre 450 V a 820 V, proporcionando potencias unitarias de 500 kWac.

Por último, y en lo que respecta al análisis financiero, se pudo establecer que el proyecto de implementación del sistema híbrido es viable, al obtener que el valor presente neto de los ingresos es superior al de los egresos. Así mismo, la tasa interna de retorno (TIR) es mayor a la tasa de interés, siendo el primero de 20.6% y el segundo de 10%. En cuanto al índice de beneficio-costos, el índice B/C es de 1.54, superior a lo esperado para asegurar el balance y no obtener pérdidas.

RECOMENDACIONES

- En la realización de estudios similares a este, la técnica empleada en la evaluación de las características técnicas de un relleno sanitario, es la clave en la exactitud de los datos posteriores de cara a la entrega de resultados para tomar decisiones o plantear estrategias de inversión o implementación; por lo tanto, escoger el método y el mecanismo más adecuado para recoger y tratar los datos es la clave del éxito de cualquier estudio o investigación de este tipo.
- Las condiciones técnicas en el caso de un relleno sanitario como el de “El carrasco”, revisten ciertas condiciones de análisis generales, aplicables en este y otros entornos, pero también implica el estudio de las particularidades que hacen de cada proyecto un caso único, y que constituyen la verdadera riqueza de la experiencia investigativa.
- Para un caso tan complejo en cuanto a permisos y acceso a la información, el desarrollo de la propuesta en tiempos de pandemia ha sido todo un reto, el cual deja como recomendación a futuras propuestas el ser muy estratégicos y persuasivos para obtener información de la mejor manera de las fuentes que son realmente las adecuadas; de esto depende la pertinencia del proyecto y su nivel de aplicación o referencia hacia futuro.
- Las técnicas, bibliografía, métodos y expresiones con base en las cuales se desarrolla el análisis del proyecto, deberían tener en cuenta la pertinencia y coherencia que permita garantizar un buen margen de credibilidad por lo que se propone y concluye a partir de estas investigaciones.
- Se debería exigir que un proyecto como el realizado, incluya una publicación para promover la actualización en torno al tema de investigación, el cual permita la construcción regular de artículos y el debate de quienes participan de este campo en el cual se ponen en juego temáticas y metodologías propias de nuestra área del conocimiento.

Anexo A

SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE BIOGÁS

POZOS DE EXTRACCION

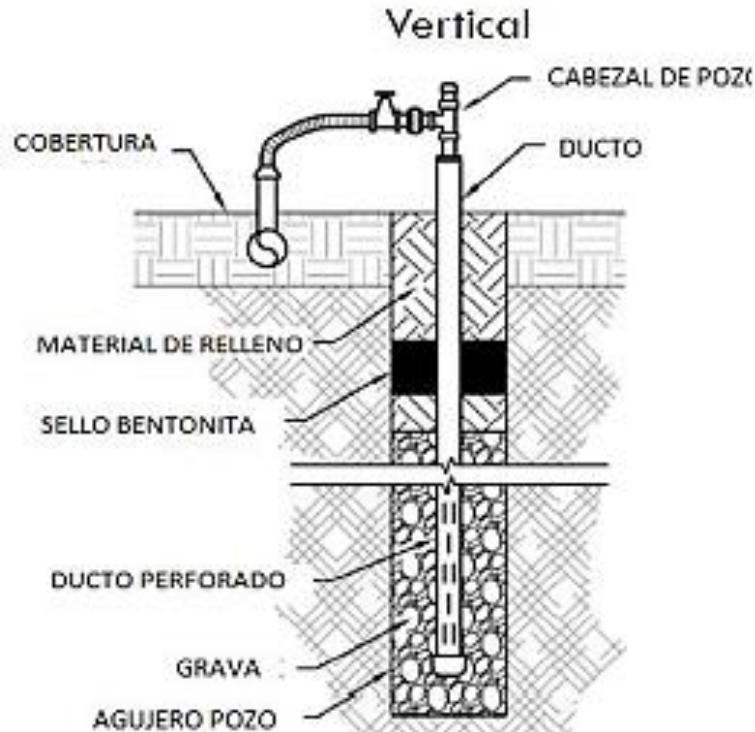
Un pozo de extracción corresponde al trayecto que provee una menor pérdida de carga para evacuar el biogás de manera controlada y evitar accidentes. Los esquemas más comunes en proyectos de captura de biogás son pozos verticales, que se instalan en áreas de disposición ya clausuradas e ideales para profundidades de residuos de al menos 10 metros. [26]

Se define el uso de sistemas verticales considerando que proveen ventajas como la mínima interferencia en las operaciones de disposición de los residuos, son más comunes y confiables para su inspección, además que la profundidad promedio del relleno es de 13 m, siendo esta tecnología óptima para rellenos con profundidades iguales o mayores a 10 m. En lo que respecta a los criterios de diseño, se deben contemplar los siguientes elementos: [26]

- Diámetros de perforación entre 200 mm a 900 mm. De acuerdo con la bibliografía, pequeños diámetros proveen un mejor desempeño para los pozos, sin que ello represente un incremento en los costos de excavación. Se recomienda diámetros no menores a 250 mm.
- Tubería colectora de diámetro entre 50 mm a 150 mm. Se recomienda diámetros mínimos de 100 mm con el fin de reducir las posibilidades de taponamiento del sistema de biogás o de ingreso del lixiviado en los mismos. Se recomiendan diámetros alrededor de los 150 mm en los pozos con altos niveles de lixiviados. Así mismo, la tubería debe ir al centro del pozo, siendo los materiales usados principalmente PVC y HDPE.
- La profundidad de la perforación debe ser aproximadamente del 80% de la del relleno sanitario. Así mismo, se debe asegurar una distancia de al menos 3 m desde el final de la perforación hasta la base del relleno, de manera que los pozos no intervengan con el sistema de impermeabilización de la base del relleno. Basado en estos, se tiene que la profundidad de la perforación será de 10 m, asegurando la distancia de 3 m respecto a la base del relleno.
- La tubería idealmente debe tener una región perforada de 2/3 del largo total, pero debe verificarse que la distancia desde la superficie hasta el área perforada sea al menos de 3 M, siendo recomendable 5 m, esto con el objetivo de reducir la probabilidad de ingreso de aire al interior del relleno sanitario.
- La región perforada puede tener un diámetro de 10 mm a 15 mm y debe incluir un área de apertura de 10% a 12% del total del tubo. En lugar de perforaciones circulares se pueden usar ranuras.
- Las tuberías deben tener acoples telescópicos para adecuarse a los asentamientos del terreno.
- En las regiones no perforadas, el tubo se debe rellenar con material de cobertura, usando dos sellos de bentonita en cada extremo.

- En la región perforada se usa grava como material de relleno, con una granulometría de 25 mm a 50 mm.

Esquemas de pozo de extracción de biogás vertical



Fuente: [26]

1. CABEZAL DE POZO

Los cabezales de pozo posibilitan monitorear la captura del biogás en los colectores. Los cabezales deben contar con un manómetro para medir la presión en el cabezal, un tubo de Pitot o placa de orificio para medir el caudal de biogás extraído y sensores de temperatura. Sumado a lo anterior, tiene una válvula que regula la succión del biogás. [47]

Respecto a los cabezales para los pozos, la instrumentación típica es:

- Medidor de Flujo: Tubo de Pitot o Placa orificio.
- Medidor de presión: Manómetro o puerto de monitoreo.
- Medidor de temperatura: Termocupla o puerto de monitoreo.
- Regulación de vacío: Válvulas Mariposa o válvula de bola son las más utilizadas (opcional).

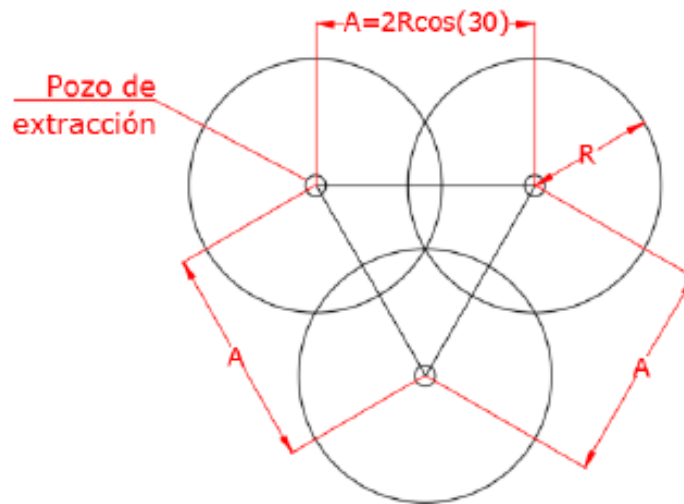
2. RADIO DE INFLUENCIA DE LOS POZOS

Los radios de influencia se seleccionan en función de las condiciones del sitio, al igual que de la antigüedad de los residuos y la localización de los pozos. En dicho orden, es común la selección de los siguientes rangos de los pozos: [26]

- Pozos en el interior del relleno sanitario tiene un radio entre 35 m a 80 m.
- Pozos en el perímetro del relleno sanitario tienen un radio entre 18 m a 45 m.
- Pozos en relleno sanitarios poco profundos o con mucha humedad tienen un radio entre 18 m a 50 m.
- Pozos en rellenos sanitarios profundos o con poca humedad tienen un radio de influencia entre 35 m y 100 m.

