



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

FIMCP

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“MAGÍSTER EN SISTEMAS DE ENERGÍA”

TEMA:

DISEÑO DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON GAS METANO PRODUCIDO POR UN RELLENO SANITARIO CON UNA DISPOSICIÓN FINAL DE 400 TON/DIARIAS DE DESECHOS SÓLIDOS RESIDENCIALES.

AUTOR:

CRISTHIAN MAURICIO VERDY VITERI

....

Guayaquil - Ecuador

2024

RESUMEN

El presente proyecto se enfoca en el aprovechamiento del metano generado por la descomposición de desechos orgánicos en rellenos sanitarios para la producción de energía eléctrica, una fuente de energía renovable subutilizada en Ecuador. La propuesta es diseñar una planta de generación eléctrica que utilice el metano producido en un relleno sanitario que reciba 400 toneladas diarias de desechos sólidos residenciales.

Los rellenos sanitarios en Ecuador enfrentan varios problemas, como la ocupación de grandes extensiones de terreno, contaminación del suelo y aire, y la falta de procesos complementarios de reciclaje. Estos desafíos representan un costo significativo para los gobiernos locales. La propuesta de este proyecto es transformar estos desafíos en una oportunidad económica mediante la construcción de una planta que utilice el metano para generar electricidad, ofreciendo así una solución rentable y sostenible.

El caso de estudio seleccionado es el relleno sanitario de Ceibales en Machala, que desde su apertura en 2010 ha aumentado su recepción de desechos a 436 toneladas diarias en 2023. Se proyecta que el relleno cerrará en 2030. El diseño de la planta de generación eléctrica se basó en datos y proyecciones del volumen de metano producido y se espera que la planta comience a operar en 2025.

El análisis de viabilidad técnica y económica determinó que la opción más rentable es el uso de motores de combustión interna (MCI) para la generación eléctrica. Esta alternativa no solo reduce la contaminación, sino que también ofrece una fuente de ingresos adicionales para el gobierno local, mejorando la gestión de residuos y la salud pública.

En conclusión, este proyecto demuestra que es viable técnica y económicamente aprovechar el metano de los rellenos sanitarios para la generación de electricidad, contribuyendo a una gestión más eficiente de los residuos sólidos y a la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles en Ecuador.

Abstract

This project focuses on the use of methane generated by the decomposition of organic waste in landfills for the production of electrical energy, an underutilized renewable energy source in Ecuador. The proposal is to design an electrical generation plant that uses methane produced in a landfill that receives 400 tons of residential solid waste per day.

Landfills in Ecuador face several problems, such as the occupation of large areas of land, soil and air contamination, and the lack of complementary recycling processes. These challenges represent a significant cost to local governments. The proposal of this project is to transform these challenges into an economic opportunity by building a plant that uses methane to generate electricity, thus offering a profitable and sustainable solution.

The selected case study is the Ceibales landfill in Machala, which since its opening in 2010 has increased its waste reception to 436 tons per day in 2023. The landfill is projected to close in 2030. The design of the electricity generation plant It was based on data and projections of the volume of methane produced and the plant is expected to begin operating in 2025.

The technical and economic feasibility analysis determined that the most profitable option is the use of internal combustion engines (ICM) for electricity generation. This alternative not only reduces pollution, but also offers a source of additional revenue for the local government, improving waste management and public health.

In conclusion, this project demonstrates that it is technically and economically viable to take advantage of methane from landfills for the generation of electricity, contributing to more efficient management of solid waste and the transition towards cleaner and more sustainable energy sources in Ecuador.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi familia, en especial a mis padres, mi responsabilidad con el apoyo que me dieron continuar multiplicándolo positivamente en cada paso de mi vida. A mi padre “Cristobal Enrique (+)” con su sencillez y amor en las cosas que emprendía. A mi madre “Fanny Judith”, su fortaleza y perseverancia para ayudar a su familia, juntos son los pilares con los que Dios siempre me ha brindado una demostración de su protección y amor.

AGRADECIMIENTO

Este programa de maestría es un gran aporte académico, en lo personal me ha ayudado a profundizar en el conocimiento de un área en la que trabajo como es el sector de generación eléctrica. Deseo extender mi agradecimiento a los Directivos de la FIMCP y la ESPOL, a todos los profesores que nos impartieron sus conocimientos, a mi Director de Tesis el Ing. Héctor Apolo, y en especial al Dr. Juan Peralta, Coordinador de la Maestría en Sistemas de Energía quien es un pilar fundamental para el éxito de este programa de estudio.

Declaración Expresa

Yo Verdy Viteri Cristhian Mauricio acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Verdy Viteri Cristhian Mauricio

Evaluadores

PhD. Juan Manuel Peralta Jaramillo

Profesor de Materia

Msc. Hector Ivan Apolo Loayza

Tutor de proyecto

ABREVIATURAS O SIGLAS

CAA - Clean Air Act (Ley de Aire Limpio de EE.UU.).

CH₄ - Metano.

CO₂ - Dióxido de carbono.

DOC - Carbono Orgánico Degradable.

DOCf - Fracción de Carbono Orgánico Biodegradable.

EOD - Energía generada a partir de biogás.

EPA - Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.).

GEI - Gases de Efecto Invernadero.

GWh - Gigavatios-hora.

INEN - Instituto Ecuatoriano de Normalización.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático).

kWh - Kilovatios-hora.

LCOE - Levelized Cost of Energy (Costo Nivelado de Energía).

MCF - Factor de Corrección de Metano.

MCI - Motor de Combustión Interna.

MG - Megagramo.

MW - Megavatio.

NOMC - Compuesto Orgánico no Metálico.

NMOC - Compuesto Orgánico No Metálico.

ppmv - Partes por millón de volumen.

RS - Relleno Sanitario.

RSU - Residuos Sólidos Urbanos.

SNI - Sistema Nacional Interconectado.

USD - Dólares de los Estados Unidos.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Matriz eléctrica del ecuador	2
1.1.2 Emisiones mundiales de metano y oportunidades para su atenuación	3
1.1.3 Costos de generación eléctrica de las tecnologías renovables en el contexto de la transición energética	5
1.2 Problema de investigación.....	8
1.2.1 Planteamiento del problema	8
1.2.2 Análisis del problema.....	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo general.....	10
1.3.2 Objetivos específicos	11
1.4 hipótesis.....	11
1.5 alcance	11
CAPÍTULO 2	12
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Marco legal ecuatoriano sobre generación eléctrica con gas metano	12
2.2. Biogás de rellenos sanitarios	13
tecnologías disponibles para aprovechamiento del biogás.....	17
2.3. Modelación de la producción de metano en un relleno sanitario	19
2.3.1 Modelos de cálculo de la producción de biogás en relleno sanitario.....	20
2.3.2 Modelo de emisiones de gases de vertedero (landgem)	21
índice de generación de metano (k).....	22
Capacidad de generación potencial de metano (L0).....	23
Concentración de compuesto orgánico no metálico (NMOC), (PPMV)	26
Contenido de metano (CH ₄), (%)	26

2.4. Valoración del potencial energético del metano y selección de la tecnología de generación eléctrica.....	26
Cálculo de energía eléctrica a obtener con el biogás.....	26
CAPÍTULO 3.....	28
3 METODOLOGÍA	28
3.1 descripción de la metodología planteada.....	28
CAPÍTULO 4.....	31
4 RESOLUCIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO	31
4.1 diseño de una central de generación eléctrica para el rs de ceibales en la ciudad de machala, el mismo que tiene un depósito diario de 400 t/día aproximadamente.....	31
4.1.1 caso de estudio rs de ceibales – alternativa 1.....	33
4.1.2 caso de estudio rs de ceibales – alternativa 2.....	43
4.1.3 caso de estudio rs de ceibales – alternativa 3.....	47
CAPÍTULO 5.....	53
5 CONCLUSIONES.....	53
REFERENCIAS	55
APÉNDICES Y ANEXOS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones antropogénicas mundiales de metano estimadas por fuente, 2020. ...	4
Figura 2. Reducción de costos unitarios y uso en algunas tecnologías de mitigación que cambian rápidamente.....	6
Figura 3. -costos totales instalados de proyectos de generación de energía mediante bioenergía por materias primas seleccionadas seleccionadas y país/región, 2010-2020. .	7
Figura 4. Producción per cápita de residuos sólidos (ppc) a nivel urbano (kg/hab/día), por regiones naturales, 2022.....	8
Figura 5. Marco legal relacionado a proyectos de generación eléctrica con recursos renovables.	12
Figura 6. Producción anaeróbica de biogás	14
Figura 7. Dibujo esquemático del aprovechamiento del biogás de un relleno sanitario en generación eléctrica	14
Figura 8. Sistema de pozos verticales.....	15
Figura 9. Sistema de pozos horizontales.....	15
Figura 10. Elementos de pozos horizontales.....	16
Figura 11. Tratamiento y usos del biogás.....	17
Figura.12. Metodología utilizada para el diseño de una planta de generación eléctrica con biogás de un relleno sanitario con 400 ton/día de rsu.....	30
Figura.13. Gráfica y ecuación de aproximación exponencial del crecimiento de los rsu hasta el año 2030.....	32
Figura 14. Ingreso de ubicación del lugar del rs en el software retscreen.....	33
Figura 15. Datos del rs de ceibales en el software retscreen.....	33
Figura 16. Ingreso de datos del rs de ceibales	33
Figura 17. Características de la generación de gas metano en el rs de ceibales.....	34
Figura 18. Curva de generación de biogás en el rs de ceibales	34
Figura 19. Condiciones de flujo de biogás de análisis considerando el año de inicio de la generación eléctrica en el año 2025.....	35
Figura 20. Selección de las unidades de generación eléctrica, utilizando las opciones que proporciona el software retscreen	36

Figura 21. Datos técnicos de equipo de generación eléctrica con motor de combustión interna.....	36
Figura 22. Información del clima en la ubicación seleccionada para el rs de ceibales	38
Figura 23. Comparación de tecnologías por el costo de producción de energía.....	39
Figura 24. Parámetros de la generación de energía con la alternativa 1	40
Figura 25. Biogás generado en el rs y el demandado para la alternativa 1.....	40
Figura 26. Análisis de gei por el aprovechamiento del recurso de biogás, alternativa 1. .	41
Figura 27. Flujo de caja de la alternativa 1.	41
Figura 28. Evaluación financiera de la planta de generación eléctrica – alternativa 1.....	42
Figura 29. Selección de una turbina a gas para el proyecto de generación eléctrica en el RS de ceibales utilizando el software retscreen	43
Figura 30. Curva de generación de biogás en el rs de ceibales para la generación eléctrica con una turbina a gas utilizando el software retscreen	44
Figura 31. Datos técnicos para la generación eléctrica con una turbina a gas utilizando el software retscreen.....	44
Figura 32. Datos técnicos para la generación eléctrica con una turbina a gas utilizando el software retscreen.....	45
Figura 33. Flujo de caja para generación eléctrica en el rs de ceibales con una turbina a gas utilizando el software retscreen	45
Figura 34. Análisis financiero para la generación eléctrica en el rs de ceibales con una turbina a gas utilizando el software retscreen.....	46
Figura 35. Mci que se va a utilizar para realizar un crecimiento de la generación eléctrica.	47
Figura 36. Extracción de puntos de la curva de generación de biogás del rs de ceibales	48
Figura 37. Requerimiento de biogás de cada mci durante el crecimiento de la generación eléctrica en el rs de ceibales.	48
Figura 38. Año de ingreso de cada mci durante el crecimiento de la generación eléctrica en el rs de ceibales.	49
Figura 39. Flujo de caja para la alternativa 3.....	50

Figura 40. Configuración de una planta de generación eléctrica con biogás de un relleno sanitario 52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Información general para planteamiento del proyecto	2
Tabla 2.	Potencia nominal y efectiva del ecuador	3
Tabla 3.	Clasificación de la disposición final de los desechos sólidos municipales en el ecuador año 2022	9
Tabla 4.	Árbol de problemas en los rellenos sanitarios de los gad año 2022	9
Tabla 5.	Precios del costo nivelado de energía por tecnología.	13
Tabla 6.	Modelos cinéticos utilizados en los modelos de biogás (oonk, 2010; karanjekar, 2012)	21
Tabla 7.	Valores para el índice de generación de metano	22
Tabla 8.	Valores para el índice de generación de metano	23
Tabla 9.	Valores para la capacidad de generación potencial de metano (L_0)	24
Tabla 10.	Estimación de valor para factor de corrección de metano	25
Tabla 11.	Información tecnológica para generación eléctrica.....	26
Tabla 12.	Poder calorífico del metano.....	27
Tabla 13.	Toneladas de basura por año que ingresaron al rs de ceibales	31
Tabla 14.	Rsu proyectados hasta el cierre del rs de ceibales en el año 2030	32
Tabla 15.	Cálculo de la energía disponible y estimación de los años de producción....	35
Tabla 16.	Ingreso de información en el software retscreen	37
Tabla 17.	Generación eléctrica de cada mci en la alternativa 3	49
Tabla 18.	Parámetros técnicos de cada mci para la alternativa 3	50
Tabla 19.	Flujo de caja para la alternativa 3.....	51

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Foto 1. Incinerador de gas metano.	18
-----------------------------------------	----

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La generación eléctrica con gas metano es un tema de gran relevancia en el ámbito energético. El gas metano es un gas natural que se encuentra en la Tierra y se obtiene principalmente a través de la descomposición de la materia orgánica. La importante capacidad energética y bajo impacto ambiental han posicionado al gas metano como una alternativa eficiente y sostenible para la producción de electricidad.

En esta Tesis se investigaron los beneficios y desafíos asociados con la generación eléctrica utilizando el gas metano como combustible, y las tecnologías que se utilizan en la actualidad. Resaltando también la importancia de la generación eléctrica con gas metano en la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables.

La fuente de gas metano que vamos a analizar se genera en los Rellenos Sanitarios donde se deposita la basura orgánica y demás desechos no peligrosos en todas las ciudades del mundo y en el Ecuador es muy poco aprovechada. El manejo de los desechos no peligrosos que todos los Municipios del País gestionan su recolección para llevarlos hacia su destino final, en el año 2022 se reportó que el 54,5% de los GADM disponen los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, el 28,2% en celdas emergentes y el 17,3% en botaderos.

Vamos a calcular cuánta es la cantidad de metano que se podría obtener si el 100% de los residuos sólidos a nivel nacional se controlara su descomposición y captación del metano para transformarlo en energía eléctrica. En otros análisis se determinará la cantidad mínima de recolección de desechos para plantear un proyecto y los lugares donde existe el potencial para desarrollar estos proyectos.¹

1.1 Antecedentes

El uso de gas metano proveniente de rellenos sanitarios para la generación de energía eléctrica no es una idea nueva. Desde hace varias décadas se han realizado investigaciones y proyectos piloto en diferentes países para aprovechar este recurso energético renovable. El desarrollo de estos proyectos en otros países tiene una gran acogida y sólo unos pocos proyectos en el Ecuador, lo cual ha demostrado que es posible capturar y tratar el gas metano generado por los desechos, convirtiéndolo en una fuente de energía limpia y sostenible. Los avances tecnológicos y las experiencias acumuladas en este campo han sentado las bases para el desarrollo y la implementación de plantas de generación eléctrica con gas metano en diversos lugares del mundo.

Existe una oportunidad de generar energía limpia que necesita mayor desarrollo en el Ecuador y la pregunta es en cuánto se cuantifica esta oportunidad energética, para lo cual se tiene que planificar en base a la cantidad de desechos que se generan en el País, ya que estos proyectos son rentables a partir de un mínimo de toneladas de desecho.