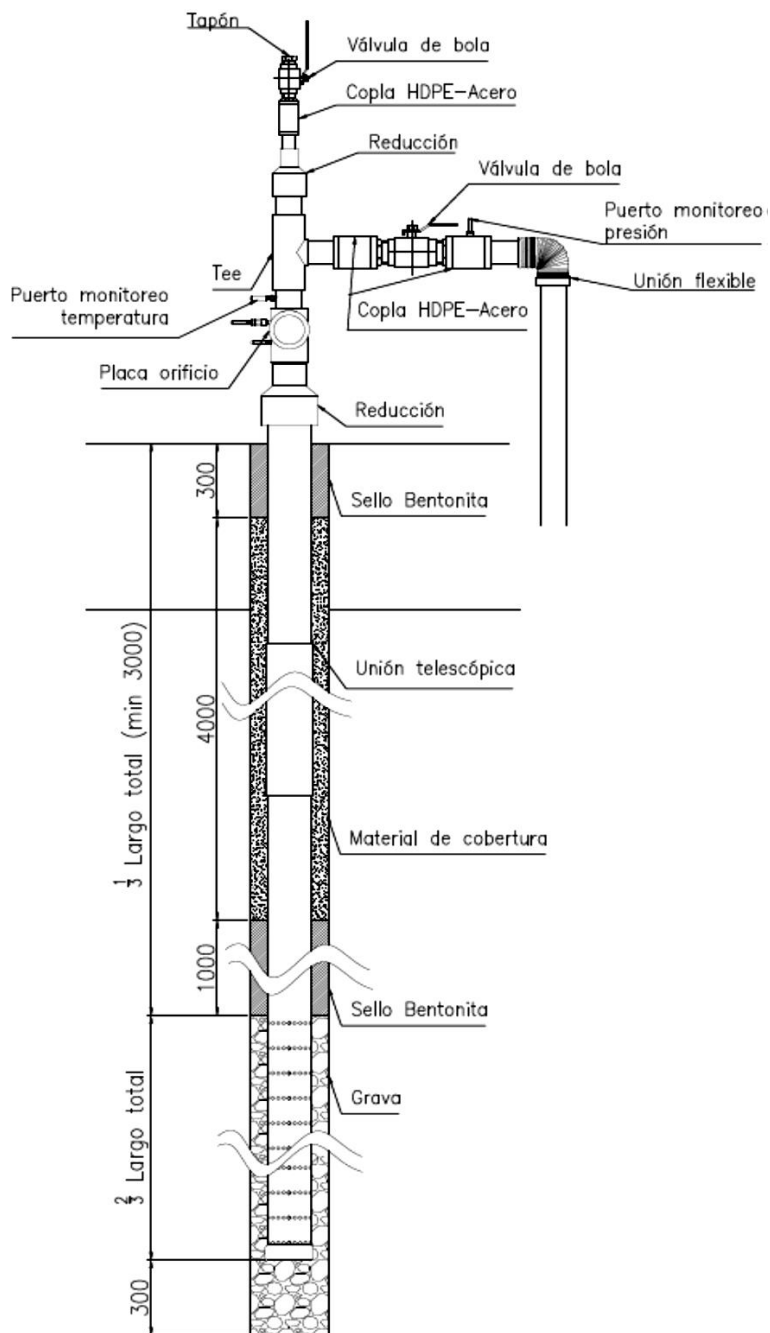
Para los pozos verticales, una vez dispuestos los radios de influencia, el espaciado se escoge de manera que las zonas de influencia se traslapen, de manera que se asegure la máxima extracción posible de biogás. Un valor de referencia es considerar que existe una densidad de pozos entre 1.9 a 3.7 pozos por cada hectárea del terreno. [26]

Posicionamiento de los pozos de extracción



Fuente: [26]

Conexiones típicas de pozo de extracción vertical



Fuente: [26]

3. TUBERÍAS COLECTORAS

La función de las tuberías de biogás es dirigir el mismo a una estación de incineración o de aprovechamiento energético, siendo compuesto por: [26]

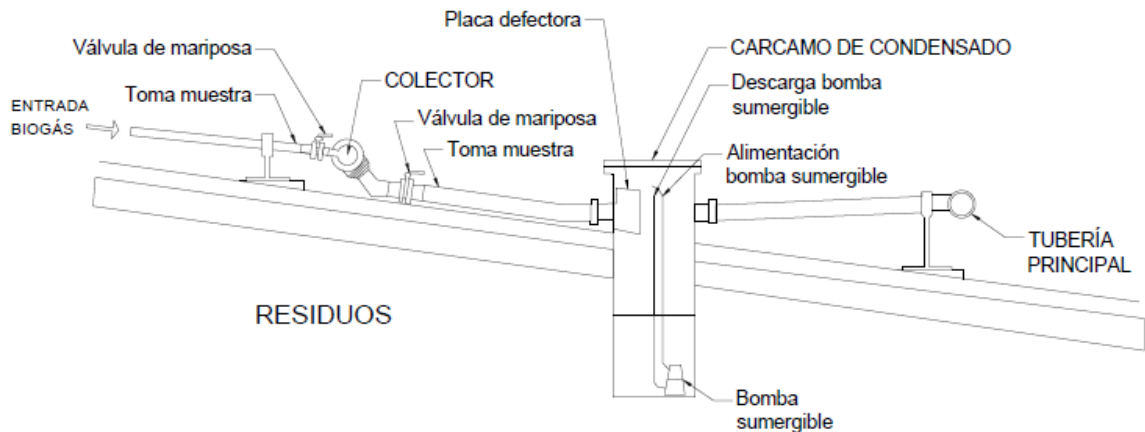
- Tuberías de conexión lateral: De pequeño diámetro a partir de los cabezales de los pozos de extracción, siendo su material principalmente polietileno de

alta densidad o PVC (sólo tuberías por encima del suelo). Debe mencionarse que las tuberías de conexión pueden estar por encima o por debajo del nivel del suelo.

- Manifold de distribución que conecta tuberías de conexión lateral con una o más tuberías principales.
- La tubería principal que transporta el biogás a la planta de aprovechamiento.

En lo que respecta a los diámetros de los ductos, debe considerarse que los mismos aumentan su tamaño cuando se acercan al compresor del sistema de extracción para poder adaptarse al mayor caudal, por ende, el sistema debe ser dimensionado para la máxima tasa de producción de biogás. Para mitigar el condensado se utilizan trampas de condensado o cárcamo. [26]

Esquema de condensado con Cárcamo



Fuente: [26]

4. BOMBEO DE EXTRACCIÓN

La selección del equipo debe contemplar aspectos como la tasa de recuperación del biogás y la eficiencia de colección requerida. Para algunos sistemas de biogás, el soplador centrífugo de una etapa es acorde y económico, siendo la ventaja su bajo costo de inversión y de operación, al igual que de mantenimiento.

Cuando sea necesario manejo de mayores presiones, se recomienda usar compresores de capacidades de 345 kPa o mayor. Se emplean estos elementos cuando el uso final del biogás requiere alta presión, como por ejemplo en moto-generadores de gas. La desventaja respecto a los sopladores es su costo y mayores recursos de mantenimiento.

Soplador para Biogás



Fuente: [53]

Compresor para Biogás



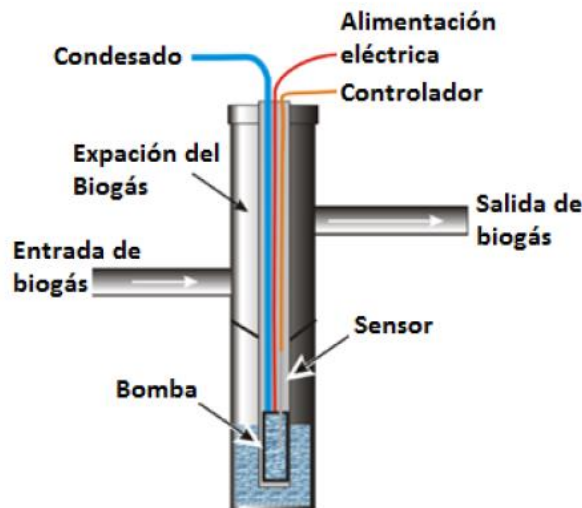
Fuente: [46]

5. SISTEMA DE CONDENSADO

Un elemento fundamental en el diseño de la planta de biogás se debe considerar es el sistema de control y extracción del condensado del mismo. El condensado se da por el enfriamiento del biogás durante su transporte a la estación de bombeo, el cual suele estar a la temperatura interior del relleno y saturado en humedad. [26]

Ante el enfriamiento, la presión del vapor se reduce e inicia a condensarse el agua en las paredes de las tuberías. La cantidad de agua condensada depende de la cantidad del biogás extraído, la presión de vacío y los cambios en la temperatura. Por ende, es común el uso de cárcamos o colectores de condensado, los cuales cuentan con bombas sumergibles. [26]

Cárcamo de Condensado



Fuente: [26]

En cuanto a las tasas de condensado, este suele estar entre 30 mL a 50 mL por metro cúbico de biogás. Así mismo, los ductos de transporte de condensado son de diámetro de 32 mm, 50 mm, 63 mm o 90 mm, con una inclinación de al menos 3%. Las bombas que se usan suelen manejar entre 0,5 m³/h a 2.5m³/h y con velocidades de descarga de 0,5 m/s y 2,5 m/s. [26]

Anexo B

ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

Para la generación o aprovechamiento del biogás se debe contemplar diferentes alternativas o tecnología, las cuales deben escogerse en función de del flujo del metano, tal y como se dispone a continuación:

- Motores de combustión interna: Con capacidad de 800 kW a 3 MW por motor, para manejos de flujo entre 300 ft³/min a 1100 ft³/min. Se pueden usar múltiples motores que se pueden combinar para grandes proyectos.
- Turbinas a gas: Con capacidad de generación de 1 MW a 10 MW para flujos de gas que exceden los 1300 ft³/min, típicamente sobre los 4000 ft³/min.
- Microturbinas: Con capacidad de generación entre 30 kW a 250 kW, manejando flujo de 20 ft³/min a 200 ft³/min.