Para analizar la viabilidad de construir una planta de generación eléctrica con gas metano de un Relleno sanitario, se plantea realizar la siguiente investigación inicial:

Tabla 1. Información general para planteamiento del proyecto

Ítem	Preguntas	Respuestas
1	¿Cuáles Ministerios regulan la actividad económica del proyecto?	Ministerio del Ambiente, Ministerio de Energía y Minas.
2	Actores Involucrados	GAD, Ministerio del Ambiente, Ministerio de Energía y Minas, CENACE, CNEL.
3	¿Existen proyectos de Generación eléctrica con gas metano en el Ecuador?	Sí
4	Variables que afectan a la generación de Gas metano para extraerlo.	Tiempo de vida del RS, Temperatura ambiente y humedad
5	Métodos de cuantificación del volumen de Gas metano que se puede extraer de un RS.	Modelo LandGem, Modelo IPCC, Modelo Mexicano, uso de softwares como RetScreen.
6	Tecnologías para generar electricidad con el Gas metano.	Turbinas a Gas, Microturbinas, Motores de Combustión Interna
7	Precio de compra de la energía eléctrica generada.	70 \$ / MWh
8	Herramientas para realizar el análisis económico de la rentabilidad de la planta.	VAN, TIR

Fuente: Elaboración propia

1.1.1 Matriz eléctrica del Ecuador

Cada año la demanda de energía eléctrica en el País aumenta, de la mano de dos variables que son el crecimiento de la población y la industria ecuatoriana, en los actuales tiempos el desarrollo tecnológico trae consigo que exista un incremento adicional, así como un mayor ingreso económico para adquirir esa tecnología y los subsidios que el País tenga al precio del KWh.

El Ecuador cuenta con fuentes de energía renovables tales como: la hídrica, solar, viento, geotérmica, mareomotriz y la biomasa. Por tanto, ante un incremento de la demanda de electricidad se deben aprovechar estas fuentes naturales y desarrollarlas con bajo impacto ambiental.

En esta tesis vamos se analizó el uso de biogás para generar electricidad, ya que la materia prima es una fuente de energía disponible y muy poco utilizada. En el País esta tecnología ha incursionado muy poco, en el Plan Maestro de Electricidad del Ecuador 2022-2027, podemos observar que la Línea Base del parque generador del Ecuador al 2018 tenemos tan solo 7,26 MW de Potencia Nominal y 6,5 MW de Potencia Efectiva, lo

cual representa un 0,08 % de aporte de la electricidad disponible con esta tecnología que se tiene en el Ecuador.

Tabla 2. Potencia Nominal y Efectiva del Ecuador

Sistema	Tipo Central	Potencia Nominal		Potencia Efectiva	
		(MW)	%	(MW)	%
No Incorporado	Eólica	4,65	0,05%	4,65	0,06%
	Hidráulica	6,06	0,07%	5,79	0,07%
	Solar	3,17	0,04%	3,17	0,04%
	Térmica	1302,49	15,01%	992,14	12,31%
Total No Incorporado		1316	15,17%	1006	12,47%
S.N.I.	Biogás	7,26	0,08%	6,50	0,08%
	Biomasa	144,30	1,66%	136,40	1,69%
	Eólica	16,50	0,19%	16,50	0,20%
	Hidráulica	5065,34	58,38%	5035,14	62,45%
	Solar	24,46	0,28%	23,57	0,29%
	Térmica	2252,65	24,23%	1958,71	22,81%
Total S.N.I.		7511	84,83%	7177	87,53%
Total general		8827	100,00%	8183	100,00%

Fuente: Plan Maestro de Electricidad 2018-2027

1.1.2 Emisiones mundiales de metano y oportunidades para su atenuación

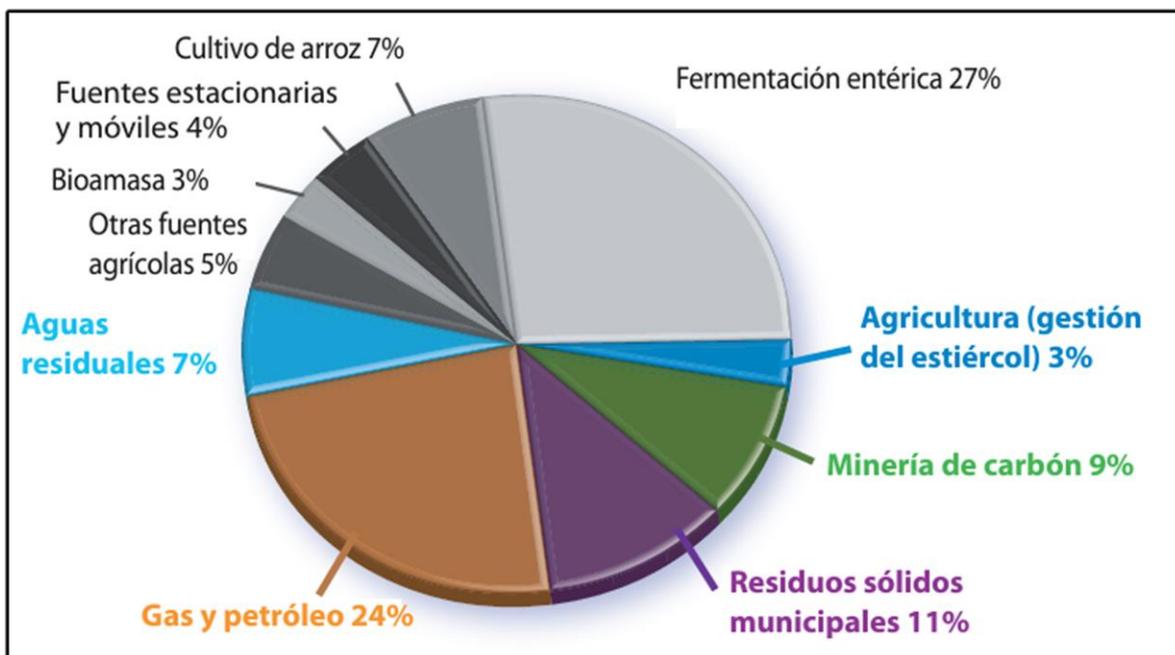
¿Qué es el metano?

El metano (CH₄) es un hidrocarburo y el principal componente del gas natural. El metano es además un potente y abundante “gas de efecto invernadero” (o GHG) el cual lo convierte en un importante contribuyente al cambio climático, especialmente a corto plazo (es decir, 10-15 años). Se genera metano en la producción y transporte de carbón, gas natural y petróleo. Las emisiones de metano también resultan de la ganadería y otras prácticas agrícolas y de la descomposición del desperdicio orgánico en los vertederos de desechos sólidos municipales y de ciertos sistemas de tratamiento de aguas de desecho (Global Methane Initiative, n.d.).

El primer puesto como gas más abundante de GEI lo tiene el dióxido de carbono (CO₂) y en segundo lugar está el metano (CH₄), aunque el metano está presente dentro del 14 por ciento de las emisiones de gases a nivel mundial y aunque es emitido a la atmósfera en cantidades más pequeñas que el CO₂, su potencial para el calentamiento global (por ejemplo, la capacidad del gas para atrapar el calor en la atmósfera) es 25 veces mayor. En consecuencia, las emisiones de metano es uno de los gases antropogénicos que con su efecto contribuye en más de un tercio del calentamiento global (Global Methane Initiative, n.d.).

¿Por qué enfocarse en el metano? El metano es el gas de efecto invernadero (GEI) antropogénico más abundante después del dióxido de carbono (CO₂), que representa alrededor de 20 por ciento de las emisiones globales. El metano es considerado un “forzador del clima a corto plazo”, lo que significa que su duración es relativamente corta en la atmósfera, con aproximadamente 12 años. Si bien el metano permanece en la atmósfera durante un período más corto de tiempo y se emite en cantidades más pequeñas que el CO₂, su potencial de calentamiento global (es decir, la capacidad del gas de atrapar calor en la atmósfera) es entre 28 y 34 veces mayor.¹ Por consiguiente, las emisiones de metano contribuyeron a un tercio del calentamiento antropogénico actual. El metano se emite durante la producción y transporte de carbón, gas natural y petróleo. Las emisiones también son el resultado de la descomposición de la materia orgánica en los vertederos de desperdicios sólidos municipales (MSW, por su sigla en inglés), algunos sistemas de almacenamiento del estiércol de ganado y ciertos sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales y agroindustriales. La captura del metano proveniente de estas fuentes ofrece una oportunidad única de mitigar el cambio climático y aumentar simultáneamente la seguridad energética, mejorar el crecimiento económico, y mejorar la calidad del aire y la seguridad laboral.

Figura 1. Emisiones Antropogénicas Mundiales de Metano Estimadas por Fuente, 2020.



Fuente: Global Methane Initiative, n.d.

La EPA emitió dos conclusiones en diciembre de 2009 que son precursores necesarios para regular las emisiones de gases de efecto invernadero bajo la Ley de Aire Limpio.

El primer hallazgo es que los siguientes seis gases de efecto invernadero:

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)

- Óxido nitroso (N₂O)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF₆)

Ponen en peligro la salud pública y el bienestar de las generaciones actuales y futuras.

El segundo hallazgo es que las emisiones de estos seis gases de efecto invernadero provenientes de vehículos motorizados nuevos causan o contribuyen a la contaminación por gases de efecto invernadero que pone en peligro la salud y el bienestar públicos.

1.1.3 Costos de generación eléctrica de las tecnologías renovables en el contexto de la transición energética

En la actualidad se habla de la transición energética, la cual propone el cambio paulatino del uso de combustibles fósiles – petróleo, carbón y gas natural, por energías renovables, tales como: solar, eólica, geotérmica, hidráulica, biomasa, biogás, etc. Sin embargo, existe una imposibilidad de sustituir en términos absolutos los combustibles fósiles por energías renovables.

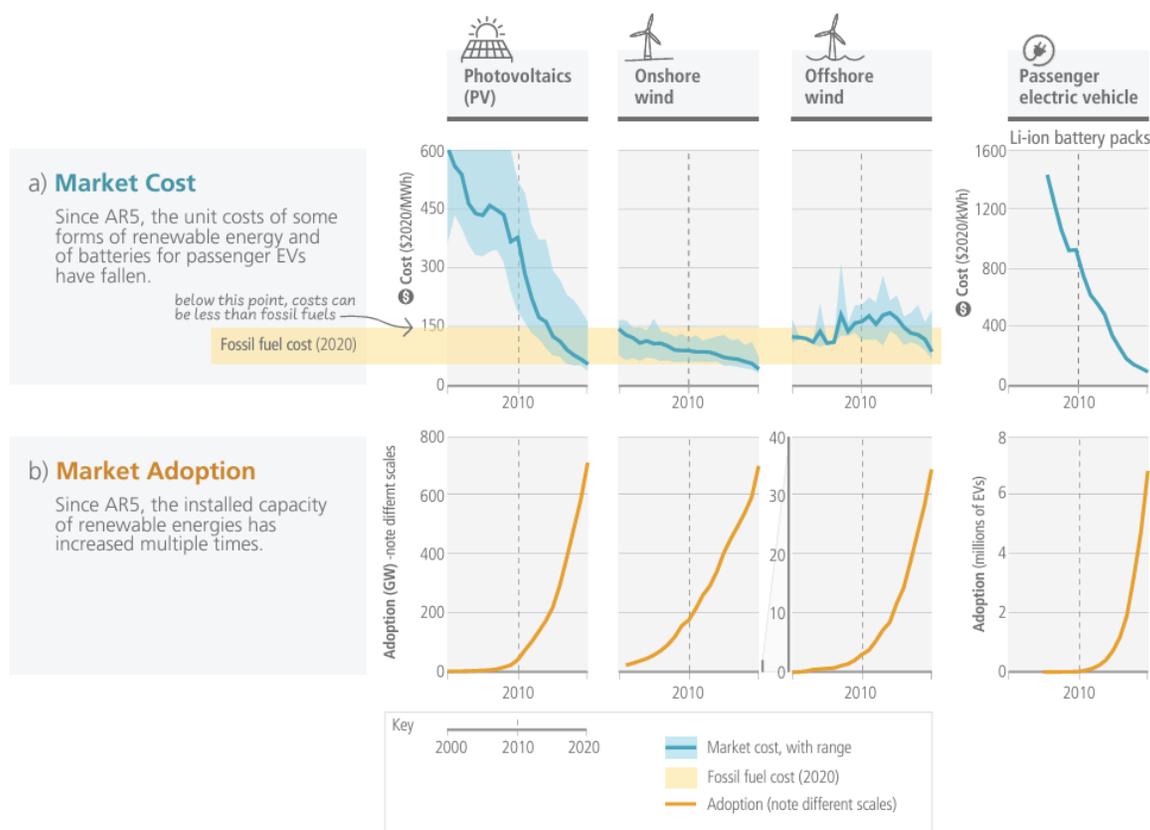
En la última década los avances tecnológicos en el uso de nuevos materiales mas económicos han logrado reducir los altos costos de implementar el uso de energías renovables, llegando a estar en un rango de costos competitivo con la tradicional fuente de tecnología con combustibles fósiles, como se puede observar en la Figura 1.

Aunque los costos de un proyecto de generación eléctrica varían según el país y la región, es claro que los costos totales instalados tienden a ser mayores en Europa y América del Norte, y menores en Asia y América del Sur (IRENA, Power Generation Costs in 2020).

Para el período 2000 a 2020, en China, el percentil 5 y 95 de los proyectos de todas las materias primas registraron costos totales de instalación que oscilaron desde un mínimo de 634 USD/kW para proyectos de cáscara de arroz, hasta un máximo de 5304 USD/kW para proyectos de energía renovable con desechos municipales. En India, el rango osciló entre un mínimo de 514 USD/kW para proyectos de bagazo y un máximo de 4356 USD/kW para proyectos de gas de relleno sanitario (IRENA, Power Generation Costs in 2020).

El rango es mayor para proyectos en Europa y América del Norte. Los costos en estas dos geografías oscilaron entre 598 USD/kW para proyectos de gas de relleno sanitario en América del Norte, hasta un máximo de 7940 USD/kW para proyectos de residuos de madera en Europa, durante el periodo en cuestión. Esto se debe a que en estas regiones las opciones tecnológicas utilizadas para desarrollar proyectos son más heterogéneas y en promedio más costosas (IRENA, Power Generation Costs in 2020).

Figura 2. Reducción de costos unitarios y uso en algunas tecnologías de mitigación que cambian rápidamente



Notas:

Fuente: Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2023 Synthesis Report.

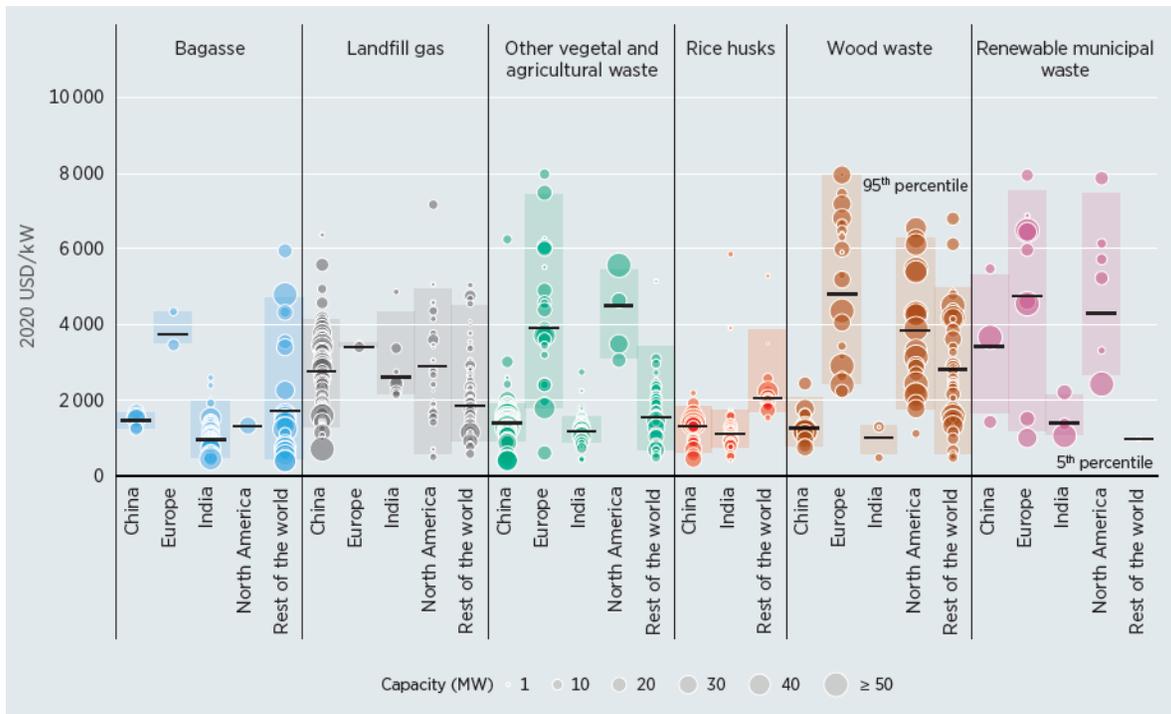
En la parte superior (a) muestra los costos globales por unidad de energía (USD por MWh) para algunas tecnologías de mitigación que cambian rápidamente. Las líneas azules continuas indican el costo unitario promedio en cada año. Las áreas sombreadas en azul claro muestran el rango entre los percentiles 5 y 95 en cada año. El sombreado amarillo indica el rango de costos unitarios de la nueva energía generada con combustibles fósiles (carbón y gas) en 2020 (correspondiente a entre 55 y 148 dólares por MWh).

En 2020, los costes nivelados de la energía (LCOE) de las tres tecnologías de energía renovable podrían competir con los combustibles fósiles en muchos lugares. Para las baterías, los costos mostrados corresponden a 1 kWh de capacidad de almacenamiento de la batería; para los demás, los costos son LCOE, que incluyen costos de instalación, capital, operaciones y mantenimiento por MWh de electricidad producida. La literatura utiliza el LCOE porque permite realizar comparaciones

consistentes de tendencias de costos en un conjunto diverso de tecnologías energéticas. Sin embargo, no incluye los costes de integración a la red ni los costos por cambio climático. Además, el LCOE no tiene en cuenta otras externalidades ambientales y sociales que pueden modificar los costos generales (monetarios y no monetarios) de las tecnologías y alterar su implementación.

El panel inferior (b) muestra la adopción global acumulada de cada tecnología, en GW de capacidad instalada para energía renovable y en millones de vehículos para vehículos eléctricos de batería. Se coloca una línea discontinua vertical en 2010 para indicar el cambio durante la última década. La participación en la producción de electricidad refleja diferentes factores de capacidad; por ejemplo, para la misma cantidad de capacidad instalada, la energía eólica produce aproximadamente el doble de electricidad que la energía solar fotovoltaica. Se seleccionaron tecnologías de energía renovable y baterías como ejemplos ilustrativos porque recientemente han mostrado rápidos cambios en los costos y la adopción, y porque hay datos consistentes disponibles. Otras opciones de mitigación evaluadas en el informe del GTIII no se incluyen porque no cumplen con estos criterios. {GTIII Figura RRP.3, GTIII 2.5, 6.4}

Figura 3. -Costos totales instalados de proyectos de generación de energía mediante bioenergía por materias primas seleccionadas y país/región, 2010-2020.



Fuente: IRENA Renewable Cost Database.

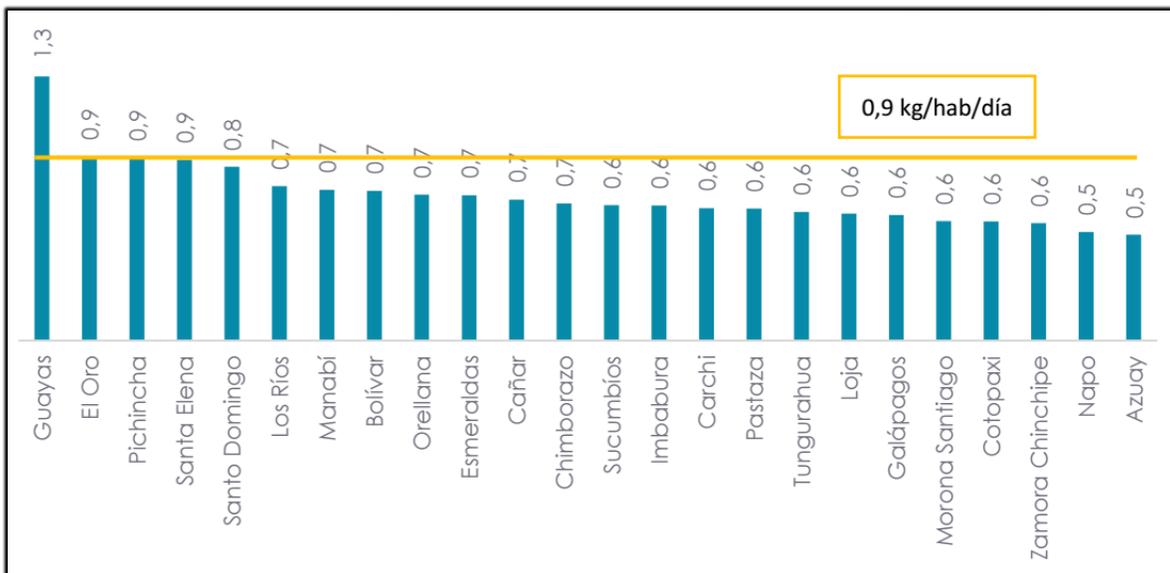
1.2 Problema de Investigación

1.2.1 Planteamiento del Problema

Durante el año 2022, se registró un promedio diario de recolección de residuos sólidos a nivel nacional de 14.394,0 toneladas. De esta cantidad, el 83,4% (12.000,9 ton/día) fue recolectado de manera no diferenciada, mientras que el 16,6% (2.393,1 ton/día) se recolectó de manera diferenciada.

El Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), en el boletín, Gestión de Residuos Sólidos 2022, los resultados principales de la Estadística de Información Ambiental Económica en los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM). A partir de la información proporcionada por los GADM, se determinó que cada habitante del Ecuador en el sector urbano produce en promedio 0,9 kg de residuos sólidos por día.

Figura 4. Producción per Cápita de residuos sólidos (PPC) a nivel urbano (kg/hab/día), por regiones naturales, 2022.



Fuente: AME-INEC-BDE. Registro de Gestión de Residuos Sólidos, 2022.

En 2022, el 74,1 % de GADM gestionaron sus residuos a través de unidades, departamentos o direcciones del propio GADM. El 34,5 % de GADM reportaron que iniciaron y/o mantuvieron procesos de separación en la fuente.

En la fase de disposición final, se reportó que el 54,5 % de los GADM disponen los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, el 28,2 % en celdas emergentes y el 17,3 % en botaderos.

Tabla 3. Clasificación de la disposición final de los desechos sólidos municipales en el Ecuador año 2022

	Relleno Sanitario		Celda Emergente		Botadero	
	Toneladas recolectadas al mes	Municipios	Toneladas recolectadas al mes	Municipios	Toneladas recolectadas al mes	Municipios
Nacional	342.746,32	120	58.094,70	62	38.443,95	38
Región Sierra	129.966,56	56	18.487,16	31	1.416,25	5
Región Costa	203.328,90	30	37.932,54	27	33.969,16	27
Región Amazónica	9.023,77	32	1.675,00	4	2.558,54	5
Región Insular	427,09	2	-	-	500,00	1

Fuente: AME-INEC. 2022, Registro de Gestión Integral de Residuos Sólidos.

En relación con la recolección diferenciada de los desechos sanitarios generados en establecimientos de salud, se reportó que el 56,8 % de los GADM realizaron recolección diferenciada de estos desechos.

1.2.2 Análisis del Problema

Tabla 4. Árbol de Problemas en los Rellenos Sanitarios de los GAD año 2022

ÁRBOL DE PROBLEMAS			TESIS
POSIBLES CAUSAS	SITUACIÓN ACTUAL	EFFECTOS	ENFOQUE ENERGÉTICO
Insuficiente sistema de gestión de residuos	Desechos de la ciudad se almacenan en un Relleno Sanitario, generan contaminación y altos costos de mantenimiento	Contaminación del suelo y del aire debido a la liberación de gases como el metano	Se desperdicia el potencial energético del gas metano que se produce por la descomposición de los desechos orgánicos depositados en el Relleno Sanitario. El metano tiene un alto poder calorífico, el cual permite utilizarlo como combustible para poner en funcionamiento una planta de generación eléctrica. La venta de la energía eléctrica que se genera le da beneficios económicos al dueño del proyecto
Instalaciones no adecuadas para el tratamiento de desechos		Altos costos de mantenimiento del Relleno Sanitario	
o hay conciencia sobre la importancia del reciclaje y la reducción de residuos		Impactos negativos en la salud pública	

Propuesta: “CONSTRUIR UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA QUE UTILICE EL GAS METANO COMO COMBUSTIBLE.

Preguntas

1. ¿Legalmente es viable el proyecto de construir una Planta de Generación eléctrica que funcione con el metano de un RS?
2. ¿Se puede determinar cuánto metano se va a generar en un RS con el pasar de los años y según la cantidad de RSU que se depositen en el mismo?
3. Con el volumen de metano que se genera en un RS, ¿cuál sería la capacidad de la Planta de generación eléctrica que se podría instalar como un proyecto complementario al RS?
4. ¿Qué tipo de tecnología se debe seleccionar para generar energía eléctrica utilizando como combustible el metano de un RS donde se depositan 400 ton/día de desechos sólidos?
5. ¿Es viable económicamente el proyecto de construir una Planta de generación eléctrica que utilice como combustible el metano de un RS que reciba 400 ton/día de RSU?
6. ¿Cuáles son los beneficios que se obtienen al implementar una planta de generación eléctrica que funcione con el gas metano?

Formulación del Problema

En varias ciudades del Ecuador, los desechos son almacenados en un Relleno Sanitario sin un sistema de gestión eficiente, lo que resulta en la generación de contaminantes para el suelo y aire, como el gas metano. Para mantener operativo este destino final de los desechos, se mantiene un alto presupuesto por costo de mantenimiento asociado al Relleno Sanitario.

Pregunta central:

¿Cómo se puede mejorar todo el sistema de gestión de residuos de la ciudad para reducir la contaminación del suelo y del aire, así como los altos costos de mantenimiento del Relleno Sanitario en implementar otros procesos que ayuden a un mejor procesamiento de los desechos urbanos no peligrosos?

Se propondrá una alternativa para el aprovechamiento del gas metano que se genera en el Relleno Sanitario, aprovechando el poder calorífico de este gas para utilizarlo como combustible y hacer funcionar una planta que genere energía eléctrica para comercializarla. La alternativa propuesta, debe ser viable técnicamente y rentable económicamente, generar recursos económicos a favor del Gobierno Autónomo Descentralizado de la ciudad, lo cual le va a permitir realizar una reinversión de recursos para mejorar la gestión de los residuos, instalaciones del Relleno Sanitario, reducir la contaminación y mejorar la salud pública.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar la viabilidad técnica y económica para la propuesta de construcción de una planta de generación eléctrica que aproveche el gas metano como combustible que se genera en un Relleno Sanitario.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Describir el proceso técnico de generación de energía eléctrica.
2. Determinar mediante análisis teórico la cantidad de metano que se obtendría con la cantidad de residuos no peligrosos que son depositados en el Relleno Sanitario.
3. Escoger el sistema de generación eléctrica acorde a la capacidad de generación y la cantidad de combustible generado y almacenado.

1.4 Hipótesis

Se asume que a partir de un Relleno Sanitario donde se depositan diariamente 400 toneladas de desechos municipales no peligrosos, se generará un flujo mínimo suficiente para alimentar a una unidad de generación eléctrica, con una venta de energía que genera rentabilidad.

1.5 Alcance

El análisis de esta tesis consiste en lo siguiente:

- Cálculo teórico del volumen de metano que se extrae en un RS donde se depositan diariamente 400 toneladas de desechos municipales no peligrosos.
- Valoración del potencial energético del gas metano.
- Selección de la tecnología mas idónea para la generación eléctrica.
- Análisis económico del proyecto.
- Análisis de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

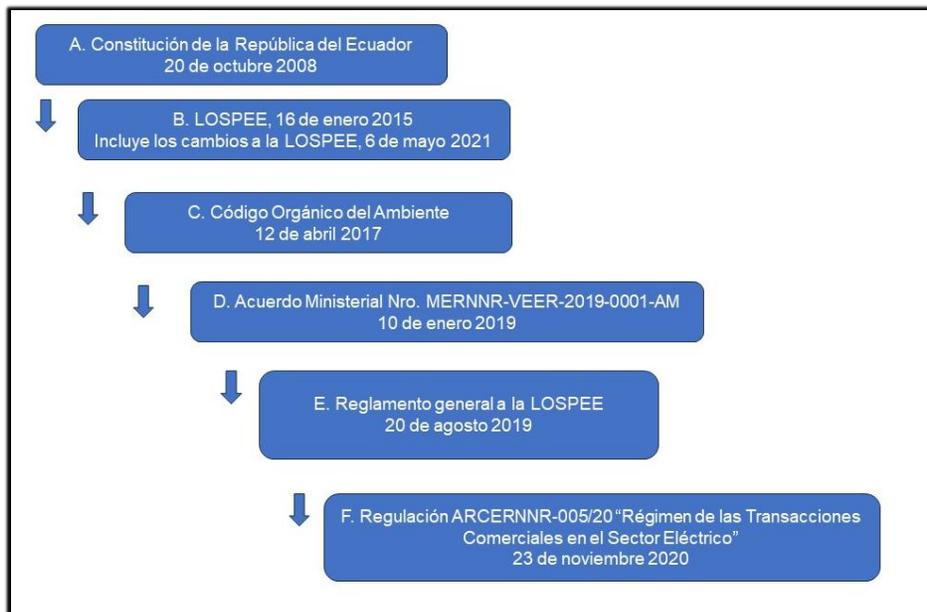
2.1 Marco Legal Ecuatoriano sobre generación eléctrica con gas metano

Tener un Marco Legal que permita desarrollar una actividad económica en específico, es importante para sobre esa base construir nuevos proyectos, así como estar actualizado con las últimas reformas y avances que el Gobierno ha realizado.

En la Figura 1, tenemos el marco legal desde el Gobierno Nacional sobre el cual se sustenta la viabilidad para realizar proyectos de generación eléctrica con biogás a partir de la captación y procesamiento del metano obtenido en los Rellenos Sanitarios, los cuales son construidos para ser el destino final de los residuos o desechos sólidos no peligrosos Municipales.

La Constitución de la República del Ecuador, en su artículo 238, confiere a los diferentes gobiernos autónomos descentralizados autonomía política, administrativa y financiera, para que, en el ejercicio de sus competencias constitucionales y legales, sean quienes tengan el derecho y la capacidad efectiva para realizar competencias en beneficio de sus habitantes. En este sentido, el Código Orgánico Administrativo (2017), en su artículo 83, manifiesta que la descentralización de la gestión del Estado consiste en la transferencia obligatoria, progresiva y definitiva de competencias, con los respectivos talentos humanos y recursos financieros, materiales y tecnológicos, desde la administración pública central hacia los Gobiernos Autónomos Descentralizados, a través del procedimiento previsto en la ley.

Figura 5. Marco Legal relacionado a proyectos de generación eléctrica con recursos renovables.