En la siguiente tabla se describen los rangos típicos de flujos, las potencias y eficiencias de tecnologías de generación eléctrica:

Clasificación de medios generadores eléctricos

Tecnología	Rango típico de flujo [ft³/min]	Tamaño preferido de planta [MW]	Eficiencia de conversión eléctrica [%]
Microturbinas	<100	<1	25 a 30
Motores de combustión interna	>150 a 5000	0,5 a 12	32 a 40
Turbinas de gas	>4000 a 2000	3 a 18	26 a 32
Turbinas de vapor	>6000 a 25000	10 a 50	24 a 29
Ciclo combinado	>5000 a 25000	>10	38 a 45

Fuente: [27]

Anexo C

VALORES PREDETERMINADOS DEL MODELO IPCC

Clasificación de los SEDS y factores de corrección de metano

Tipo de sitio	Valores por defecto del Factor de corrección de metano (MCF, del inglés, <i>Methane Correction Factor</i>)
Gestionado – anaeróbico ¹	1,0
Gestionado – semi-aeróbico ²	0,5
No gestionado ³ – profundo (>5 m desechos) y/o capa freática elevada.	0,8
No gestionado ⁴ – poco profundo (<5m de desechos)	0,4
SEDS no categorizado ⁵	0,6

Fuente: [45]

índice de generación del metano

Tipo de desechos		Zona climática*							
		Boreal y templada (MAT ≤ 20°C)				Tropical ¹ (MAT > 20°C)			
		Seco (MAP/PET < 1)		Húmedo (MAP/PET > 1)		Seco (MAP < 1000 mm)		Húmedo y seco (MAP ≥ 1000 mm)	
		Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango ²
Desechos de degradación lenta	Desechos de papel/textiles	0,04	0,03 ^{3,5} – 0,05 ^{3,4}	0,06	0,05 – 0,07 ^{3,5}	0,045	0,04 – 0,06	0,07	0,06 – 0,085
	Desechos de madera/paja	0,02	0,01 ^{3,4} – 0,03 ^{6,7}	0,03	0,02 – 0,04	0,025	0,02 – 0,04	0,035	0,03 – 0,05
Desechos de degradación moderada	Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)/ desechos de jardín y parques	0,05	0,04 – 0,06	0,1	0,06 – 0,1 ⁸	0,065	0,05 – 0,08	0,17	0,15 – 0,2
Desechos de degradación rápida	Desechos alimenticios/ lodo de aguas servidas	0,06	0,05 – 0,08	0,185 ⁴	0,1 ^{3,4} – 0,2 ⁹	0,085	0,07 – 0,1	0,4	0,17 – 0,7 ¹⁰
Desechos brutos		0,05	0,04 – 0,06	0,09	0,08 ⁸ – 0,1	0,065	0,05 – 0,08	0,17	0,15 ¹¹ – 0,2

Fuente: [45]

Anexo D

FICHA TÉCNICA: CABEZAL PARA POZO DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS

CABEZAL PARA POZO EN MATERIAL DE PE HD PARA CAPTACIÓN DE BIOGAS ([HTTPS://WWW.EUROPASTICOS.ES/SERVICIOS/CABEZAL-PARA-POZO-EN-MATERIAL-DE-PE-HD-PARA-CAPTACION-DE-BIOGAS/](https://www.europlasticos.es/servicios/cabezal-para-pozo-en-material-de-pe-hd-para-captacion-de-biogas/))

[<https://www.europlasticos.es/wp-content/uploads/2016/11>



TECNOLOGÍA AVANZADA A CORROSIÓN,
INDUSTRIA QUÍMICA Y MEDIO AMBIENTE,
REQUERIMIENTOS PARA PRODUCTOS CORROSIVOS

FICHA TÉCNICA: CABEZAL PARA POZO DE CAPTACIÓN DE BIOGAS

CABEZAL CON VÁLVULA



	a	b	c	d	e	PVP
Ø200	±280	±200	±1010	±300	±440	318,6M
Ø160	±225	±160	±1010	±300	±430	285,3M
Ø110	±165	±110	±1000	±300	±430	223,9M

LA VÁLVULA INSTALADA EN ESTE CABEZAL ES DE 2"

LA VÁLVULA INSTALADA EN ESTE CABEZAL ES DE 2"

LA VÁLVULA INSTALADA EN ESTE CABEZAL ES DE 2"

CABEZAL SIN VÁLVULA



	a	b	c	d	e	PVP
Ø200	±280	±200	±1010	±300	±360	302,4M
Ø160	±225	±160	±1010	±300	±350	168,9M
Ø110	±165	±110	±1000	±300	±160	107,6M

Cabezales para los pozos de captación de biogás con accesorios de PE100 PN10 preparados para posible instalación de bomba, de fácil montaje, tornillería INOX A-4, junta de cierre EPDM, totalmente anticorrosivo.

Nota: En caso de petición, no dual     info@comercial.es en la tarifa anexo indicado.

Teléfono: 94 264 49 87 / Fax: 94 264 36 34 / e-mail: ventas@europasticos.es

Anexo E

FICHA TECNICA: TRAMPA DE CONDENSADOS



GAS CONTROL

VAREC BIOGAS 233 Series CONDENSATE AND SEDIMENT TRAP

The 233 Series is designed to remove liquid and solids from wet, dirty waste gas, assisting in protecting downstream equipment from corrosion, clogging, or water hammer.

Introduction

The Varec Biogas 233 Series Condensate and Sediment Trap should be installed immediately downstream from each digester to remove the large volume of water which condenses when the gas cools as it exits the digester. In addition, sediment which is entrained in the gas will drop out and accumulate in the trap, protecting downstream equipment from damage caused by solids. Varec Biogas Model 233 Condensate and Sediment Traps may be installed at other locations in the gas system where large volumes of water must be removed.

These sediment traps are designed for working pressures up to 25 psig (172 kPa).
NOTE: When a Varec Biogas Drip Trap is installed, the pressure rating of the drip trap determines the maximum allowable working pressure for the assembled unit.

Operation

Condensate and sediment are removed automatically from the waste gas as it flows through the Varec Biogas 233 Sediment Trap. Such removal is accomplished by the combination of centrifugal force and a sharp drop in velocity as the gas enters the trap.

The condensate/sediment trap features a large reservoir capacity with the inlet flange designed to swirl the gas and an internal baffle located at the base of the reservoir to provide efficient separation of entrained solids. Storage capacity is a minimum of six gallons sediment and six gallons condensate. Consult factory for larger capacities.

A removable top cover provides interior access and includes an integral 3/4-inch NPT inspection pipe for measurement of the condensate and sediment. A large, 2-inch blowout and drain connection allows accumulated sediment to be easily cleaned from the trap.

Design Features

- Large Reservoir Capacity
- Welded Steel Construction
- Galvanized Finish, Epoxy Coated Internals, Stainless Steel (Optional)
- Easily Cleaned
- 25 psi Working Pressure

Materials of Construction

The Varec Biogas Model 233 Sediment Trap can be provided in the following materials:

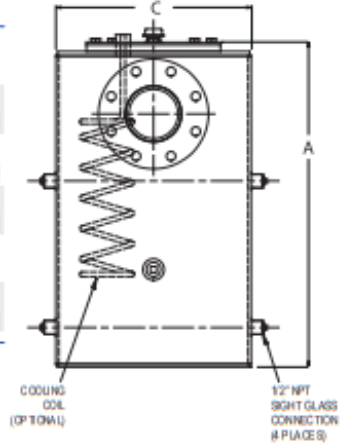
- Carbon Steel Construction with External Rust Inhibitive Primer Finish
- Carbon Steel Construction with Epoxy Coated Internals and External Rust Inhibitive Primer Finish
- Hot Dipped Galvanized Carbon Steel
- All Stainless Steel



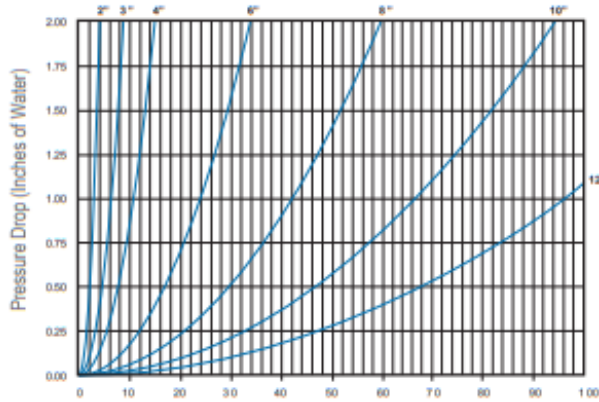
Specifications

Dimensions and Weights, inches [mm] and lbs. (kg)

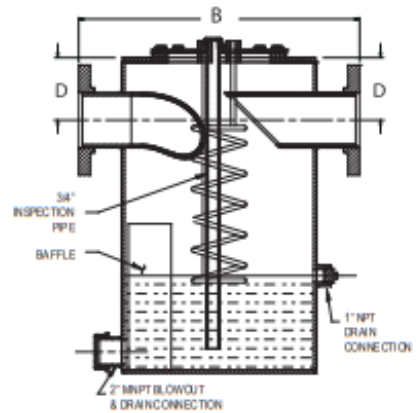
Size Code	02	03	04	06	08	10	12	14	16
Nominal Pipe Size	2	3	4	6	8	10	12	14	16
	[50]	[75]	[100]	[150]	[200]	[250]	[305]	[356]	[406]
A	26 1/8 [664]	26 1/8 [664]	26 1/8 [664]	31 1/8 [791]	37 1/16 [957]	37 1/16 [957]	49 15/16 [1268]	68 1/2 [1740]	68 1/2 [1740]
B	22 1/2 [571]	23 [584]	23 [584]	27 [686]	39 [991]	39 [991]	48 [1219]	68 [1727]	68 [1727]
C	16 [406]	16 [406]	16 [406]	20 [508]	30 [762]	30 [762]	38 [965]	52 [1321]	52 [1321]
D	3 7/8 [98]	4 9/16 [117]	5 3/16 [137]	6 3/8 [162]	6 7/16 [164]	7 1/16 [179]	9 3/16 [233]	15 9/16 [397]	15 9/16 [397]
Shipping Weight	140 [73]	145 [77]	175 [84]	265 [125]	350 [34.5]	450 [381]	1150 [592]	2557 [1160]	2637 [1196]



Flow Curves 233 SERIES



Thousand Cubic Feet/Hour at 60°F and 14.7 psia, Air Flow (SCFH)
NOTE: Consult factory for pressure loss on 14\" and 16\" sizes.



Optional Accessories

The following items must be ordered separately:

Drip Trap

For convenient & safe removal of the accumulated condensate, a Varec Biogas Model 246, 246AT, 247, or 247AT Drip Trap, should be specified for field installation on each sediment trap. See the product data sheets for 246 Series and 247 Series Drip Traps for information. Sediment Traps include the necessary 1\" NPT connection.