2.1.1 Precio de venta de la energía y plazo de concesión

De acuerdo con lo establecido por la DEISE en el Documento Nro. DEISE-2022-GEDD-01-PS46-03 entregado a la DRTSE mediante Memorando Nro. ARCERNNR-DEISE-2022-0062-M, el precio para la venta de la energía producida por parte del generador que use RSNPM asociada a la tecnología de Biogás y Residuos Municipales renovables, corresponden a 74.7 USD/MWh y 47.7 USD/MWh, respectivamente, los cuales se aplicarán por un período de 15 años como plazo preferente. Una vez concluido el plazo preferente, la energía producida por el generador se regirá a la normativa que se encuentre vigente. Los parámetros deberán estar incluidos en el respectivo Título Habilitante y el plazo de concesión se contabilizará desde la suscripción del Título Habilitante, por otra parte, el precio será reconocido al Concesionario durante el plazo de concesión, una vez entre en operación comercial, en función de la energía medida en el punto de conexión. No se reconocerá algún otro cargo adicional aplicable del mercado eléctrico (INFORME N°. INF.DRTSE.2022.012, 2022).

El Concesionario propietario de la central de generación, para que ingrese en operación comercial, a más de cumplir con los requisitos establecido en la normativa vigente, deberá suscribir los contratos regulados con todas las empresas de distribución, los cuales deberán ser registrados conforme lo indicado en la Regulación que trata sobre el régimen de las transacciones comerciales (INFORME N°. INF.DRTSE.2022.012, 2022).

Tabla 5. Precios del Costo Nivelado de Energía por tecnología.

Nomenclatura	Tecnología	CNE
		USD/KWh
BASS	Bagazo	\$ 0,0805
LGAS	Biogás	\$ 0,0747
OVAW	Otros residuos vegetales y agrícolas	\$ 0,0488
RHKS	Cáscara de Arroz	\$ 0,0586
WWST	Residuos de madera	\$ 0,0769
RMWS	Residuos municipales renovables	\$ 0,0477

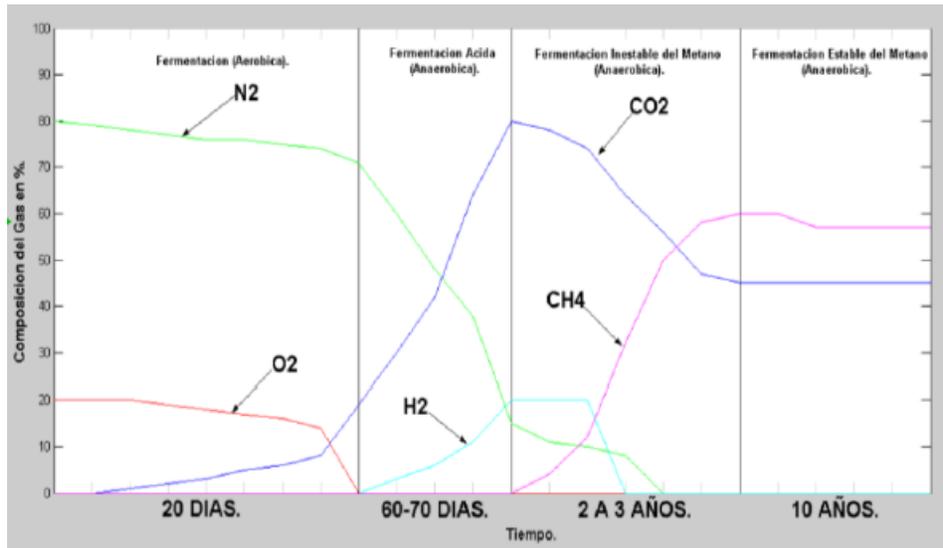
Fuente: Documento DEISE-2022-GEDD-01-PS46-03; INFORME N°. INF.DRTSE.2022.012

2.2. Biogás de Rellenos Sanitarios

Aspectos técnicos y económicos

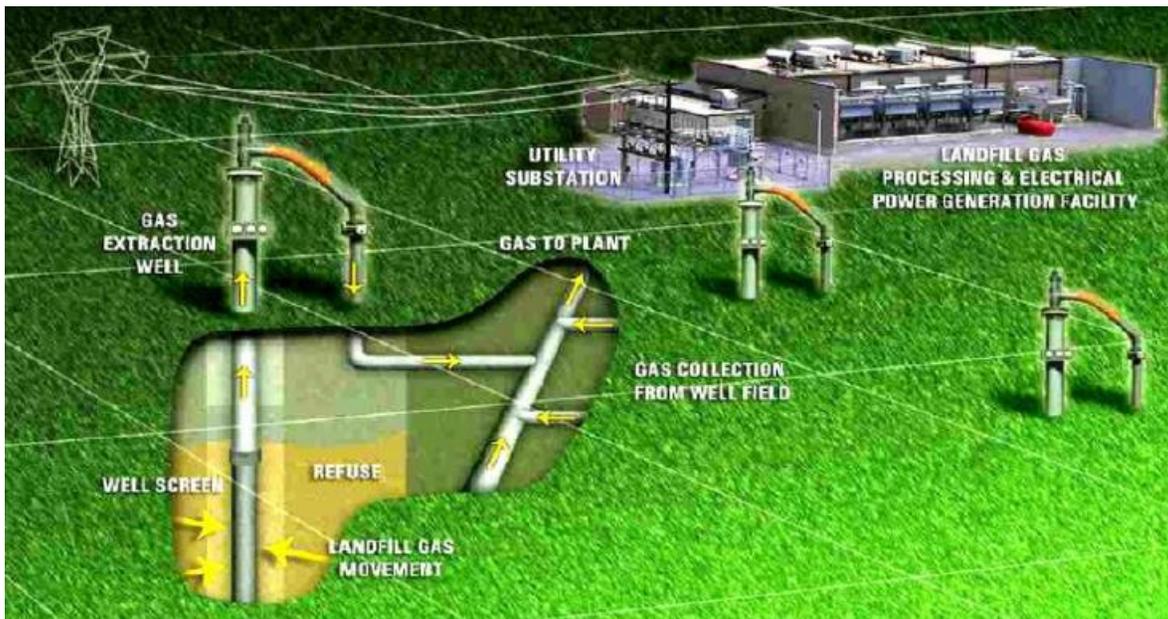
El biogás que se genera en los rellenos sanitarios se produce por la descomposición anaeróbica de los residuos urbanos depositados en los rellenos sanitarios. Tienen una relación directa el tiempo transcurrido desde la disposición de los desechos con la generación de biogás, así como las variables de temperatura ambiente y humedad. El uso potencial del gas depende del contenido de metano y el volumen atrapado.

Figura 6. Producción Anaeróbica de Biogás



Fuente: Ortega, O., Utilización de biogás como fuente de energía 2009

Figura 7. Dibujo esquemático del aprovechamiento del biogás de un relleno sanitario en generación eléctrica



Fuente: Ortega, O., Utilización de biogás como fuente de energía 2009

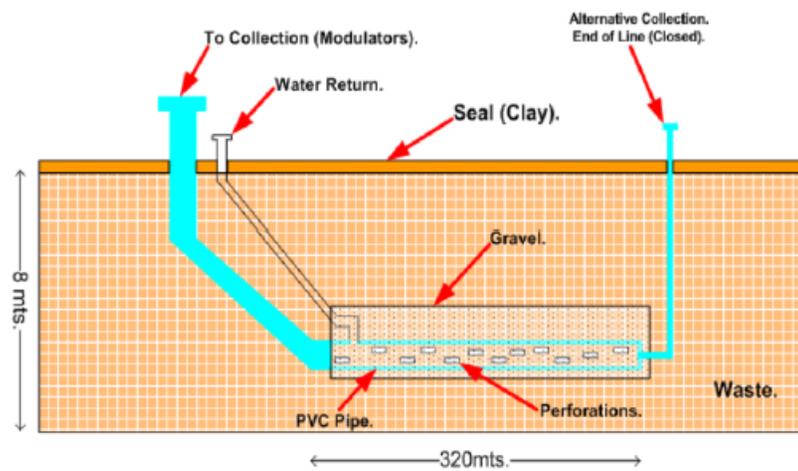
Extracción del biogás de rellenos sanitarios

Figura 8. Sistema de Pozos Verticales



Fuente: Ortega, O., Utilización de biogás como fuente de energía 2009

Figura 9. Sistema de Pozos Horizontales



Fuente: Ortega, O., Utilización de biogás como fuente de energía 2009

Figura 10. Elementos de Pozos Horizontales

(a) Sistema Colector de Gas



(b) Filtración de gas e intercambiador de calor



(c) Sistema de deshidratación del agua

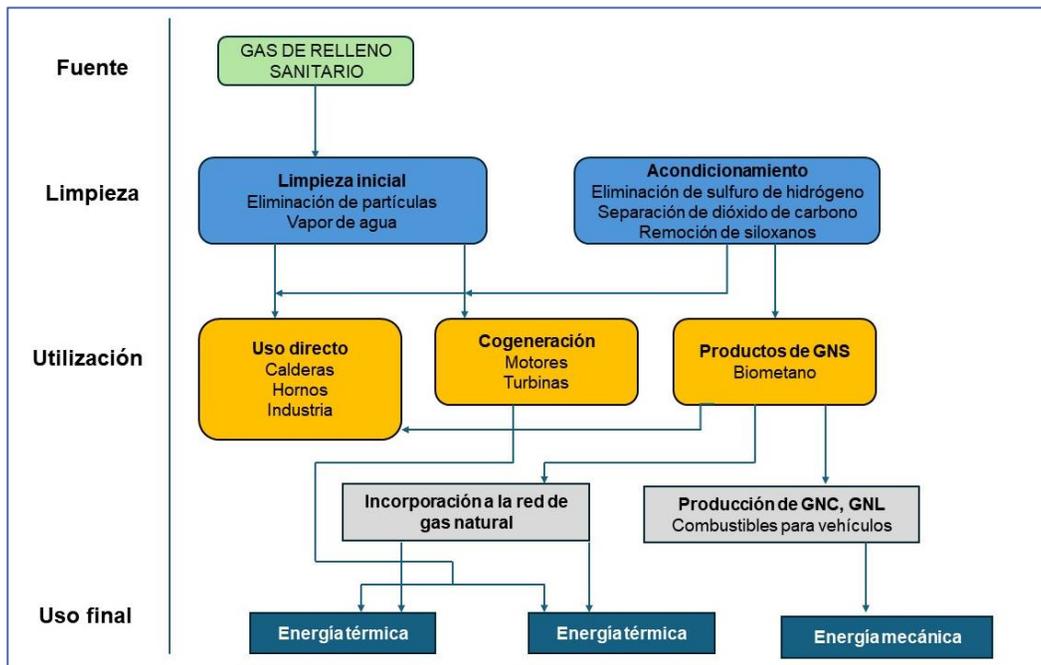


Fuente: Ortega, O., Utilización de biogás como fuente de energía 2009

Tecnologías disponibles para aprovechamiento del biogás

En la actualidad existen muchas tecnologías probadas y disponibles en el mercado para llevar el biogás a una calidad intermedia que permita su aprovechamiento. El biogás medianamente purificado es un combustible versátil y puede utilizarse para el calentamiento y para la generación eléctrica, normalmente se utilizan motores de combustión interna, turbinas a gas, o microturbinas en sistemas más pequeños (de 1 a 10 MW), el uso del sistema de caldera-turbina a vapor tienen mayor demanda en proyectos de producción de energía con sistemas más grandes (10 a 50 MW).

Figura 11. Tratamiento y usos del biogás



Fuente: Dudek et al., 2010.

Incineración. - Combustión directa del biogás extraído. La incineración de biogás en rellenos sanitarios es una medida que limita la migración del gas y mitiga los olores que resultan de su emisión hacia la atmósfera. Se instala un sistema activo de recolección y control, pero no se recupera la energía contenida en el biogás.



Foto 1. Incinerador de gas metano.

Fuente: Informe de Rendición de cuentas 2022 GAD Machala

Gas con bajo potencial calorífico. - Se realiza específicamente la remoción de la humedad. El poder calorífico mejora a 4000 kcal/m³. El biogás con esta característica mejorada únicamente se puede utilizar como combustible en calderas de un ciclo de Rankine para hacer funcionar turbinas de vapor. La generación continua en plantas termoeléctricas puede variar según la producción de biogás en un relleno sanitario. El biogás de esta calidad no puede utilizarse en motores de combustión directa ya que contiene impurezas que producen un acelerado desgaste de las partes.

Gas con potencial calorífico medio. – Utilizando los procesos de purificación del gas para remover la humedad, así como compuestos sulfurosos, siloxanos, partículas sólidas y mercaptanos y compuestos orgánicos volátiles (COVs). El poder calorífico tiene un aumento hasta de 6200 kcal/m³.

Gas con potencial calorífico alto. - En esta etapa se realiza una remoción total de la humedad, las trazas de otros gases y el dióxido de carbono, dejando una mezcla con grado de gasoducto con poder calorífico de 8900 kcal/m³.

Para poder aprovechar el biogás, estos sistemas utilizan la compresión, refrigeración y algunos procesos fisicoquímicos para la remoción de humedad y las trazas de contaminantes.

Motores reciprocantes de combustión interna.- estos son los más utilizados ya que tienen una alta eficiencia en comparación con las turbinas a gas y las microturbinas (LMOP, 2015). Son de bajo costo por kW, vienen en tamaños adecuados a los flujos de biogás que se puedan alcanzar. La eficiencia de estos motores varía entre 25 y 35%, pudiendo mejorar la eficiencia cuando se aplican técnicas de cogeneración, cuando se recupera el calor residual que puede ser utilizado para otras aplicaciones. Con esta tecnología el patio térmico puede ser incrementado añadiendo más motores o disminuido quitando motores, según el sistema de captación de gas metano con el que se cuente y la vida útil del relleno sanitario.

Las turbinas a gas.- son utilizadas en proyectos de gran escala donde existe un flujo mayor de biogás que sea suficiente para generar un mínimo de 3 MW y típicamente para más de 5 MW (el flujo de biogás es superior a los 40 m³/min). En cuanto a costos, al aumentar la generación el costo del kW disminuye al utilizar turbinas a gas, mejorando la rentabilidad. La eficiencia de las turbinas a gas se encuentra entre el 20 y el 28%, sólo en los casos de cogeneración se llega a una eficiencia del 40%. La desventaja del uso de turbinas a gas, es que cuando se extrae el gas del relleno sanitario debe pasar por un proceso de eliminación de los siloxanos, y otras impurezas. Las turbinas a gas tienen mayor resistencia a la corrosión y menor nivel de emisiones de óxidos de nitrógeno.

Las microturbinas. - se utilizan cuando la captación del gas metano es menor a 8 m³/min con contenido mínimo de metano de hasta un 35%, el uso de estos equipos es costoso por kW generado, tienen la ventaja que se pueden añadir o quitar según se mejore el sistema de captación de metano.

2.3. Modelación de la producción de metano en un relleno sanitario

Utilizar modelos matemáticos que calculan el metano que se puede generar en un relleno sanitario es de mucha utilidad para planificar la disposición final del mismo, y puede ser utilizado para los siguientes fines (Bioleach, 2016):

- Proyectar la cantidad de metano que se debe extraer.
- Preparar o diseñar el sistema de captación del gas metano para llevarlo a su disposición final, sea hacia una aplicación energética o la quema con antorcha.
- En algunos casos se monitorea la cantidad de metano que se extrae para evitar explosiones internas y controlar la contaminación al ambiente.

Existen diferentes métodos matemáticos para determinar la tasa de generación de biogás (Bioleach, 2016):

- Función empírica simple o combinación de funciones simples con parámetros de cinética global.
- Suma compleja de funciones matemáticas que representan las cinéticas individuales de los procesos físico químicos que ocurren durante la biodegradación.
- Métodos numéricos.

El enfoque teórico de la mayoría de los modelos de biogás deriva de la ecuación de Monod, una expresión general cinética que describe los procesos de biodegradación (Nastev, 1998; Kamalan, 2011; Bioleach, 2016):

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{Kx C}{K_c + C} \quad (1)$$

Donde:

C es la concentración restante del sustrato (materia orgánica) en el tiempo t (kg/m³ RSU)

X es la concentración de microorganismos (kg/m³ RSU)

K es la tasa máxima de utilización del sustrato por kg de microorganismos

K_c es la constante de saturación.

La ecuación de Monod se puede aproximar por las siguientes funciones en dos casos extremos:

- Reacción de orden cero: para valores altos de C, la tasa de utilización del sustrato es constante si la concentración microorganismos también lo es.

$$\frac{dC}{dt} = -Kx \quad (2)$$

Reacción de primer orden: para valores pequeños de C y asumiendo constante la concentración de microorganismos, la tasa de utilización del sustrato es una función lineal.

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{Kx}{K_c} C \quad (3)$$

2.3.1 Modelos de cálculo de la producción de biogás en relleno sanitario

Una gran cantidad de los modelos desarrollados se basan en la ecuación de Monod de primer orden (TNO, SWANA, LandGEM, Gassim, Afvalzorg, EPER France, LFGEEN...). La ecuación de Monod de orden cero se ha utilizado en otros modelos (EPER Germany, SWANA zero order, IPPC). Otros modelos se basan en el crecimiento secuencial biológico, como el modelo Halvadakis. Los modelos más recientes se basan en desarrollos numéricos como el peso residual y las redes neuronales (Ozakaya et al., 2006; Shariatmadari et al., 2007; Bioleach, 2016).

En la Tabla 6, se encuentra una recopilación de las ecuaciones utilizadas por varios modelos de biogás

Tabla 6. Modelos cinéticos utilizados en los modelos de biogás (Oonk, 2010; Karanjecar, 2012)

Modelo cinético	Ecuación
Modelo de orden cero: la generación de biogás es constante en el tiempo. La edad de los residuos no está incluida en el modelo	$Q = \frac{M * L_0}{(t_i - t_f)}$
Modelo de primer orden: la generación de biogás decrece exponencialmente	$Q = M * L_0 * k * e^{-k(t-t_i)}$
Modelo modificado d primer orden: se considera un tiempo de desfase en la generación de metano. Inicia lentamente para luego crecer hacia un pico que decrece exponencialmente como en el modelo de primer orden.	$Q = M * L_0 \frac{k + s}{s} (1 - e^{-s(t-t_i)})(ke^{-k(t-t_i)})$
Modelo multifase de primer orden: se consideran diferentes fracciones de residuos y diferentes tasas de producción	$Q = M_i * L_0 * \left[F_R(k_R * e^{-k_R(t-t_i)} + F_M(k_M * e^{-k_M(t-t_i)} + F_S(k_S * e^{-k_S(t-t_i)})) \right]$
Modelos de segundo orden: describen las complejas reacciones que ocurren durante la degradación de los residuos, a partir de reacciones de primer orden con diferentes tasas	$Q = M * k \left(\frac{L_0}{kL_0t + 1} \right)^2$

2.3.2 Modelo de emisiones de gases de vertedero (LandGEM)

El modelo LandGEM es un software de libre acceso, el cual fue desarrollado por la agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos, se lo puede descargar en la web site “Unite States Environmental Protection Agency (US.EPA)” (Fuente: <https://www.epa.gov/land-research/landfill-gas-emissions-model-landgem>). Esta herramienta es un archivo en Excel que realiza un modelamiento de las emisiones de gases de los vertederos o rellenos sanitarios, con este modelo se consigue estimar la tasa de emisión de gases en los rellenos sanitarios donde se depositan los residuos sólidos municipales.

El modelo de emisiones de gases de vertederos (LandGEM) se utiliza para estimar las tasas de emisión del total de gases de los rellenos sanitarios como metano, dióxido de carbono, compuestos orgánicos no metano y contaminantes atmosféricos individuales de residuos sólidos municipales.

La producción de metano empieza a partir que los residuos sólidos urbanos son colocados en el Relleno Sanitario y se empiezan a descomponer, llegando a un máximo de producción cuando se equilibran las condiciones anaeróbicas dentro del confinamiento de los residuos sólidos urbanos. Luego la producción de biogás decae debido a la disminución de la fracción de residuos orgánicos [1], [2].

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 K * L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) * e^{-K*t_{ij}} \quad (4)$$

Donde:

Q: generación de metano en el año del cálculo ($m^3/año$).

i: incremento de tiempo de 1 año

j: es el incremento de tiempo de 0.1 años

n: es el (año del cálculo) (año inicial de disposición de residuos)

K: es el índice de generación de metano (1/año)

L_0 : es la capacidad potencial de generación de metano (m^3/Mg)

M_i : es la cantidad de residuos recibidos en el año i (Mg)

t_{ij} : es la edad de la sección j de cantidad de residuos M_i aceptado en el año i

Para adaptar el modelo LandGEM a las condiciones climáticas de Ecuador, se escoge según las condiciones climáticas los índices de generación de metano (K) y el índice de generación potencial de metano (L_0), enfocadas a las condiciones del relleno sanitario, nivel de precipitaciones y a la cantidad de residuos orgánicos presentes en el relleno que se estudia.

Índice de generación de metano (K)

Este índice describe la degradación de los residuos sólidos urbanos en el relleno sanitario y su consecuente producción de metano (CH_4). Para estimar los valores de K, el modelo LandGEM crea una tabla de constantes.

Los cinco valores de K utilizados por LandGEM se muestran en la Tabla. El valor de K este es usado en la tasa de descomposición de primer orden, la unidad es 1/año. El relleno sanitario de área árida recibe al menos 25 pulgadas de lluvia por año. El valor por defecto de K es la CAA (Clean Air Act) para rellenos sanitarios convencionales, es decir, estos valores están definidos por normas y leyes que deben cumplir los rellenos sanitarios de EE.UU. (1), (3).

Tabla 7. Valores para el índice de generación de metano

En base A	Tipo de RS	Valores de K
CAA	Convencional	0.05 (Por defecto)
CAA	Zona Árida	0.02
US. EPA	Convencional	0.04
US. EPA	Zona Árida	0.02
US. EPA	Húmedo	0.7

Debido a que es un modelo de EEUU, al aplicarlo en Ecuador no se cumplen las mismas normativas, por lo que es necesario calcular el valor de K.

Acorde al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para obtener el valor de K, se debe relacionar el clima y las características de los residuos. Las características o tipo de residuos ayuda a identificar la velocidad de la degradación que tienen los desechos y se clasifica de la siguiente manera:

- Degradación rápida, residuos orgánicos y un 20% de pañales.
- Moderadamente rápida, residuos vegetales y papel higiénico.
- Moderadamente lenta, papel, cartón y textiles.
- Muy lenta, para caucho, madera, piel, hueso y paja.

Se relaciona el tipo de degradación y las condiciones climáticas de la zona donde está ubicado el relleno sanitario, según las tablas. Posteriormente, se realiza un promedio y se obtiene el valor de K, tal como lo indica la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\sum \text{Valores del tipo de degradación}}{n} \quad (5)$$

Donde:

K: índice de generación de metano.

n: números de tipos de degradación escogidos

Tabla 8. Valores para el índice de generación de metano

Tipo de Clima	Precipitación <i>mm/año</i>	Tipo de Degradación			
		Rápida	Moderadamente Rápida	Moderadamente Lenta	Muy Lenta
Seco	500	0.1	0.05	0.02	0.01
Moderadamente Seco	500-999	0.18	0.09	0.036	0.018
Moderadamente Húmedo	1000-1499	0.26	0.12	0.048	0.024
Húmedo	1500-1999	0.34	0.15	0.06	0.03
Excesivamente Húmedo	>2000	0.4	0.17	0.07	0.035

Capacidad de generación potencial de metano (L_0)

Este índice depende del tipo y composición de los desechos ubicados en el relleno sanitario. El mas alto contenido de celulosa de los desechos tendrá la mayor ponderación de L_0 . Por defecto el valor de L_0 utilizado por LandGEM es el representativo a los desechos sólidos municipales, como esta es una ecuación de primer orden de la tasa de descomposición, está medida en metros cúbicos por megagramos siendo consistente con la CAA. Los cinco valores de L_0 utilizados por LandGEM se muestran en la siguiente tabla. El valor por default de L_0 es el valor CAA L_0 para rellenos sanitarios convencionales (3).

Tabla 9. Valores para la Capacidad de generación potencial de metano (L_0)

Tipo de Emisión	Tipo de RS	L_0 (m^3/M_g)
CAA	Convencional	170 (por defecto)
CAA	Zona árida	170
US. EPA	Convencional	100
US. EPA	Zona árida	100
US. EPA	Húmedo (Biorreactor)	96

Para el uso de este indicador en rellenos sanitarios de Ecuador, los cuales no cumplen las mismas normativas que los rellenos sanitarios de EE. UU., se requiere calcular los valores para L_0 en base a las características donde se encuentra el RS. Según el IPCC, L_0 se puede estimar a partir de la siguiente ecuación (5).

$$L_0 = MCF * DOC * DOC_F * F * \frac{16}{12} \quad (6)$$

Donde:

L_0 : es la capacidad de generación potencial de metano

MCF: factor de corrección del metano.

DOC: carbono orgánico degradable.

DOC_F : fracción de carbono orgánico biodegradable.

F: fracción de metano contenido en biogás, se asume típicamente 0.5

El factor $\frac{16}{12}$ corresponde a una constante estequiométrica (cociente de pesos moleculares entre el CH_4/C)

Los valores de cada parámetro se los obtiene en las siguientes tablas:

Tabla 10. Estimación de valor para factor de corrección de metano

Tipo de Relleno	Valores por defecto del factor de Corrección de metano (MCF)
<i>Gestionado Anaeróbico</i> ¹	1
<i>Gestionado – semi – aeróbico</i> ²	0.5
<i>No gestionado – profundo</i> ³ (>5 m desechos) y/o capa freática elevada	0.8
<i>No gestionado – poco profundo</i> ⁴ (<5m de desechos)	0.4
<i>Rellenos sanitarios no categorizados</i> ⁵	0.6
<p>1. <i>Gestionado Anaeróbico</i>, la colocación de los residuos sólidos se realiza controladamente, el RS cumple con los requisitos técnicos.</p> <p>2. <i>Gestionado Semi-Aeróbico</i>, el material de la cubierta debe ser permeable; (ii) con drenaje para lixiviados, (iii) estanques de regulación y (iv) un sistema para ventilación de gases</p> <p>3. <i>No gestionado Profundo</i> (>5m) se da cuando no se cumple los criterios técnicos de los rellenos sanitarios.</p> <p>4. <i>No gestionado Poco Profundo</i> (<5m) cuando no se cumple los criterios técnicos de los rellenos sanitarios.</p> <p>5. <i>Rellenos Sanitarios no categorizados</i>. En caso de que los países no puedan categorizar sus RS en las cuatro categorías anteriores, puede utilizar la categoría MCF</p>	

DOC (carbono orgánico degradable): depende de la composición de los residuos orgánicos. El cálculo se realiza con la siguiente ecuación:

$$DOC = 0.4 * A + 0.17 * B + 0.15 * C + 0.3 * D \quad (7)$$

Donde:

A: es el porcentaje de los siguientes tipos de residuos, papel, cartón y textiles.

B: es el porcentaje de los residuos vegetales y orgánicos putrescibles (se excluyen los alimentos)

C: es el porcentaje que son desechos de alimentos.

D: es el porcentaje de residuos de madera y paja.

DOC_f (fracción de carbono orgánico biodegradable): es la proporción de carbono disponible convertida en biogás.

$$DOC_f = 0.014 * T + 0.28 \quad (8)$$

Donde:

T: es la temperatura del RS (°C)

Concentración de compuesto orgánico no metálico (NMOC), (ppmv)

El NMOC se mide en partes por millón de volumen (ppmv), y se utiliza en el modelo LandGEM cuando se requiere calcular las emisiones de NOMC. Los valores de K y L_0 se los calcula con las tablas y todas las consideraciones antes expuestas.

Contenido de metano (CH_4), (%)

Este indicador nos muestra la cantidad de metano que se encuentra disponible en el biogás. Por lo general, la mayoría de veces se asume que un relleno sanitario tiene un contenido de metano de 50% (7). Para el uso del modelo LandGEM considera por defecto el valor de 50% de contenido de metano, o se puede utilizar un valor medido.

2.4. Valoración del potencial energético del metano y selección de la tecnología de generación eléctrica

Para la selección de la tecnología de generación eléctrica que mejor se adapte a la fuente primaria de combustible que tenemos en este caso el metano que se captó del relleno sanitario, se la escoge de la siguiente tabla:

Tabla 11. Información tecnológica para generación eléctrica

Tecnología	Flujo de biogás (m^3/hr)	Potencia de unidad de generación	Eficiencia	Costo
				USD/kW
MCI	480-1800	800 KW – 3 MW	32-45%	1100-1700
Turbinas	> 2400	> 3MW	25-40%	1400
Microturbinas	< 480	30 KW-200 KW	26-32%	5500

Cálculo de energía eléctrica a obtener con el biogás

Mediante las siguientes ecuaciones se determina el potencial de generación eléctrica que se puede obtener con unidades de generación que pueden operar con biogás.

Energía disponible para generar electricidad con biogás

Por medio de la siguiente ecuación se calcula la cuanta energía se puede convertir del biogás en energía eléctrica.

$$E. disp = \frac{PCI_{biogas} * Q_{br} * d}{s} \left[\frac{KWh}{año} \right] \quad (9)$$

Donde:

E. disp : Energía eléctrica disponible.

$PCPCI_{biogas}$: Poder calorífico inferior del biogas.

Q_{br} : Caudal del biogás recuperable ($m^3/año$)

d : eficiencia eléctrica del elemento generador. (MCI, turbina o microturbina)

γ_1 : factor de conversión de MJ a KWh, (1 MJ / 0.28 KWh)

El poder calorífico inferior del gas está indicado en la ecuación:

$$PCI_{biogas} = \%CH_4 * PCI_{metano} \quad (10)$$

Donde:

$\%CH_4$: Concentración de metano en el gas (se asume un valor de 40, 50, 60%)

PCI_{metano} : poder calorífico inferior del metano (revisar Tabla)

Tabla 12. Poder calorífico del metano

Gas	Poder Calorífico Inferior ($\frac{MJ^3}{m}$)	Poder Calorífico superior ($\frac{MJ^3}{m}$)
Metano	35.8	39.8

Para el caso de los BGRS, se suele asumir que el PCI_{biogas} va a depender del tratamiento que se le realice al biogás, de acuerdo a esto el poder calorífico va a fluctuar desde un mínimo de $5 \frac{KWh^3}{m}$ hasta un valor máximo entre 8 y $10 \frac{KWh^3}{m}$.

Finalmente, el caudal del biogás recuperado estará dado por la ecuación:

$$Q_{br} = \gamma * Q_{biogas} \left[\frac{m^3}{año} \right] \quad (11)$$

Donde:

P_{EG} : Potencia de la unidad de generación

f_{dp} : Factor de disponibilidad de planta

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se va a desarrollar la metodología para Diseñar de una planta de generación eléctrica con gas metano producido por un Relleno Sanitario con una disposición final de 400 ton/día de desechos sólidos residenciales.

El volumen de gas metano que se genera con 400 toneladas diarias de residuos sólidos municipales

3.1 Descripción de la Metodología planteada

1.- Conocer el marco legal y las regulaciones para desarrollar el proyecto propuesto.

- Revisar la Figura 5.
- Precio del CNE para uso de la tecnología de Biogás es de 0,0747 USD/KWh.

2.- Determinar la ubicación geográfica del relleno sanitario para realizar el levantamiento de información del clima mediante páginas de internet especializadas donde se recoge históricos de las condiciones meteorológicas. Los elementos meteorológicos por tomar en cuenta son la temperatura, la presión, el viento, la humedad y la precipitación.

3.- Seleccionar un modelo matemático o software para predecir el volumen de gas metano que se puede generar en el relleno sanitario.

- 3.1. Conocida las condiciones climáticas se selecciona las constantes k y L_0 que más se adapten a la ubicación del RS, ver Tablas 5 y 7.
- 3.2. Obtener la curva de producción de biogás durante el tiempo de vida del RS y su decrecimiento de la producción de biogás estimado por el software.
- 3.3. Determinar la cantidad de energía eléctrica que se puede producir utilizando como fuente de energía el biogás (metano) y que el tiempo de vida del proyecto de generación sea de 25 años.