Cooling Coil

To allow for further condensation of the saturated digester gas, the unit can be fitted with a cooling coil that runs through the center of the vessel. This will allow for cooling water (supplied by others) to run continuously through the coil and assist in condensation of the digester gas for collection and removal. The Cooling Coil is 3/8\" 316 SS Tubing. Consult factory for additional information on the cooling coil option.

Sight Glass

For a quick external check of the condensate level, a Varec Biogas Model 218 Sight Glass should be specified for field installation. For ease of installation, two 1/2\" NPT connections are provided on each sediment trap. Varec Biogas Sight Glass assembly includes two bronze isolation valves and drain cock. The 5/8\" O.D. glass sight tube is protected on each side by a brass guard rod. The sight Glass can also be supplied with stainless steel isolation valves, drain cock and guard rods (PN: 2181)

Varec Biogas reserves the right to change product design and specifications without notice.
Copyright © 2015 by Varec Biogas a Division of Westech Industrial Inc.

Anexo F

PLANTAS DE LÓBULO ROTATIVO

Soluciones especiales para cada aplicación

Robox Bio&Gas

Robox Bio&Gas está especialmente desarrollado para el transporte y la compresión de biogás, así como de gases naturales y de vertedero, y gases especiales en aguas residuales, generación de energía y aplicaciones industriales.

- Fiable
- Seguro
- Resistente
- Gama completa de accesorios
- Certificación ATEX
- Soluciones personalizadas para diferentes aplicaciones de biogás



Presión hasta 1.000 mbar(g)
vacío hasta 500 mbar(g)
Caudal hasta 2.850 m³/h

CRBIO - GRBIO

Grupo de soplantes montado sobre un skid y disponibles con transmisión por correa o directamente acoplados. Los grupos CRBIO - GRBIO están certificados según la directiva más importante y reciente CE 94/9/CE (ATEX) - grupo II en la categoría 2, con el fin de garantizar el mejor uso de seguridad en este campo de aplicación.

Presión hasta 400 mbar(g)
vacío hasta 500 mbar(g)
Caudal hasta 2.850 m³/h



Robox Aqua

Robox Aqua es un grupo compacto de soplante de lóbulo rotativo, diseñado específicamente para las necesidades de la industria de la acuicultura.

- Diseño modular
- Acoplamiento directo
- Niveles de ruido reducidos
- Requiere poco espacio
- Facilidad de acceso

Presión hasta 1.000 mbar(g)
Caudal hasta 700 m³/h
Potencia del motor hasta 30 kW



Robox Lobe Prestaciones

ROBOX		FUNCIONAMIENTO							
		DATOS DE PRESIÓN MÁX.				DATOS DE VACÍO			
ROBOX Dimensiones	Dimensiones de la soprante	Presión	Caudal	Motor	Ruido	Vacío	Caudal	Motor	Ruido
		mbar (g)	m ³ /h	kW	dB (A)	mbar (g)	m ³ /h	kW	dB (A)
1	ES 15	900	34.0	11	<70	500	235	11	<70
	ES 25	700	320		70	500	300		<70
2	ES 35	1000	480	22	73	500	480	18,5	70
	ES 45	1000	690	30	76	500	690		73
	ES 46	700	1080		75	500	1050	30	72
	ES 55	1000	1010	45	76	500	1010		73
	ES 65	1000	1070		77	500	1390	45	74
3	ES 65	1000	1370	55	77	-	-	45	-
	ES 66	700	1950		77	500	1850		73
	ES 75	1000	1600	75	76	500	1990	55	76
	ES 85	1000	2850	90	77	500	2330		74
	ES 86	700	2360	75	77	500	3000	75	78
	ES 95	1000	2590	90	77	500	2590		75
4	ES 86	700	3100	90	76	-	-	75	-
	ES 105	1000	3370	132	78	500	3370		76
	ES 106	700	4710		78	500	4500	110	78
	ES 115	1000	4025	160	77	500	4025	90	76
	ES 125	1000	5190	200	78	500	5190	110	78
	ES 126	700	5300	160	78	500	7200	160	77
	ES 135	1000	5400	200	78	500	5400	110	76
5	ES 126	700	7360	250	78	-	-	-	-
	ES 145	1000	8000	315	78	500	8000	200	79
	ES 155	700	10300	315	78	500	10300	200	79
	ES 165	1000	10400	400	81	500	10400	250	82

CRBS - GRBS Prestaciones

GRBS-CRBS		FUNCIONAMIENTO							
		DATOS DE PRESIÓN MÁX.				DATOS DE VACÍO			
Dimensiones de la soprante	Presión	Caudal	Motor	Ruido	Vacío	Motor	Motor	Ruido	
	mbar (g)	m ³ /h	kW	dB (A)	mbar (g)	m ³ /h	kW	dB (A)	
165	1000	10420	400	84	500	10430	250	84	
175	1000	14420	550	85	500	14430	315	85	
205	1000	16430	600	84	500	16440	355	84	
225	700	24870	650	84	450	24580	450	84	

Prestaciones relacionadas con el aire atmosférico: presión absoluta 1.013 mbar, temperatura 20°C, humedad relativa 50 %, peso específico 1,2 kg/m³

Anexo G

MOTORES DE COMBUSTIÓN

El funcionamiento de esta clase de motores se inicia originando el cuerpo de trabajo inicial, el cual se produce por la mezcla de aire y combustible en el interior del cilindro. Seguidamente el cuerpo de trabajo se somete a calor, ocasionando que entre en combustión debido a una chispa proporcionada por una bugía ubicada en la parte superior del cilindro, lo que genera un nuevo cuerpo de trabajo formado por gases de combustión, los cuales, al querer expandirse, provocan que el pistón del cilindro se mueva, y por medio de una biela conectada al pistón se trasmite ese movimiento al cigüeñal haciendo que se transforme parte de la energía química del combustible en energía mecánica. [39]

Dentro del funcionamiento de los motores de combustión interna se presentan cuatro procesos los cuales se explican a continuación. [39]

- Proceso de admisión: se succiona una mezcla de combustible con aire que se denomina cuerpo de trabajo.
- Proceso de compresión: el cuerpo de trabajo se comprime y eleva su temperatura.
- Proceso de expansión: el cuerpo de trabajo entra en combustión y se expande dentro del cilindro.
- Proceso de escape: Se trasmite al ambiente el desecho del proceso.

1. TIPOS DE MOTORES DE COMBUSTION

1.1 MOTORES DE CICLO OTTO

La compresión se realiza sobre la mezcla aire-combustible y el encendido se provoca con una chispa eléctrica producida en la bujía. Cuando se utiliza biogás, el rendimiento es muy adecuado ya que su potencia máxima solo disminuye entre un 20% y un 30%. Estos motores requieren ser encendidos con nafta o gasolina, para después ser reemplazados hasta un 100% por biogás, además deben adecuar reemplazando el carburador convencional por un mezclador de gases a alta presión. [39]

1.2 MOTORES CICLO DIESEL

El aire es comprimido a presión y temperaturas altas haciendo que la combustión ocurra espontáneamente cuando se inyecta el combustible. Estos motores no permiten el cambio total a biogás, debido a que la mezcla biogás- aire comprimida no detona y necesita de la inyección de otro combustible. Además de ser los más utilizados para generar electricidad, también pueden ser utilizados en otras aplicaciones como el bombeo de agua, entre otros. [39]

1.3 MOTORES DE GAS

Estos motores han sido desarrollados para funcionar de acuerdo al principio de Otto. Estos motores no necesitan grandes cambios para su operación con biogás y además el gas natural puede ser 100% sustituido. [39]

Anexo H

FICHA TÉCNICA: CATERPILLAR

RENDIMIENTO DE LOS PRODUCTOS DE 50HZ: BIOGÁS									
DATOS FÍSICOS		G3508A		G3512A		G3516A		G3520C	
UNIDADES		G3508A		G3512A		G3516A		G3520C	
Calibre / cámara	mm / pulg.	170 / 190	6,7 / 7,5	170 / 190	6,7 / 7,5	170 / 190	6,7 / 7,5	170 / 190	6,7 / 7,5
Cilindrada	l / pulg. ³	35,0	2165	52,0	3158	68,0	4210	86,0	5286
Velocidad	rpm	1500		1500		1500		1500	
Longitud ^h	mm / pulg.	3874	145	4320	171	4906	193	4906	193
Ancho ^h	mm / pulg.	2156	85	2100	85	2155	85	2155	85
Altura ^h	mm / pulg.	2126	84	2060	81	2051	82	2254	89
Peso en seco del grupo electrógeno	kg / lb	7,842	16,850	9,181	20,201	17,624	38,303	17,778	39,200
RENDIMIENTO									
UNIDADES		G3508A		G3512A		G3516A		G3520C	
Ajuste de emisión (NO _x) ¹	mg/m ³ / g/bhp-h	500	1	500	1	500	1	500	1
Energía eléctrica ²	kW _e	457		777		1041		1105	
Presión efectiva promedio	bar / lb/pulg. ²	12,4	180	12,4	180	12,4	180	12,4	180
Rendimiento térmico ³	kW _t / Btu/h	716	40,726	1,310	74,480	1,556	84,475	1,245	70,803
Eficiencia eléctrica ³	%	38,1		30,8		32,1		36,8	
Eficiencia térmica ³	%	49,3		52,7		47,0		41,5	
Eficiencia total	%	78,4		83,5		79,1		78,3	
No. de ref. Cat.	DTO / DMBR16	DTO / DMBR12		DTO / DMBR16		DTO / DMBR16		DTO / DMBR20	

RENDIMIENTO DE LOS PRODUCTOS DE 60HZ: BIOGÁS									
DATOS FÍSICOS		G3508A		G3512A		G3516A		G3520C	
UNIDADES		G3508A		G3512A		G3516A		G3520C	
Calibre / cámara	mm / pulg.	170 / 190	6,7 / 7,5	170 / 190	6,7 / 7,5	170 / 190	6,7 / 7,5	170 / 190	6,7 / 7,5
Cilindrada	l / pulg. ³	35,0	2165	52,0	3158	68,0	4210	86,0	5286
Velocidad	rpm	1200		1200		1200		1200	
Longitud ^h	mm / pulg.	3844	155	3944	155	4320	170	4913	193
Ancho ^h	mm / pulg.	1726	68	1726	68	2284	90	1726	68
Altura ^h	mm / pulg.	2007	79	2126	84	1940	76	1940	76
Peso en seco del grupo electrógeno	kg / lb	7,813	16,800	9,191	20,201	12,540	27,670	12,540	27,670
RENDIMIENTO									
UNIDADES		G3508A		G3512A		G3516A		G3520C	
Ajuste de emisión (NO _x) ¹	mg/m ³ / g/bhp-h	659	2	759	2	787	2	500	1
Energía eléctrica ²	kW _e	468		615		824		1015	
Presión efectiva promedio	bar / lb/pulg. ²	12,4	180	12,4	180	12,4	180	15,2	221
Rendimiento térmico ³	kW _t / Btu/h	592	33,840	1,018	57,520	1,266	71,985	1,145	65,125
Eficiencia eléctrica ³	%	32,2		28,6		31,0		36,1	
Eficiencia térmica ³	%	45,8		48,1		47,6		39,9	
Eficiencia total	%	78,0		77,7		78,6		78,0	
No. de ref. Cat.	DTO / DMBR27	DTO / DMBR12-00		DTO / DMBR16-00		DTO / DMBR16-00		DTO / WGT-2600-8021	

Anexo I

TABLAS DE ESTIMACIÓN ANUAL DE CONSUMO DE ENERGÍA

Tasa de consumo anual de energía por estrato en MWh

Año	Consumo Anual [MWh]	E1	E2	E3	E4	E5	E6
2020	39817,366	4006,67	5810,18	11484,49	13603,32	1948,74	2963,96
2021	40374,810	4062,76	5891,52	11645,28	13793,77	1976,03	3005,45
2022	40940,057	4119,64	5974,00	11808,31	13986,88	2003,69	3047,53
2023	41513,218	4177,32	6057,64	11973,63	14182,70	2031,74	3090,19
2024	42094,403	4235,80	6142,45	12141,26	14381,26	2060,19	3133,46
2025	42683,724	4295,10	6228,44	12311,24	14582,59	2089,03	3177,33
2026	43281,297	4355,23	6315,64	12483,59	14786,75	2118,28	3221,81
2027	43887,235	4416,20	6404,06	12658,36	14993,76	2147,93	3266,91
2028	44501,656	4478,03	6493,71	12835,58	15203,68	2178,00	3312,65
2029	45124,679	4540,72	6584,63	13015,28	15416,53	2208,50	3359,03
2030	45756,425	4604,29	6676,81	13197,49	15632,36	2239,41	3406,05
2031	46397,015	4668,75	6770,29	13382,26	15851,21	2270,77	3453,74

2032	47046,573	4734,12	6865,07	13569,61	16073,13	2302,56	3502,09
2033	47705,225	4800,39	6961,18	13759,58	16298,15	2334,79	3551,12
2034	48373,098	4867,60	7058,64	13952,22	16526,33	2367,48	3600,84
2035	49050,321	4935,75	7157,46	14147,55	16757,70	2400,62	3651,25
2036	49737,026	5004,85	7257,66	14345,61	16992,30	2434,23	3702,36
2037	50433,344	5074,91	7359,27	14546,45	17230,20	2468,31	3754,20
2038	51139,411	5145,96	7462,30	14750,10	17471,42	2502,87	3806,76
2039	51855,363	5218,01	7566,77	14956,60	17716,02	2537,91	3860,05
2040	52581,338	5291,06	7672,71	15166,00	17964,04	2573,44	3914,09
2041	53317,477	5365,13	7780,12	15378,32	18215,54	2609,47	3968,89
2042	54063,921	5440,24	7889,05	15593,62	18470,56	2646,00	4024,45
2043	54820,816	5516,41	7999,49	15811,93	18729,15	2683,04	4080,80
2044	55588,308	5593,64	8111,49	16033,29	18991,35	2720,61	4137,93
2045	56366,544	5671,95	8225,05	16257,76	19257,23	2758,70	4195,86
2046	57155,676	5751,36	8340,20	16485,37	19526,83	2797,32	4254,60
2047	57955,855	5831,88	8456,96	16716,16	19800,21	2836,48	4314,16
2048	58767,237	5913,52	8575,36	16950,19	20077,41	2876,19	4374,56
2049	59589,978	5996,31	8695,41	17187,49	20358,50	2916,46	4435,81

2050	60424,238	6080,26	8817,15	17428,12	20643,52	2957,29	4497,91
-------------	-----------	---------	---------	----------	----------	---------	---------

Fuente: Autores

Costos pagados por usuarios por energía consumida

Año	Consumo Anual [MWh]	E1	E2	E3	E4	E5	E6	Total
2020	39817,366	\$ 935.877.708	\$ 1.696.456.080	\$ 246.383.177	\$ 341.020.961	\$ 1.365.602.070	\$ 2.077.022.653	\$ 6.662.362.649,54
2021	40374,810	\$ 949.052.313	\$ 1.720.311.334	\$ 246.392.012	\$ 341.031.356	\$ 1.384.755.673	\$ 2.106.154.468	\$ 6.747.697.155,34
2022	40940,057	\$ 962.412.375	\$ 1.744.502.030	\$ 246.400.848	\$ 341.041.750	\$ 1.404.177.918	\$ 2.135.694.876	\$ 6.834.229.796,99
2023	41513,218	\$ 975.960.504	\$ 1.769.032.885	\$ 246.409.683	\$ 341.052.145	\$ 1.423.872.574	\$ 2.165.649.610	\$ 6.921.977.400,51
2024	42094,403	\$ 989.699.348	\$ 1.793.908.681	\$ 246.418.518	\$ 341.062.540	\$ 1.443.843.461	\$ 2.196.024.480	\$ 7.010.957.028,19
2025	42683,724	\$ 1.003.631.592	\$ 1.819.134.268	\$ 246.427.354	\$ 341.072.934	\$ 1.464.094.454	\$ 2.226.825.379	\$ 7.101.185.981,95
2026	43281,297	\$ 1.017.759.958	\$ 1.844.714.567	\$ 246.436.189	\$ 341.083.329	\$ 1.484.629.482	\$ 2.258.058.283	\$ 7.192.681.806,68
2027	43887,235	\$ 1.032.087.205	\$ 1.870.654.563	\$ 246.445.025	\$ 341.093.724	\$ 1.505.452.528	\$ 2.289.729.250	\$ 7.285.462.293,68
2028	44501,656	\$ 1.046.616.135	\$ 1.896.959.315	\$ 246.453.860	\$ 341.104.118	\$ 1.526.567.632	\$ 2.321.844.424	\$ 7.379.545.484,05
2029	45124,679	\$ 1.061.349.586	\$ 1.923.633.951	\$ 246.462.695	\$ 341.114.513	\$ 1.547.978.890	\$ 2.354.410.037	\$ 7.474.949.672,30
2030	45756,425	\$ 1.076.290.437	\$ 1.950.683.674	\$ 246.471.531	\$ 341.124.908	\$ 1.569.690.456	\$ 2.387.432.405	\$ 7.571.693.409,83
2031	46397,015	\$ 1.091.441.607	\$ 1.978.113.757	\$ 246.480.366	\$ 341.135.302	\$ 1.591.706.542	\$ 2.420.917.935	\$ 7.669.795.508,57
2032	47046,573	\$ 1.106.806.056	\$ 2.005.929.547	\$ 246.489.202	\$ 341.145.697	\$ 1.614.031.419	\$ 2.454.873.124	\$ 7.769.275.044,62
2033	47705,225	\$ 1.122.386.788	\$ 2.034.136.470	\$ 246.498.037	\$ 341.156.092	\$ 1.636.669.418	\$ 2.489.304.557	\$ 7.870.151.361,99
2034	48373,098	\$ 1.138.186.846	\$ 2.062.740.024	\$ 246.506.872	\$ 341.166.486	\$ 1.659.624.931	\$ 2.524.218.916	\$ 7.972.444.076,34
2035	49050,321	\$ 1.154.209.318	\$ 2.091.745.788	\$ 246.515.708	\$ 341.176.881	\$ 1.682.902.411	\$ 2.559.622.973	\$ 8.076.173.078,79

2036	49737,026	\$ 1.170.457.335	\$ 2.121.159.415	\$ 246.524.543	\$ 341.187.276	\$ 1.706.506.374	\$ 2.595.523.597	\$ 8.181.358.539,81
2037	50433,344	\$ 1.186.934.071	\$ 2.150.986.642	\$ 246.533.378	\$ 341.197.670	\$ 1.730.441.399	\$ 2.631.927.752	\$ 8.288.020.913,12
2038	51139,411	\$ 1.203.642.746	\$ 2.181.233.284	\$ 246.542.214	\$ 341.208.065	\$ 1.754.712.130	\$ 2.668.842.501	\$ 8.396.180.939,68
2039	51855,363	\$ 1.220.586.625	\$ 2.211.905.238	\$ 246.551.049	\$ 341.218.460	\$ 1.779.323.275	\$ 2.706.275.005	\$ 8.505.859.651,73
2040	52581,338	\$ 1.237.769.019	\$ 2.243.008.486	\$ 246.559.885	\$ 341.228.854	\$ 1.804.279.608	\$ 2.744.232.526	\$ 8.617.078.376,87
2041	53317,477	\$ 1.255.193.285	\$ 2.274.549.091	\$ 246.568.720	\$ 341.239.249	\$ 1.829.585.971	\$ 2.782.722.427	\$ 8.729.858.742,20
2042	54063,921	\$ 1.272.862.827	\$ 2.306.533.203	\$ 246.577.555	\$ 341.249.644	\$ 1.855.247.273	\$ 2.821.752.176	\$ 8.844.222.678,55
2043	54820,816	\$ 1.290.781.099	\$ 2.338.967.059	\$ 246.586.391	\$ 341.260.038	\$ 1.881.268.493	\$ 2.861.329.345	\$ 8.960.192.424,72
2044	55588,308	\$ 1.308.951.601	\$ 2.371.856.982	\$ 246.595.226	\$ 341.270.433	\$ 1.907.654.679	\$ 2.901.461.611	\$ 9.077.790.531,84
2045	56366,544	\$ 1.327.377.884	\$ 2.405.209.386	\$ 246.604.062	\$ 341.280.828	\$ 1.934.410.949	\$ 2.942.156.760	\$ 9.197.039.867,69
2046	57155,676	\$ 1.346.063.548	\$ 2.439.030.773	\$ 246.612.897	\$ 341.291.222	\$ 1.961.542.495	\$ 2.983.422.686	\$ 9.317.963.621,24
2047	57955,855	\$ 1.365.012.246	\$ 2.473.327.737	\$ 246.621.732	\$ 341.301.617	\$ 1.989.054.579	\$ 3.025.267.396	\$ 9.440.585.307,06
2048	58767,237	\$ 1.384.227.678	\$ 2.508.106.967	\$ 246.630.568	\$ 341.312.012	\$ 2.016.952.539	\$ 3.067.699.007	\$ 9.564.928.769,98
2049	59589,978	\$ 1.403.713.599	\$ 2.543.375.243	\$ 246.639.403	\$ 341.322.406	\$ 2.045.241.788	\$ 3.110.725.750	\$ 9.691.018.189,68
2050	60424,238	\$ 1.423.473.818	\$ 2.579.139.442	\$ 246.648.238	\$ 341.332.801	\$ 2.073.927.812	\$ 3.154.355.974	\$ 9.818.878.085,40