4.- Selección de la mejor alternativa tecnológica para generar electricidad. Para esto es necesario conocer el volumen de gas metano, el flujo y la presión del gas y el dimensionamiento de la capacidad de generación.

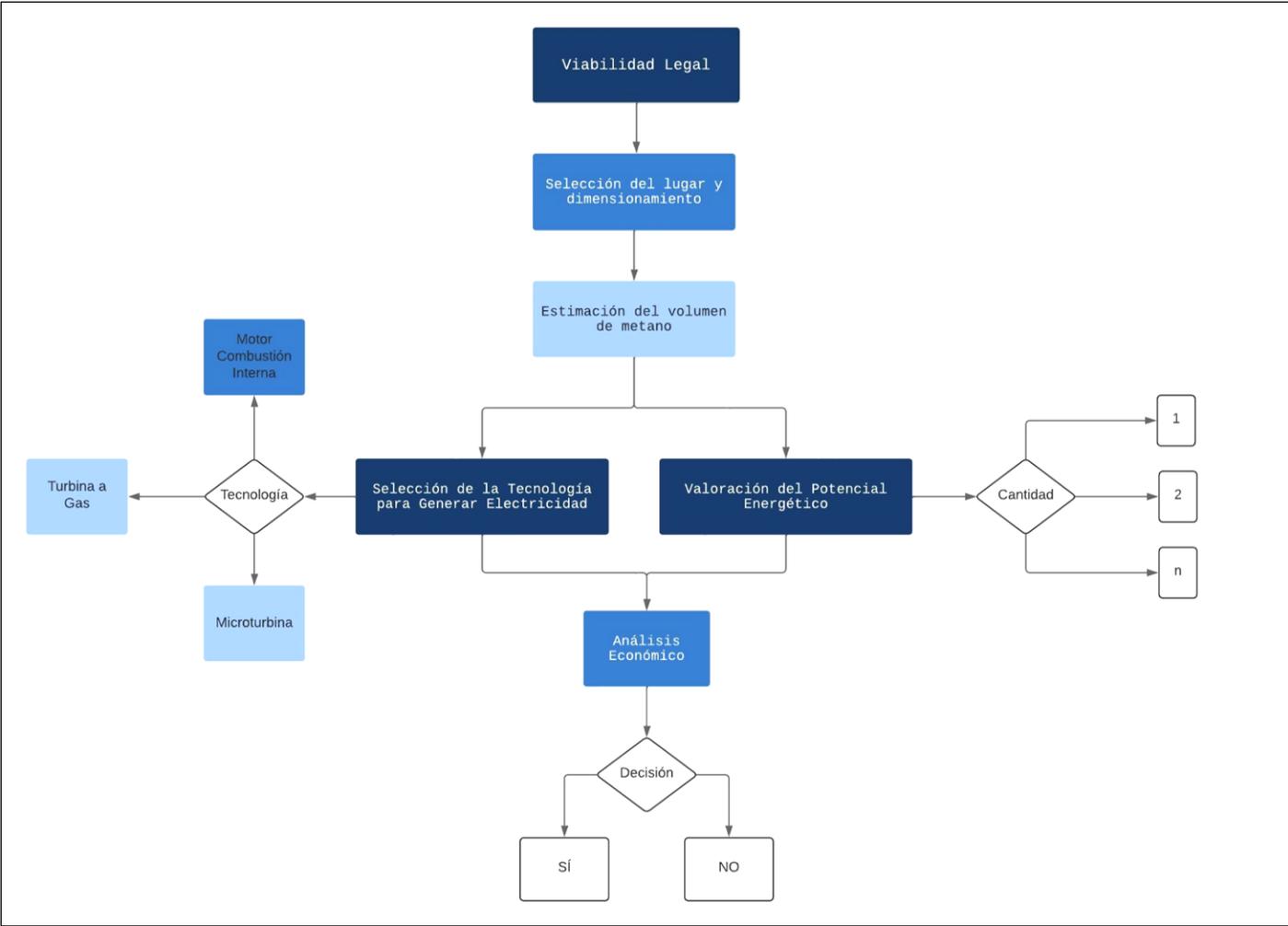
- 4.1. El volumen de gas metano que se va a generar por mes y al año, van a determinar la cantidad de combustible disponible para generar electricidad, utilizando el poder calorífico del combustible.
- 4.2. Utilizando el poder calorífico de combustible se determina la cantidad de energía eléctrica que se puede generar.
- 4.3. Es importante que el flujo de combustible que se va a generar se mantenga constante por un lapso de tiempo en el que toda la inversión se pueda pagar con la venta de la electricidad.
- 4.4. Se plantea un tiempo de vida del proyecto de generación eléctrica de al menos 15 años. Para el desarrollo del Caso de estudio de este trabajo se consideró

que el combustible debe abastecer por 25 años a las unidades de generación eléctrica.

- 4.5. Determinada la capacidad de generación eléctrica, se va a determinar la tecnología que se puede implementar para ge en el RS. Ver Tabla 9.

5.- Realizar una evaluación económica de toda la inversión económica para realizar el proyecto, lo cual incluye el montaje, operación y mantenimiento de la planta de generación eléctrica vs. los ingresos obtenidos por la venta de la energía eléctrica. De esta manera evaluar si la rentabilidad del proyecto satisface el financiamiento que se obtuvo para realizar el proyecto.

Figura.12. Metodología utilizada para el Diseño de una planta de generación eléctrica con biogás de un Relleno Sanitario con 400 ton/día de RSU.



CAPÍTULO 4

4 RESOLUCIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO

Para la resolución del problema planteado en el caso de estudio, se utilizó el software RetSREEN en el cual se ingresa la información que se tiene del Relleno Sanitario investigado, para modelar mediante cálculos matemáticos la cantidad de metano se genera por la descomposición de los desechos, combinando las variables del clima y las características de los RSU depositados en el RS.

El software RetSCREEN también proporciona alternativas de Unidades de generación eléctrica para diferentes tecnologías, así como los datos técnicos de estos equipos y costos referenciales de operación con referencia a Canadá.

4.1 Diseño de una Central de Generación Eléctrica para el RS de Ceibales en la ciudad de Machala, el mismo que tiene un depósito diario de 400 t/día aproximadamente.

A continuación, se recopila la información del Relleno Sanitario de Ceibales donde se deposita los RSU de la ciudad de Machala.

Lugar: Ciudad de Machala

Ubicación geográfica: Latitud= -3,32°N, Longitud= -79.95°E

Año de apertura del Relleno Sanitario: 2010

Año de cierre del Relleno Sanitario: 2030

Cantidad de basura en toneladas que se depositan anualmente

Tabla 13. Toneladas de basura por año que ingresaron al RS de Ceibales

Año	Toneladas
2010	26475,1
2011	91628,7
2012	93356,3
2013	95575,0
2014	98322,3
2015	101645,1
2016	105600,7
2017	110258,6
2018	115702,3
2021	125636,5

2022	150485,5
2023	157277,0

Fuente: Informes de Rendición de cuentas GAD Machala.

Para calcular la cantidad de basura que se depositará hasta el año de cierre del Relleno Sanitario escogido para estudio se realiza una proyección exponencial. Con los datos antes expuestos se encuentra la ecuación.

$$y = 2E - 34e^{0.0442x} \quad (12)$$

Figura.13. Gráfica y ecuación de aproximación exponencial del crecimiento de los RSU hasta el año 2030.

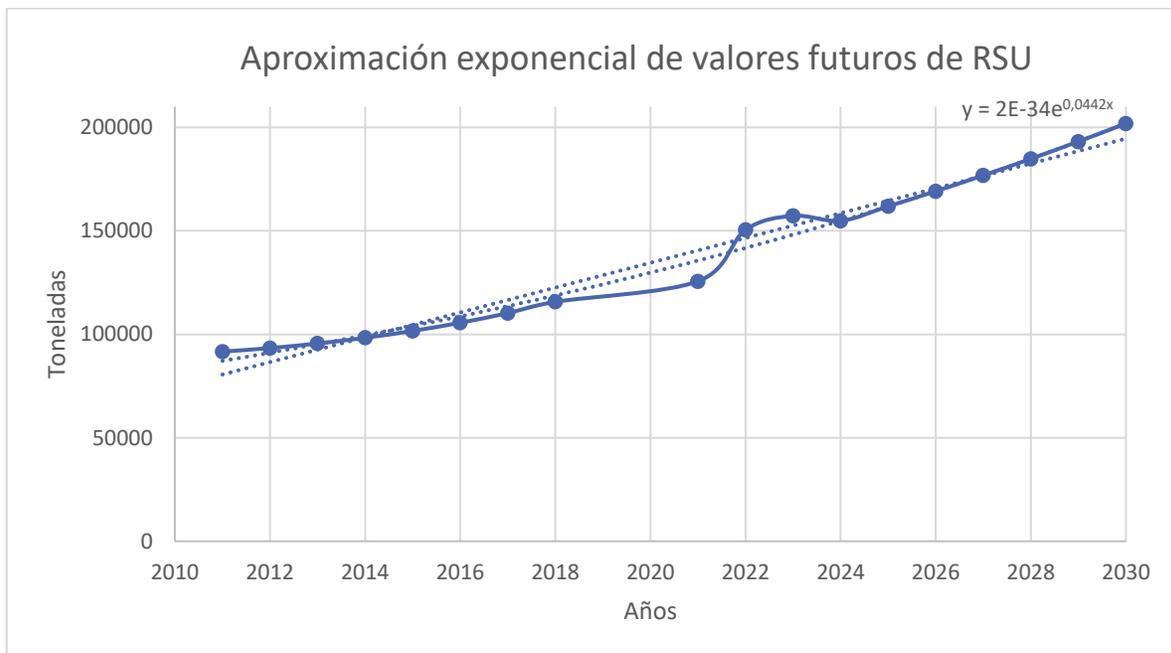


Tabla 14. RSU proyectados hasta el cierre del RS de Ceibales en el año 2030

Año	Toneladas
2024	154862,28
2025	161862,49
2026	169179,14
2027	176826,51
2028	184819,57
2029	193173,94
2030	201905,95

4.1.1 Caso de estudio RS de Ceibales – Alternativa 1

En la pestaña de Ubicación se navega en el mapa para seleccionar la ubicación del RS y el programa automáticamente descargue las condiciones de clima del lugar.

Figura 14. Ingreso de ubicación del lugar del RS en el software RetSCREEN



En la pestaña de Energía en la sección de Combustibles y horarios/ Gas de relleno sanitario (biogás) se debe ingresar la información del RS de Ceibales.

Figura 15. Datos del RS de Ceibales en el software RetSCREEN

Año de apertura - relleno sanitario	año
Año final - relleno sanitario	año
Eliminación de basura en años clave	año
Velocidad de eliminación de basura	t/año
Basura total en relleno sanitario (21 años)	t

Figura 16. Ingreso de datos del RS de Ceibales

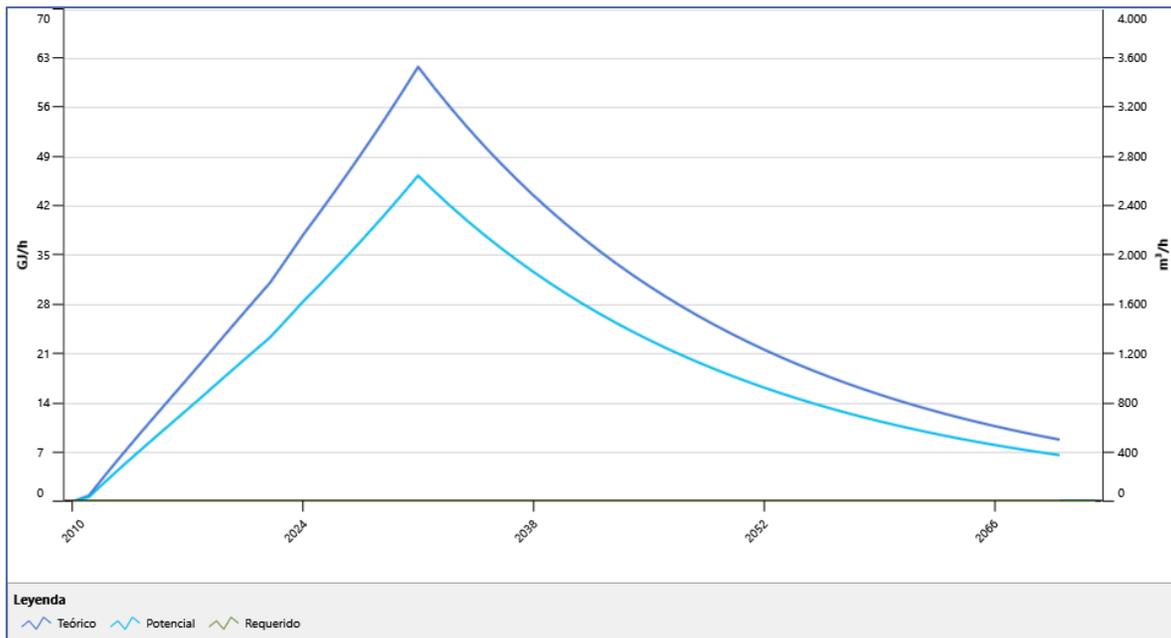
Año de apertura - relleno sanitario	año	2010				
Año final - relleno sanitario	año	2030				
Eliminación de basura en años clave	año	2010	2011	2028	2029	2030
Velocidad de eliminación de basura	t/año	26.475,1	91.628,7	184.819,6	193.174	201.905,95
Basura total en relleno sanitario (21 años)	t	2.480.339				

Figura 17. Características de la generación de Gas metano en el RS de Ceibales

Tiempo antes de generación de biogas	año	1
Constante de generación de metano (k)		0,05
Metano por volumen de biogas	%	50%
Generación de metano de la basura (Lo)	m ³ /t	170
Factor de corrección materias inertes	%	10%
Generación de biogas - Teórica	m ³ /t	340
Eficiencia de captación de biogas	%	75%
Generación de biogas - potencial	m ³ /t	255
Poder calorífico de biogas	MJ/m ³	18,54
Factor de emisión CH ₄ - Biogas	kg/GJ	18

Con la información de la Figura 17, el software RetSCREEN modela la generación de biogás en el RS de Ceibales, como se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Curva de generación de biogás en el RS de Ceibales



A continuación, con el flujo de metano obtenido de la Figura 18, se puede aplicar la ecuación 9 para calcular la energía disponible en las diferentes condiciones de flujo de metano como se muestra en la Figura 19.

Figura 19. Condiciones de flujo de biogás de análisis considerando el año de inicio de la generación eléctrica en el año 2025.