Fuente: Autores

Anexo J

PARÁMETROS METEOROLÓGICO

Radiación solar global horizontal en Girón-Santander en kWh/m²

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	152,73	148,81	178,75	155,57	170,46	154,59	166,28	161,9	151,23	162,32	144,03	154,08
2006	159,46	163,07	158,62	146,84	171,05	153,5	149,1	165,82	158,5	152,68	147,82	151,18
2007	174,28	169,19	163,56	159,16	157,52	143,58	157,07	146,08	155,98	160,63	147,19	136,71
2008	166,7	157,72	174,09	158,26	162,89	151	155,28	159,53	155,53	157,59	134,79	150,26
2009	158,91	137,73	150,53	153,8	164,98	158,4	151,59	165,37	162,87	158,55	157,9	165,27
2010	187,98	144,79	159,26	153,21	154,74	149,3	154,82	151,59	150,8	161,47	138,18	144,77
2011	168,8	149,57	154,44	158,01	153,63	153,83	151,98	166,08	156,12	152,73	142,35	142,44
2012	164,17	167,69	165,7	157,59	161,67	153,96	156,8	164,24	93,21	169,31	159,23	157,83
2013	174,55	149,99	166,56	163,18	161,6	155,98	161,46	164,52	158,57	150,77	145,49	156,13
2014	167	156,75	186,9	171,84	168,69	149,08	158,3	157,12	153,73	151,26	149,28	162,73
2015	181,12	154,38	175,04	163,07	175,59	155,32	160,73	162,8	172,84	164,12	144,59	165,61
Promedio	168,70	154,52	166,68	158,23	163,89	152,59	156,67	160,46	151,76	158,31	146,44	153,36

Fuente: [51]

Índice radiación difusa/radiación solar global horizontal en Girón-Santander

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

2005	0,47	0,45	0,51	0,6	0,51	0,57	0,51	0,57	0,6	0,54	0,51	0,44
2006	0,42	0,41	0,57	0,58	0,48	0,53	0,6	0,51	0,54	0,56	0,53	0,48
2007	0,35	0,36	0,55	0,6	0,59	0,57	0,53	0,59	0,53	0,49	0,48	0,51
2008	0,42	0,47	0,52	0,57	0,56	0,54	0,58	0,54	0,53	0,49	0,56	0,49
2009	0,46	0,54	0,6	0,59	0,53	0,49	0,49	0,48	0,48	0,5	0,44	0,36
2010	0,3	0,51	0,56	0,58	0,54	0,54	0,56	0,58	0,55	0,52	0,57	0,48
2011	0,39	0,46	0,58	0,55	0,59	0,53	0,55	0,46	0,5	0,5	0,51	0,47
2012	0,41	0,42	0,53	0,54	0,54	0,48	0,54	0,5	0,49	0,5	0,41	0,41
2013	0,34	0,46	0,51	0,57	0,54	0,55	0,48	0,52	0,54	0,55	0,52	0,4
2014	0,39	0,44	0,44	0,5	0,49	0,54	0,5	0,53	0,51	0,55	0,5	0,39
2015	0,33	0,48	0,5	0,55	0,47	0,51	0,5	0,54	0,47	0,5	0,56	0,39
Promedio	0,389	0,455	0,534	0,566	0,531	0,532	0,531	0,529	0,522	0,518	0,508	0,438
Radiación Difusa [kWh]	65,640	70,235	88,945	89,616	87,012	81,153	83,179	84,897	79,192	82,034	74,419	67,202

Fuente: [51]

Temperatura en Girón-Santander en °C

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2005	23,4	23,0	23,5	23,4	23,2	23,1	23,3	23,0	23,1	22,4	22,4	22,2
2006	22,4	22,9	22,6	22,7	22,9	23,1	23,2	23,3	23,2	23,1	22,2	22,6

2007	23,2	23,1	23,0	22,7	22,7	22,7	22,9	22,7	22,9	22,2	22,5	22,1
2008	22,3	22,2	22,3	22,4	22,6	22,5	22,4	22,4	22,5	22,4	22,4	22,2
2009	22,2	22,4	22,7	22,9	23,0	23,1	23,0	23,2	23,5	22,9	22,7	22,7
2010	23,3	24,0	23,9	23,6	23,5	22,9	22,6	22,9	22,7	22,7	22,1	21,9
2011	22,3	22,5	22,5	22,6	23,0	23,1	22,8	23,1	23,0	22,2	22,2	22,3
2012	22,3	22,3	23,0	22,8	23,1	23,1	23,1	22,7	23,2	22,9	22,6	22,6
2013	23,0	22,8	23,3	23,2	22,9	23,3	23,3	22,9	23,0	22,8	22,4	22,5
2014	22,8	23,0	22,9	23,6	23,0	23,3	23,3	23,1	23,2	22,6	22,5	22,5
2015	22,8	22,8	23,0	23,1	23,7	23,4	23,2	23,6	24,1	23,6	23,1	23,3
Promedio	22,7	22,8	23,0	23,0	23,1	23,1	23,0	23,0	23,1	22,7	22,5	22,4

Fuente: [51]

Anexo K

SIMULACIÓN PVSYST

PVSYST V6.88	UNAB (Colombia)	24/06/21	Página 1/4																										
Sistema Conectado a la Red: Parámetros de la simulación																													
Proyecto : Proyecto de grado																													
Sitio geográfico	Giron	País	Colombia																										
Ubicación	Latitud 7.08° N	Longitud	-73.18° W																										
Tiempo definido como	Hora Legal Huso horario UT-5	Altitud	777 m																										
	Albedo 0.20																												
Datos meteorológicos:	Giron	Meteonorm 7.2, Sat=100% - Sintético																											
Variante de simulación : Informe																													
	Fecha de simulación	24/06/21 21h05																											
Parámetros de la simulación	Tipo de sistema	No hay escenario 3D, no hay sombreados																											
Orientación plano captador	Inclinación	30°	Acimut 0°																										
Modelos empleados	Transposición	Perez	Difuso Perez, Meteonorm																										
Horizonte	Sin horizonte																												
Sombreados cercanos	Sin sombreado																												
Necesidades del usuario :	valores mensuales																												
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Ene.</th> <th>Feb.</th> <th>Mar.</th> <th>Abr.</th> <th>May.</th> <th>Jun.</th> <th>Jul.</th> <th>Ago.</th> <th>Sep.</th> <th>Oct.</th> <th>Nov.</th> <th>Dic.</th> <th>Año</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1825</td> <td>1648</td> <td>1825</td> <td>1766</td> <td>1825</td> <td>1766</td> <td>1825</td> <td>1825</td> <td>1766</td> <td>1825</td> <td>1766</td> <td>1825</td> <td>21486 kWh/mth</td> </tr> </tbody> </table>	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año	1825	1648	1825	1766	1825	1766	1825	1825	1766	1825	1766	1825	21486 kWh/mth		
Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año																	
1825	1648	1825	1766	1825	1766	1825	1825	1766	1825	1766	1825	21486 kWh/mth																	
Características del conjunto FV																													
Módulo FV	Si-mono	Modelo	AV300M104NB-5P																										
Base de datos PVsyst original		Fabricante	Auversun																										
Número de módulos FV		En serie	10 módulos																										
Núm. total de módulos FV		Núm. módulos	100000																										
Potencia global del conjunto		Nominal (STC)	30000 kWp																										
Caract. funcionamiento del conjunto (50°C)		U mpp	499 V																										
Superficie total		Superficie módulos	163594 m ²																										
		Superficie célula	158340 m ²																										
Inversor		Modelo	CPS SC500KTL																										
Base de datos PVsyst original		Fabricante	ChintPower																										
Características		Voltaje de funcionam.	450-820 V																										
		Pnom unitaria	500 kWac																										
Paquete de inversores		Núm. de inversores	60 unidades																										
		Potencia total	30000 kWac																										
		Relación Pnom	1.00																										
Factores de pérdida del conjunto FV																													
Suciedad del conjunto		Fracción de pérdidas	2.0 %																										
Factor de pérdidas térmicas	Uc (const)	29.0 W/m ² K	Uv (viento) 0.0 W/m ² K / m/s																										
Pérdida óhmica en el Cableado	Res. global conjunto	0.15 mOhm	Fracción de pérdidas 1.5 % en STC																										
Pérdida Calidad Módulo			Fracción de pérdidas 3.0 %																										
Pérdidas de "desajuste" Módulos			Fracción de pérdidas 1.0 % en MPP																										
Pérdidas de "desajuste" cadenas			Fracción de pérdidas 0.10 %																										
Efecto de incidencia, parametrización ASHRAE	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	Parám. bo 0.05																										

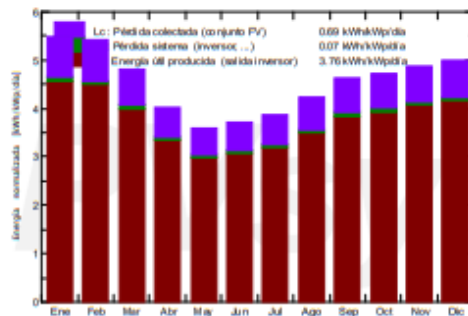
Sistema Conectado a la Red: Resultados principales

Proyecto : Proyecto de grado
Variante de simulación : Informe

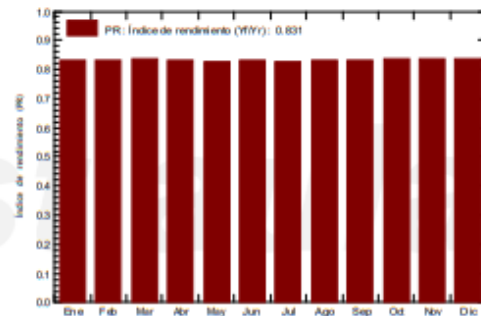
Parámetros principales del sistema	Tipo de sistema	No hay escenario 3D, no hay sombreados		
Orientación Campos FV	inclinación	30°	acimut	0°
Módulos FV	Modelo	AV300M104NB-5P	Pnom	300 Wp
Conjunto FV	Núm. de módulos	100000	Pnom total	30000 kWp
Inversor	Modelo	CPS SC500KTL	Pnom	500 kW ac
Paquete de inversores	Núm. de unidades	60.0	Pnom total	30000 kW ac
Necesidades del usuario	valores mensuales		Global	21.49 MWh/año

Resultados principales de la simulación				
Producción del sistema	Energía producida	41140 MWh/año	Produc. específica	1371 kWh/kWp/año
	Índice de rendimiento (PR)	83.14 %	Fracción solar (SF)	47.04 %

Producciones normalizadas (por kWp instalado): Potencia nominal 30000 kWp



Índice de rendimiento (PR)



Informe Balances y resultados principales

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_User MWh	E_Solar MWh	E_Grid MWh	EFrGrid MWh
Enero	149.2	67.15	21.89	169.8	162.3	4318	1.825	0.812	4239	1.013
Febrero	141.8	65.87	22.08	151.2	144.2	3836	1.648	0.746	3767	0.903
Marzo	152.5	82.24	22.20	148.7	141.0	3787	1.825	0.871	3716	0.954
Abril	139.5	66.73	21.98	120.8	113.9	3066	1.766	0.849	3007	0.917
Mayo	142.1	64.32	22.17	111.7	104.6	2823	1.825	0.878	2768	0.947
Junio	147.5	70.30	22.16	111.3	104.0	2821	1.766	0.866	2768	0.900
Julio	156.0	75.81	22.68	119.6	111.8	3027	1.825	0.905	2972	0.920
Agosto	157.5	73.65	22.67	130.6	122.6	3306	1.825	0.903	3246	0.922
Septiembre	148.6	69.58	21.97	138.9	131.5	3523	1.766	0.827	3460	0.939
Octubre	142.1	69.68	21.68	146.1	139.1	3722	1.825	0.836	3659	0.988
Noviembre	130.9	61.05	21.29	146.1	139.4	3723	1.766	0.795	3659	0.971
Diciembre	134.6	65.85	21.70	154.5	147.6	3939	1.825	0.822	3869	1.003
Año	1742.3	832.23	22.04	1649.5	1562.3	41892	21.486	10.108	41130	11.378

Legendas: GlobHor Irradiación global horizontal
 DiffHor Irradiación difusa horizontal
 T_Amb T. amb.
 GlobInc Global incidente plano receptor
 GlobEff Global efectivo, corr. para IAM y sombreados
 EArray Energía efectiva en la salida del conjunto
 E_User Energía suministrada al usuario
 E_Solar Energía del sol
 E_Grid Energía inyectada en la red
 EFrGrid Energía de la red

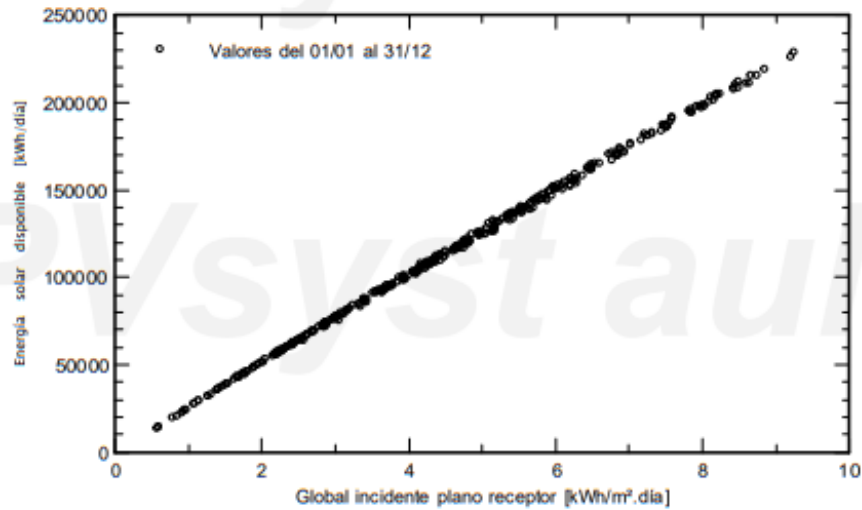
Sistema Conectado a la Red: Gráficos especiales

Proyecto : Proyecto de grado

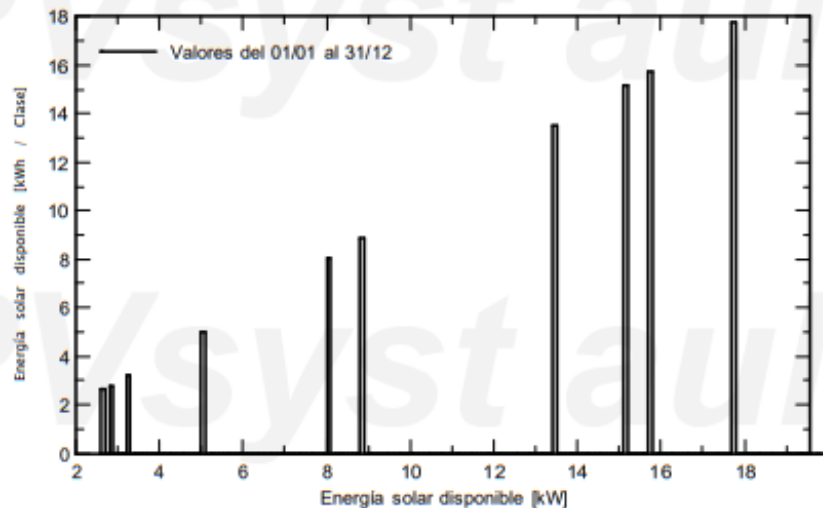
Variante de simulación : Informe

Parámetros principales del sistema	Tipo de sistema	No hay escenario 3D, no hay sombreados	
Orientación Campos FV	inclinación	30°	acimut 0°
Módulos FV	Modelo	AV300M104NB-5P	Pnom 300 Wp
Conjunto FV	Núm. de módulos	100000	Pnom total 30000 kWp
Inversor	Modelo	CPS SC500KTL	Pnom 500 kW ac
Paquete de inversores	Núm. de unidades	60.0	Pnom total 30000 kW ac
Necesidades del usuario	valores mensuales		Global 21.49 MWh/año

Diagrama entrada/salida diaria



Distribución de la potencia de salida del sistema



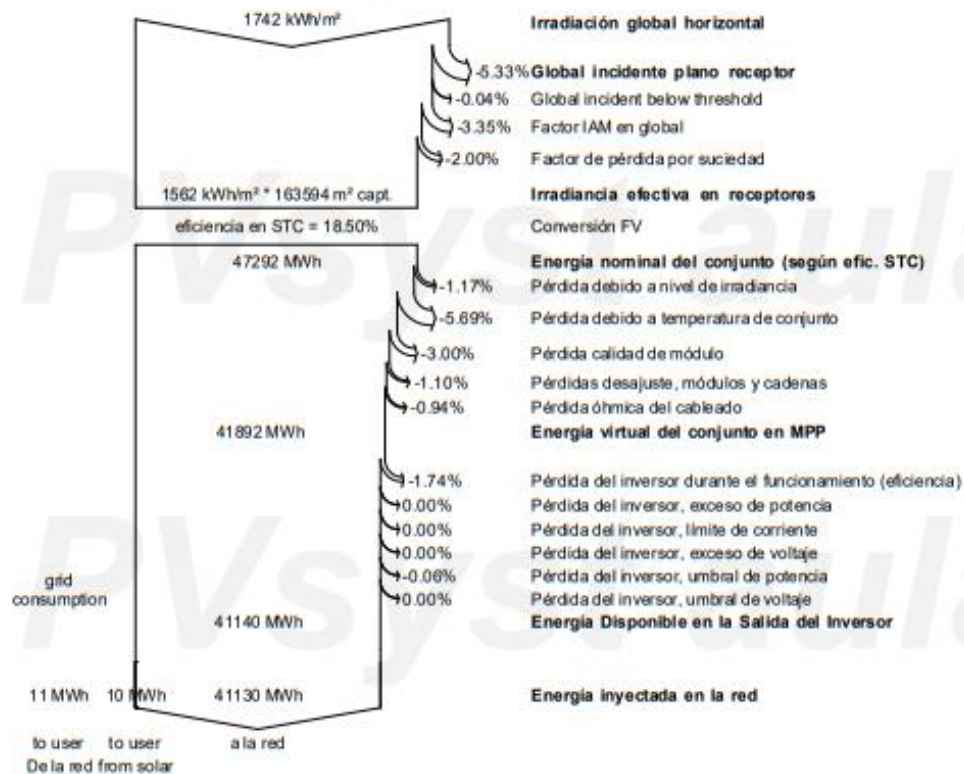
Sistema Conectado a la Red: Diagrama de pérdidas