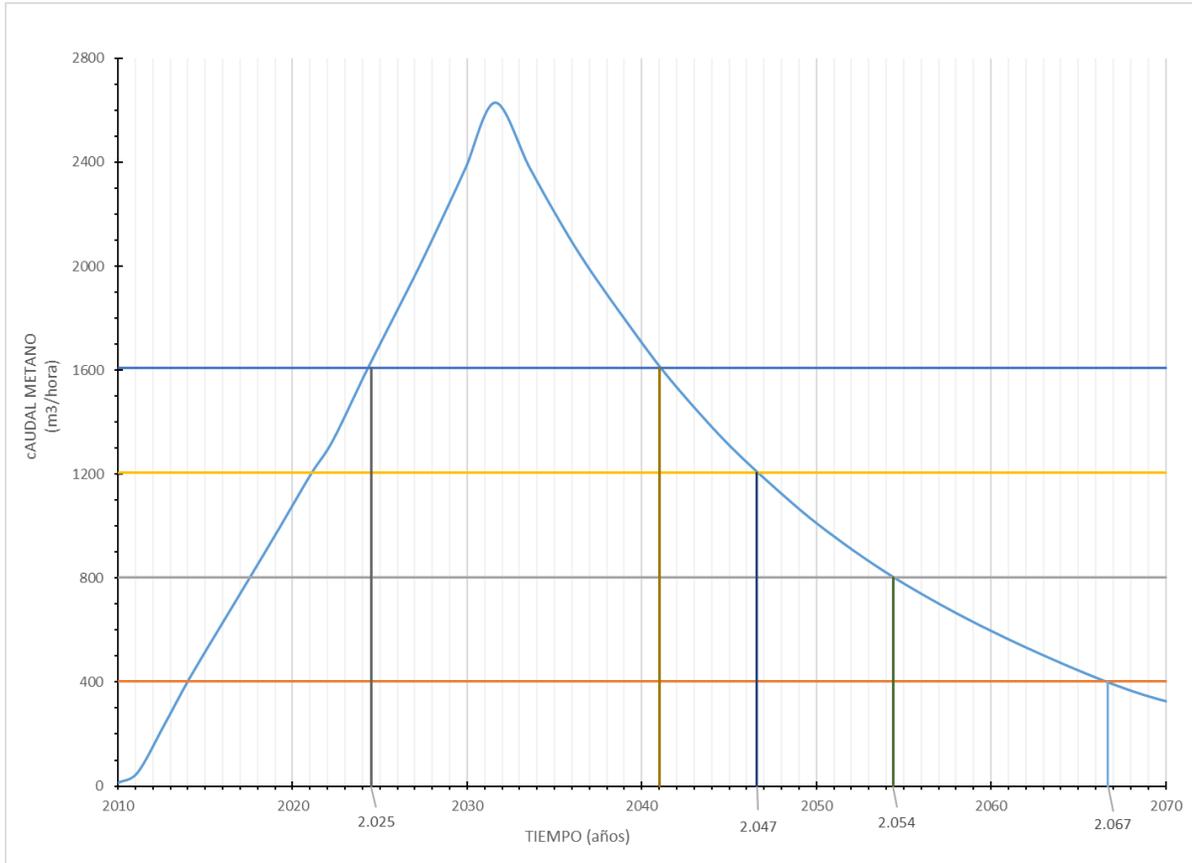


Tabla 15. Cálculo de la energía disponible y estimación de los años de producción

Nro.	Flujo de biogás q (m^3/hr)	Energía Disponible ($KWh/año$)	Tiempo (años)
1	400	726,77	42
2	800	1453,54	29
3	1200	2180,30	22
4	1600	2907,07	16

Como se puede observar en la Tabla 15, el valor de generación que garantiza un tiempo de vida extenso y una mayor generación se encuentra en el Nro. 2, con un flujo de biogás de 800 metros cúbicos por hora.

El siguiente paso es seleccionar los equipos de generación eléctrica lo más cercana a 1453 KWh. Para continuar con una propuesta de solución, se escoge entre las opciones de equipos que proporciona el software RetSCREEN.

Figura 20. Selección de las Unidades de Generación Eléctrica, utilizando las opciones que proporciona el software RetSCREEN

Sistema	Electricidad
Tecnología	Motor a pistones
Rango de capacidad	<input type="checkbox"/>
	kW 0 a kW 80.080
Fabricante	
Modelo	
Capacidad por unidad	kW 730
Número de unidades	2
Capacidad	kW 1.460

Se estima una Disponibilidad del 85% de la Unidad de Generación Eléctrica. Para los parámetros de Costos, el Costo inicial de \$/KWh se coloca en 1100 y el Costo de O. y M. de \$/KWh se estima en 187.

Figura 21. Datos técnicos de Equipo de generación eléctrica con motor de combustión interna

Selección del combustible	
Tipo de combustible	Gas de relleno sanitario (biogas) - m ³
Precio del combustible	\$/m ³ 0
Motor a pistones	
Capacidad de generación eléctrica	kW 1.460
Disponibilidad	% 85% 7.446 h
Fabricante	
Modelo	
Número de unidades	
Rendimiento calórico	kJ/kWh 12.000
Combustible requerido	GJ/h 17,5
Costos iniciales	\$/kW 1.100
	\$ 1.606.000
Costos de O y M (ahorros)	\$/kW-año 187
	\$ 273.020
Consumo de combustible	m ³ 7.036.350
Costo del combustible	\$ 0
Tarifa de exportación de electricidad	Tarifa de exportación de electricidad -
	\$/kWh 0,07
Electricidad exportada a la red	MWh 10.871
Ingresos por exportación de electricidad	\$ 760.981

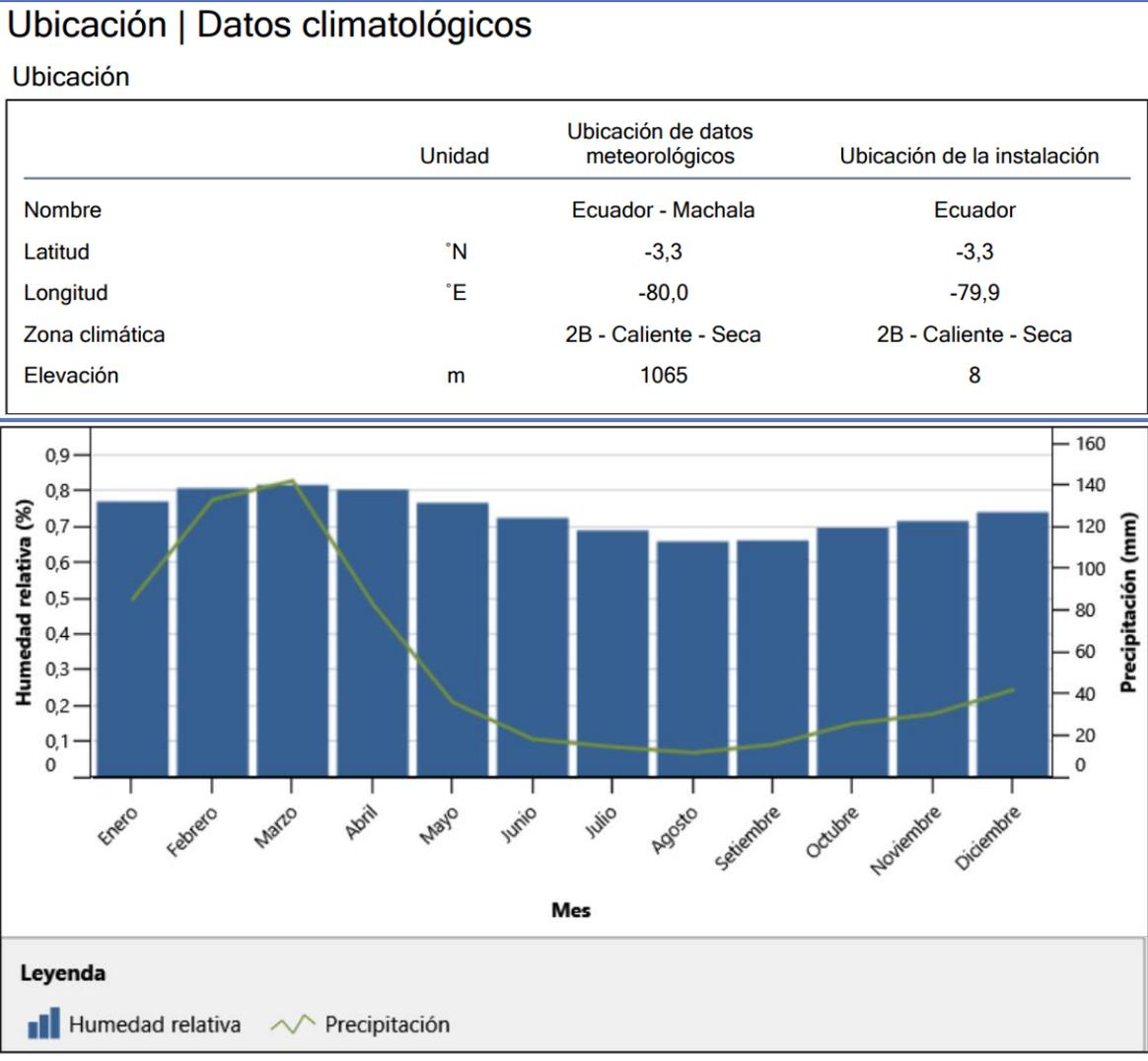
Los pasos realizados hasta ahora se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16. Ingreso de información en el software RetSCREEN

Figura	Información ingresada
Figura 14	Se navega en el mapa del software para escoger el punto donde se encuentra el RS de Ceibales.
Figura 15 y 16	Datos del RS de Ceibales. En la Figura 16 se ingresó la cantidad de basura que se deposita en el RS Ceibales.
Figura 17	Se ingresan parámetros característicos de los residuos que se depositan en el RS. Estos son los parámetros k , L_0 , % de metano en el biogás, Eficiencia de captación de biogás, Poder calorífico del biogás. El programa RetSCREEN tiene valores típicamente utilizados y estos pueden ser modificados por el usuario.
Figura 18	Se obtiene la curva de generación de biogás del RS de Ceibales.
Figura 19	La curva de generación de biogás del RS se la divide por bandas de flujo de biogás y se lo transforma en la energía disponible de cada una de ellas. Considerando el inicio del proyecto de generación eléctrica en el año 2025, de la gráfica se obtiene el año de finalización para cada capacidad de generación eléctrica, Tabla 15.
Figura 20	Selección de las Unidades de Generación Eléctrica, utilizando las opciones que proporciona el software RetSCREEN
Figura 21	Datos técnicos de Equipo de generación eléctrica con motor de combustión interna escogido en el software RetSCREEN.

El software se conecta con bases de datos que contienen información del clima de todo el mundo y una vez seleccionado el lugar donde va a realizarse el proyecto esta información es accesible para el investigador.

Figura 22. Información del Clima en la ubicación seleccionada para el RS de Ceibales

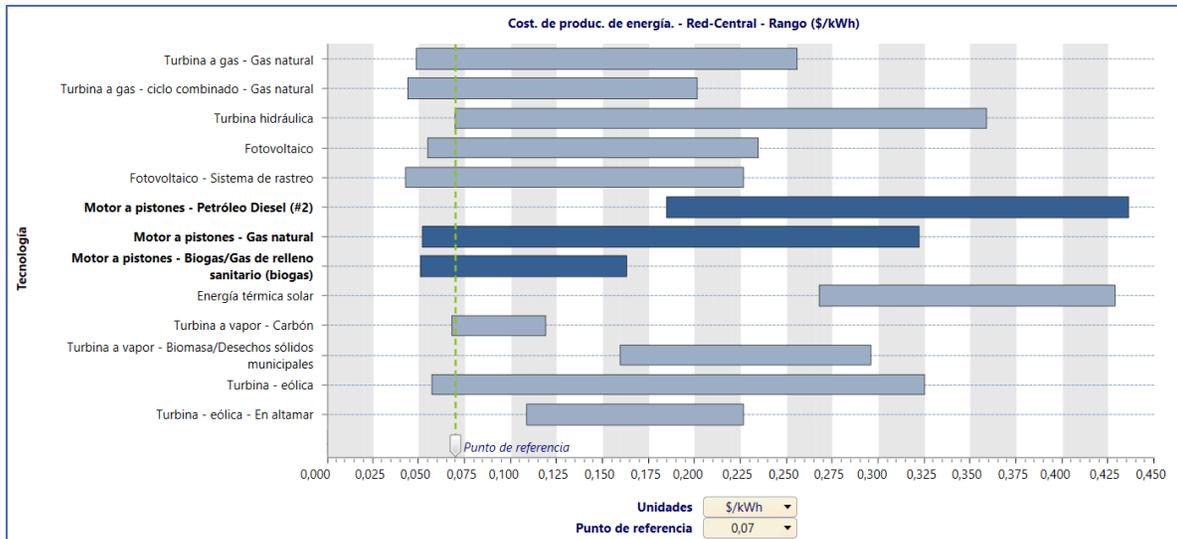


continuación de Figura 22.

Mes	Temperatura del aire °C	Humedad relativa %	Precipitación mm	Radiación solar diaria - horizontal kWh/m ² /d	Presión atmosférica kPa	Velocidad del Viento m/s	Temperatura del suelo °C
Enero	21,0	77,0%	85,25	4,83	89,9	2,1	22,7
Febrero	21,1	80,7%	133,00	4,80	89,9	2,0	22,5
Marzo	21,1	81,6%	141,98	5,19	89,9	1,8	22,3
Abril	21,2	80,3%	83,10	4,88	89,9	1,5	22,3
Mayo	21,1	76,6%	35,96	4,65	89,9	1,4	22,2
Junio	20,6	72,4%	18,30	4,60	90,0	1,4	21,7
Julio	20,3	68,9%	14,57	4,65	90,0	1,4	21,6
Agosto	20,5	65,8%	11,78	4,93	90,0	1,4	22,1
Setiembre	20,7	66,1%	15,60	5,18	90,0	1,6	22,6
Octubre	20,6	69,6%	25,73	4,95	90,0	1,9	22,6
Noviembre	20,6	71,5%	30,30	5,26	89,9	2,1	22,6
Diciembre	20,9	74,0%	41,85	5,07	89,9	2,1	22,7
Anual	20,8	73,7%	637,42	4,92	89,9	1,7	22,3

El software RetSCREEN proporciona una comparación de las tecnologías que más se ajustan al valor de venta de la energía eléctrica.

Figura 23. Comparación de tecnologías por el costo de producción de energía



En la Figura 24 se pueden leer los parámetros con los que funcionará el proyecto de Generación eléctrica con la Alternativa 1. Tales como:

- Tiempo de vida del proyecto: Es el tiempo en años que puede mantener la generación de energía eléctrica de diseño.
- Combustible requerido: Es el flujo de biogás que requieren las unidades de generación para mantenerse operando a la potencia de diseño.
- Potencial de combustible biogás: Es el flujo de biogás que el RS va a suministrar a las unidades de generación durante el tiempo de vida del proyecto.