Proyecto : Proyecto de grado

Variante de simulación : Informe

Parámetros principales del sistema	Tipo de sistema	No hay escenario 3D, no hay sombreados	
Orientación Campos FV	inclinación	30°	acimut 0°
Módulos FV	Modelo	AV300M104NB-5P	Pnom 300 Wp
Conjunto FV	Núm. de módulos	100000	Pnom total 30000 kWp
Inversor	Modelo	CPS SC500KTL	Pnom 500 kW ac
Paquete de inversores	Núm. de unidades	60.0	Pnom total 30000 kW ac
Necesidades del usuario	valores mensuales		Global 21.49 MWh/año

Diagrama de pérdida durante todo el año



BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Rico, «MONGABAY,» 6 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://es.mongabay.com/2018/06/hidroelectricas-colombia-hidroituango/>. [Último acceso: 11 Octubre 2020].
- [2] L. Fog, «PESQUINA Javeriana,» 23 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/efectos-de-hidroelectricas-urge-una-vision-integral/>. [Último acceso: 10 Octubre 2020].
- [3] H. Larrain, «Eco-antropología,» 19 Junio 2009. [En línea]. Available: <http://eco-antropologia.blogspot.com/2009/06/que-danos-provocan-las-termoelectricas.html>. [Último acceso: 11 Octubre 2020].
- [4] L. Torrado y J. Rondón, «INGEASSAS,» [En línea]. Available: <https://www.ingeassas.com/diapositivas/RELLENOS-SANITARIOS-CASO-CARRASCO.pdf>. [Último acceso: 18 Octubre 2020].
- [5] H. Velazquez, Recuperación Ambiental del Relleno Sanitario El Carrasco, vol. 1, Bucaramanga: AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES (ANLA), 2017, p. 378.
- [6] V. Gutierrez y E. Verjel, «ESTRATEGIA DE MANEJO AMBIENTAL SOBRE EL BIOGÁS EN LA FASE DE CIERRE DEL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO, BUCARAMANGA SANTANDER,» Bogota, 2019.
- [7] M. Ordoñez, «EVALUACION DE LA GENERACION DE BIOGAS EN RELLENOS SANITARIOS EN COLOMBIA EN EL MARCO DEL PROTOCOLO DE KYOTO,» 2011.
- [8] L. Cadavid y I. Bolaños, «Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana,» *Energética*, p. 7, Diciembre 2015.
- [9] A. Andrade y A. Restrepo, «Estimación de Biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia,» *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, nº 23, p. 8, 15 Enero 2018.
- [10] «HIDRONOR,» 25 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.hidronor.cl/valorizacion-energetica-del-biogas-en-el-relleno-sanitario-de-hidronor/>. [Último acceso: 02 Noviembre 2020].
- [11] F. Nogues, Energía de la biomasa. Vol. 1, vol. 1, Prensas de la Universidad de Zaragoza, p. 552.
- [12] E. Xavier, Reciclaje de residuos industriales: residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora (2a. ed.), 2 ed., Bucaramanga: Ediciones Díaz de Santos, p. 1321.
- [13] M. Seóanez, Tratado de la biomasa: con especial incidencia sobre la biomasa como fuente energética, Bucaramanga: McGraw-Hill España, p. 506.

- [14] P. Patiño, «BIOMASA: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS VEGETALES,» Bucaramanga, 2014.
- [15] «GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE LA BIOMASA EN URUGUAY. LA DENDROENERGÍA,» 2006.
- [16] B. Lalanne, «UTILIZACIÓN DE BIOMASA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA,» 2010.
- [17] M. Pérez, «PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PROCEDENTE DE VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS,» 2009.
- [18] M. Pérez, «Aplicaciones de la energía solar al tratamiento térmico de suelos de invernadero,» Córdoba, 2007.
- [19] G. González, J. Zambrano y E. Estrada, «Estudio, diseño e implementación de un sistema de energía solar en la comuna puerto roma de la isla Mondragón del golfo de Guayaquil, Provincia de Guayas,» Guayaquil, 2014.
- [20] E. Martínez, D. Daza y P. Tello, «Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe 2010,» 2009.
- [21] C. Suárez, «Problemática y gestión de residuos sólidos peligrosos en Colombia,» *INNOVAR*, p. 13, 2000.
- [22] A. Herguedas, C. Taranco, E. Rodríguez y P. Prieto, BIOMASA, BIOCOMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD, Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT, 2012, p. 216.
- [23] E. Cerdá, «Energía obtenida a partir de biomasa,» *Cuadernos Económicos de ICE*, nº 83, p. 24, 07 Mayo 2016.
- [24] J. Hernández, «DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS GENERADOS POR EL GANADO VACUNO EN LA VAQUERÍA 101 PERTENECIENTE A LA EMPRESA PECUARIA "CAMILO CIENFUEGOS" (PINAR DEL RÍO, CUBA),» Pamplona, 2014.
- [25] LFG Energy Project Development Handbook, 2020, p. 139.
- [26] D. López, «MODELO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PRODUCIDO EN RELLENOS SANITARIOS,» 2016.
- [27] «ESTUDIO BÁSICO DEL BIOGÁS,» 2011.
- [28] C. Aguilar y J. Blanco, «ESTUDIO DE LA PREFACTIBILIDAD PARA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA APROVECHANDO LA BIOMASA DEPOSITADA EN EL RELLENO SANITARIO "EL CARRASCO" TENIENDO EN CUENTA LAS ESPECIFICACIONES DE LA ENERGIA A TRANSPORTAR,» BUCARAMANGA, 2016.
- [29] L. Aguiar, B. Ramos, F. Márquez, A. Callejo y J. Pérez, «PROCESO DE PIRÓLISIS RÁPIDA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE NARANJA.

- INFLUENCIA DE FACTORES EN EL PROCESO,» *Centro Azúcar*, vol. 42, p. 9, Marzo 2015.
- [30] L. Acosta y M. Obaya, «La Digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. Parte I,» *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de*, vol. 39, nº 1, p. 14, 2005.
- [31] D. Deublein y A. Steinhauser, *Biogas from Waste and renewable Resources*, Litges & Dopf GmbH, Heppenheim, 2008, p. 450.
- [32] Comisión Europea, «Proyecto de directrices sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales,» 2020.
- [33] «CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR,» de *Termodinámica Aplicada*, p. 45.
- [34] C. Rey, C. López, E. López, J. Cabana y D. Ovalle, «DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO PARA LA CIUDAD DE BUCARAMANGA,» BUCARAMANGA, 2020.
- [35] L. Franco, M. Meza y J. Almeida, «Situación de la disposición final de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga: caso relleno sanitario El Carrasco (revisión),» Bucaramanga, 2018.
- [36] ANLA, «CONCEPTO TÉCNICO DE INICIO DE PROCEDIMIENTO SANCIONATORIO AMBIENTAL,» AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES (ANLA), 2017.
- [37] EMAB, «INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS QUE SE DISPONEN EN EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO”, BUCARAMANGA – SANTANDER.,» Bucaramanga, 2020.
- [38] Alcaldía de Bucaramanga, «ACTUALIZACIÓN PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS PGIRS,» Bucaramanga, 2016.
- [39] Y. Galvis y L. Gomez, «ESTUDIO DE VIABILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS QUE SE PRODUCE EN EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO” Y SU ADAPTABILIDAD EN UN ENTORNO DE UNA MICRORED ELÉCTRICA.,» Bucaramanga, 2014.
- [40] DANE, «DANE, INFORMACIÓN PARA TODOS,» [En línea]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>. [Último acceso: 28 Enero 2021].
- [41] A. Lecuona, «Modelización matemática de la producción de biogás en vertederos de residuos sólidos urbanos,» 2019.
- [42] V. Ludwing y L. Outreach, «Manual del Usuario Modelo Colombiano de Biogás,» 2009.
- [43] E. Behrentz, M. Espinoza, J. Márquez, E. Ortiz y L. Saavedra, «PRODUCTOS ANALÍTICOS PARA APOYAR LA TOMA DE DECISIONES SOBRE ACCIONES DE MITIGACIÓN A NIVEL SECTORIAL,» Bogotá , 2014.
- [44] D. Cruz y E. Lugo., «TEORIAS DE SIMULACION DE BIOGAS,» MEXICO D.F., 2010.
- [45] Intergovernmental Panel on Climate Change , «Capítulo 3- Eliminación de desechos sólidos,» 2006.

- [46] Aerzen, «Compresor para Biogás,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.aerzen.com/es-co/productos/compresores-de-tornillo/compresor-para-biogas.html>. [Último acceso: 05 05 2021].
- [47] R. López, Modelo colombiano del Biogás, Global Methane Initiative, 2012.
- [48] C. Perez., A. Ariza., L. Moreno., M. Castillo., M. Robayo. y S. Mantilla., «Plan de Desarrollo 2020-2023,» DANE, Bucaramanga, 2019.
- [49] J. Torres., «ESSA, Grupo EPM,» 31 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.essa.com.co/site/clientes/pagina-detalle/conoce-los-costos-del-servicio-de-energ237a-el233ctrica>. [Último acceso: 2 Junio 2021].
- [50] K. Hernández y J. Carillo, ANÁLISIS DE LA CURVA DE DEMANDA ELÉCTRICA PARA USUARIOS RESIDENCIALES ESTRATO 4 EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ ANTE DIFERENTES ESCENARIOS DE LOS HÁBITOS DE CONSUMO, Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [51] «CENTRO CIENTÍFICO DE LA UE,» 23 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>. [Último acceso: 13 Mayo 2021].
- [52] F. Albarracín. y J. Méndez., Diseño y evaluación de un sistema co-firing biomasa-Biogas en una planta extractora de aceite de palma, Bucaramanga: Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2019.
- [53] Biogás Expers, «Sopladores Atex para Biogás,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.aqualimpia.com/equipos-biodigestores/sopla1/>. [Último acceso: 05 05 2021].