Figura 24. Parámetros de la Generación de energía con la Alternativa 1

Año inicio-consumo de combust. Biogas	año	2025
Tiempo de vida del proyecto	año	29
Unidades		Volumen ▼
Combustible requerido - promedio	m ³ /h	803
Potencial de combustible biogas	m ³ /h	803
Combustible remanente requerido	m ³ /h	0
Combustible requerido - anual	m ³ /año	7.036.350
Potencial de combustible biogas - anual	m ³ /año	14.206.428

Figura 25. Biogás generado en el RS y el demandado para la Alternativa 1

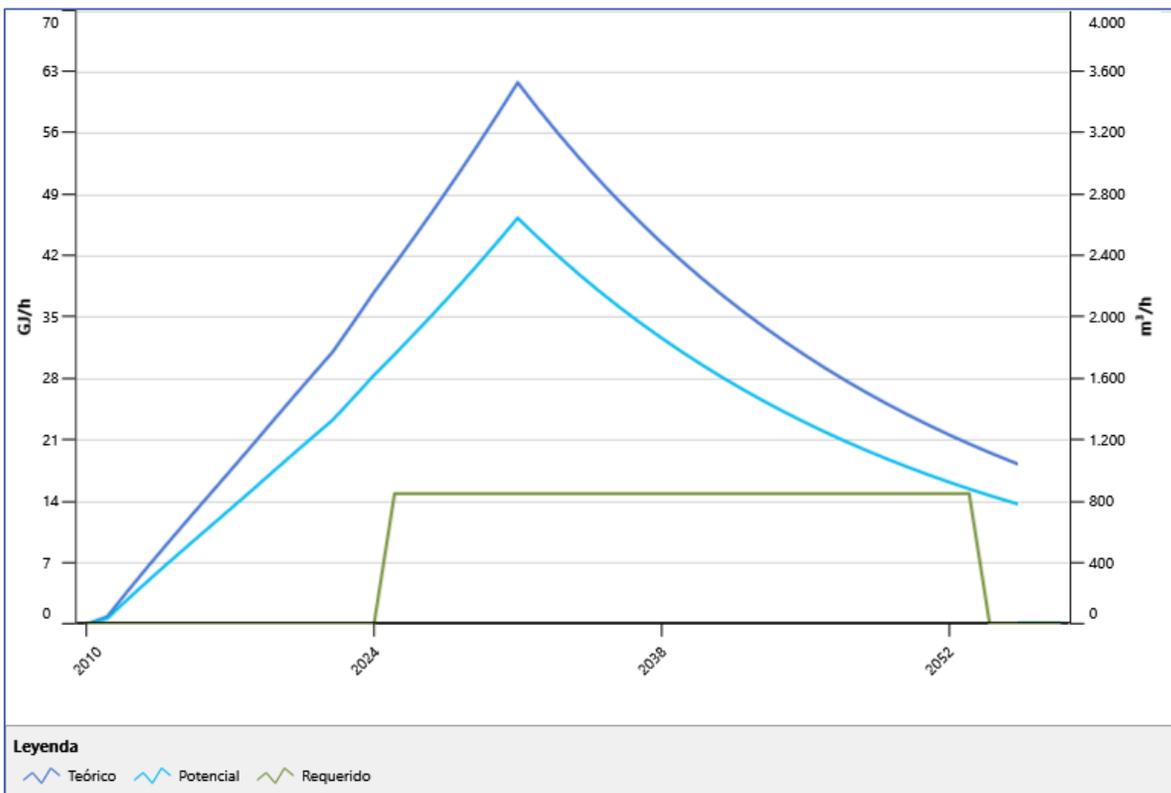
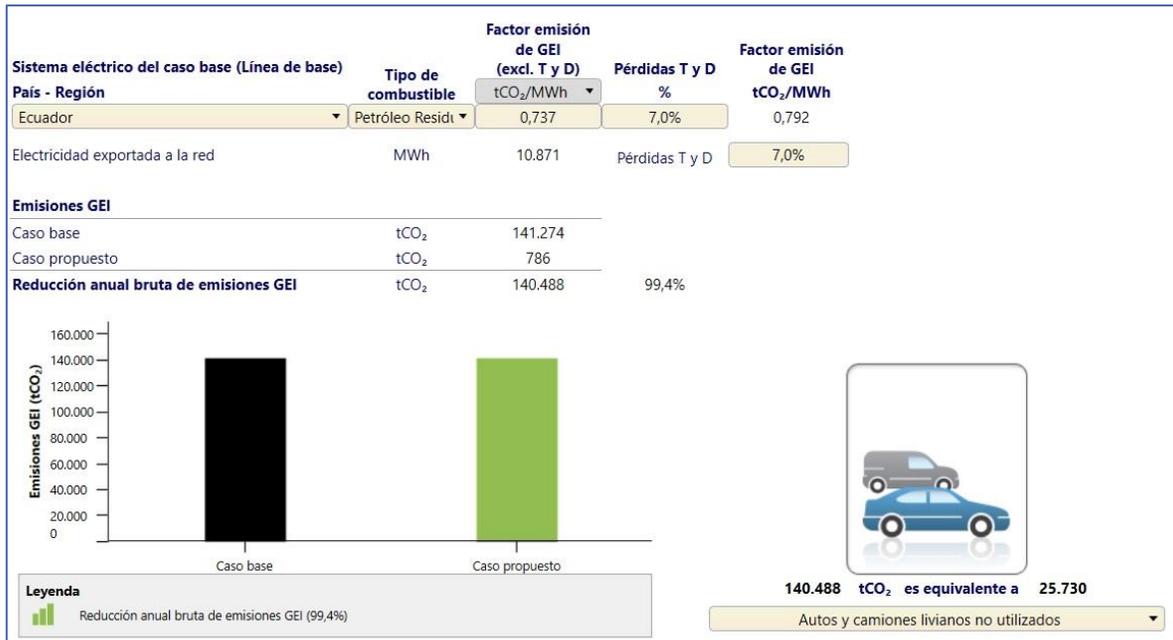


Figura 26. Análisis de GEI por el aprovechamiento del recurso de biogás, Alternativa 1.



Para realizar el análisis financiero utilizando las herramientas del software RetSCREEN, se considera un valor inicial de inversión de 1'000.000 y con toda la información se obtuvo la siguiente evaluación financiera

Figura 27. Flujo de Caja de la Alternativa 1.

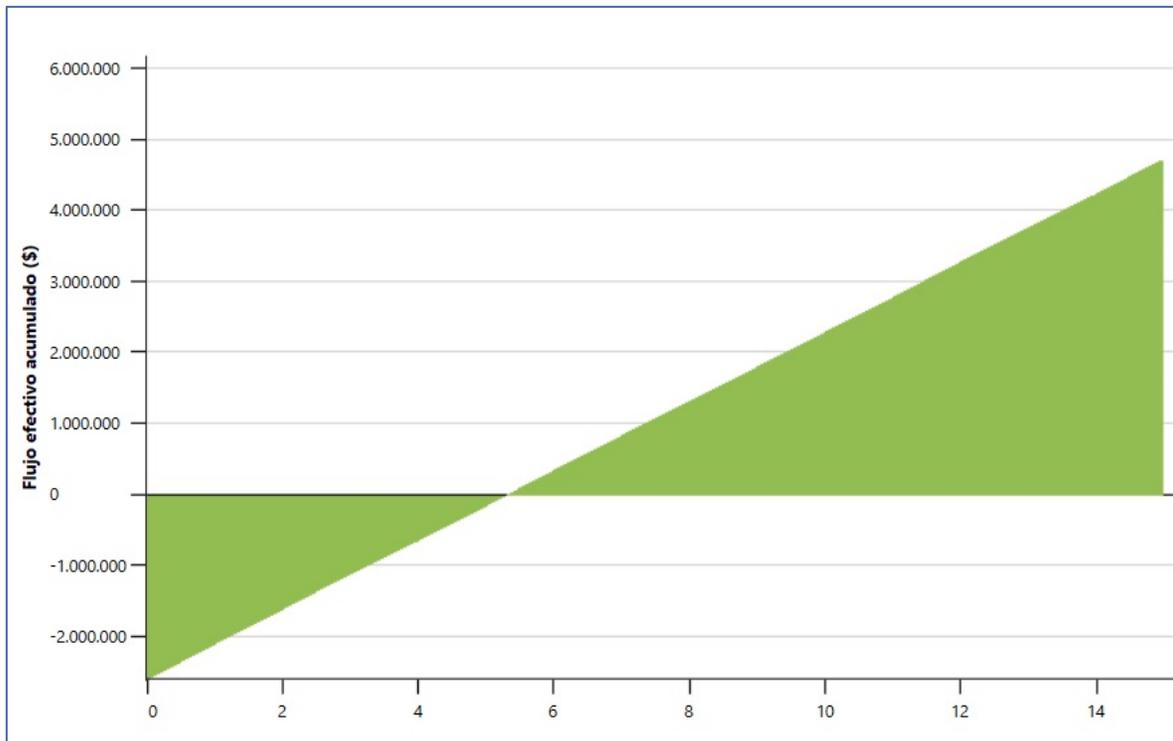


Figura 28. Evaluación financiera de la planta de generación eléctrica – Alternativa 1

Parámetros financieros		
Tasa de inflación	%	0%
Tiempo de vida del proyecto	año	15
Relación de deuda	%	0%
Costos iniciales totales	\$	2.606.000
Incentivos y donaciones	\$	
Costos anuales/pagos de deuda		
Costos de O y M (ahorros)	\$	273.020
Costo de combustible - caso propuesto	\$	0
Pagos de la deuda	\$	0
Costos anuales totales	\$	273.020
Ahorros e ingresos anuales		
Ingresos por exportación de electricidad	\$	760.981
Ahorro en reducción de GEI	\$	0
Ingresos y ahorros anuales totales	\$	760.981
Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - activos	%	16,9%
Pago simple de retorno del capital	año	5,3
Repago - capital	año	5,3

Debido a que el contrato inicial que se entrega para desarrollar un proyecto de generación eléctrica es de 15 años, es el tiempo que se utilizó para realizar el análisis financiero.

4.1.2 Caso de estudio RS de Ceibales – Alternativa 2

Según el Marco Teórico en la Tabla 11 y el rango de potencia eléctrica que se puede generar electricidad con el biogás del RS de Ceibales, Tabla 15, se recomienda como solución la tecnología el MCI. Sin embargo, la Alternativa 2 se va a desarrolló escogiendo como unidad de generación una Turbina a Gas.

Ingresando los mismos parámetros de la Alternativa 1 para el RS, se utiliza el software RetSCREEN como herramienta para soportar el Diseño, y obtenemos los siguientes resultados.

Figura 29. Selección de una Turbina a Gas para el proyecto de Generación eléctrica en el RS de Ceibales utilizando el software RetSCREEN

Selección del combustible		
Tipo de combustible		Gas de relleno sanitario (biogas) - m ³
Precio del combustible	\$/m ³	0
Turbina a gas		
Capacidad de generación eléctrica	kW	2.023
Disponibilidad	%	85%
Fabricante		
Modelo		
Número de unidades		
Rendimiento calórico	kJ/kWh	12.711
Combustible requerido	GJ/h	25,7
Costos iniciales	\$/kW	2.400
	\$	4.855.200
Costos de O y M (ahorros)	\$/kW-año	146
	\$	295.358
Consumo de combustible	m ³	10.327.350
Costo del combustible	\$	0
Tarifa de exportación de electricidad		Tarifa de exportación de electricidad -
	\$/kWh	0,07
Electricidad exportada a la red	MWh	15.063
Ingresos por exportación de electricidad	\$	1.054.428

Figura 30. Curva de generación de biogás en el RS de Ceibales para la Generación eléctrica con una Turbina a Gas utilizando el software RetSCREEN

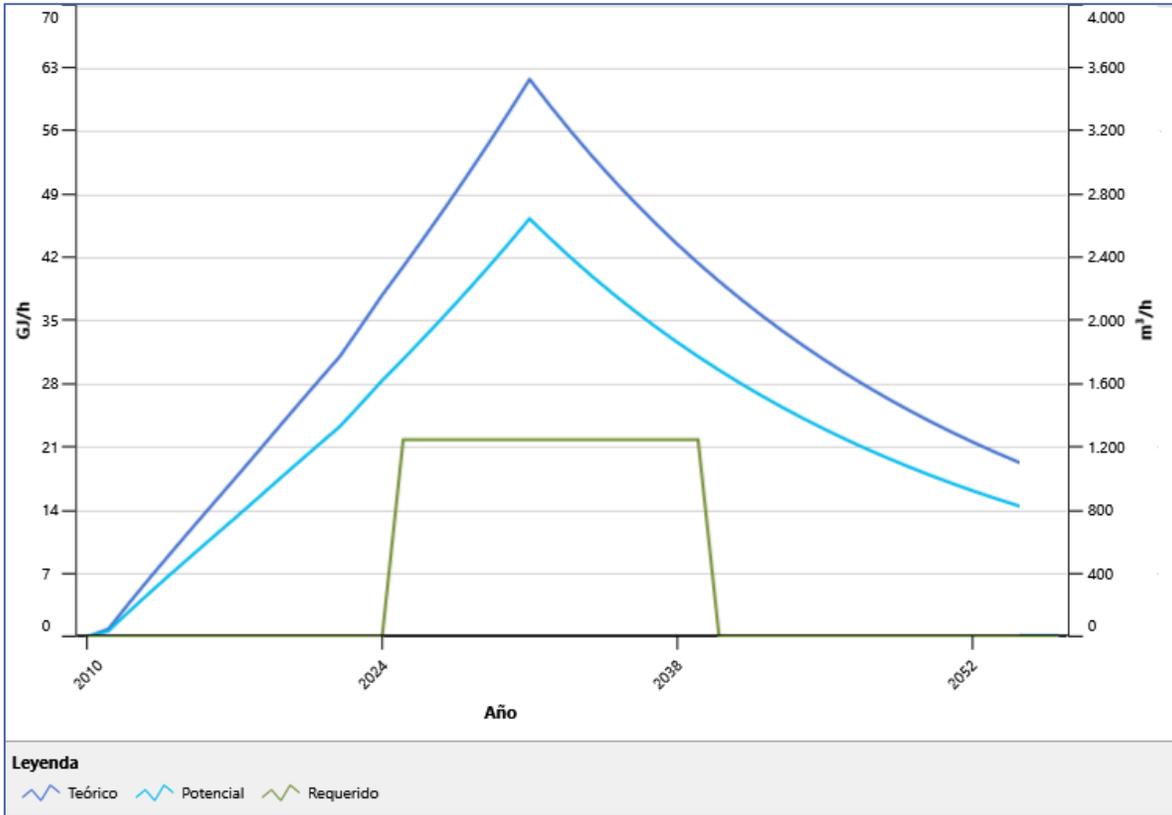


Figura 31. Datos técnicos para la Generación eléctrica con una Turbina a Gas utilizando el software RetSCREEN

Proyecto de producción de energía		
Año inicio-consumo de combust. Biogas	año	2025
Tiempo de vida del proyecto	año	15
Unidades		Volumen ▼
Combustible requerido - promedio	m ³ /h	1.179
Potencial de combustible biogas	m ³ /h	1.179
Combustible remanente requerido	m ³ /h	0
Combustible requerido - anual	m ³ /año	10.327.350
Potencial de combustible biogas - anual	m ³ /año	17.855.368

Figura 32. Datos técnicos para la Generación eléctrica con una Turbina a Gas utilizando el software RetSCREEN

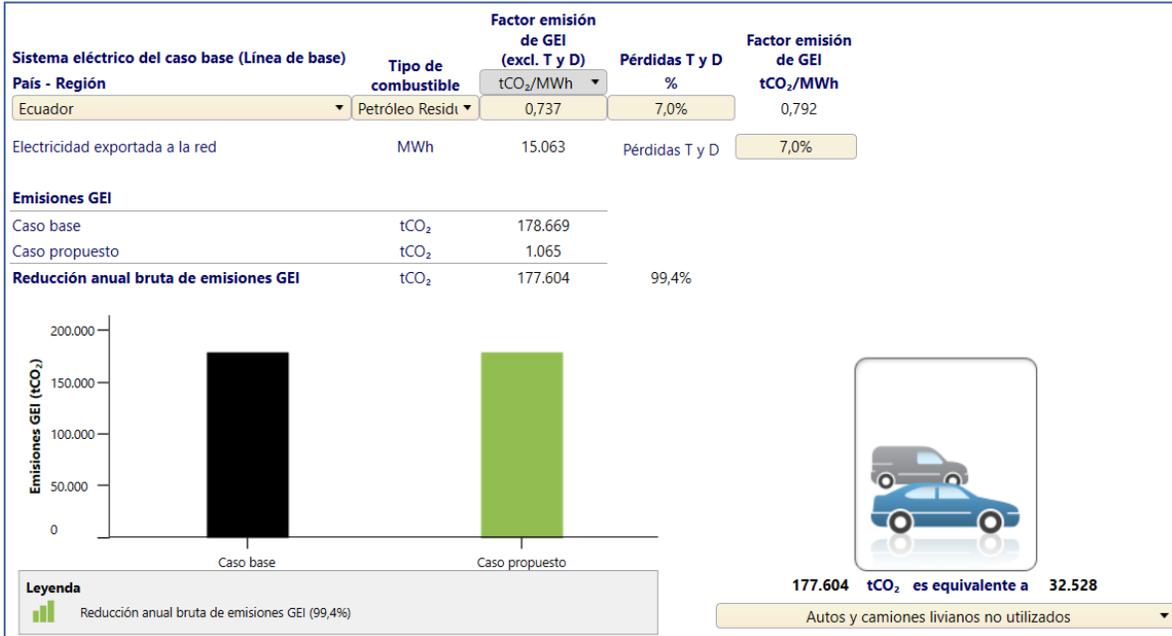


Figura 33. Flujo de Caja para Generación eléctrica en el RS de Ceibales con una Turbina a Gas utilizando el software RetSCREEN

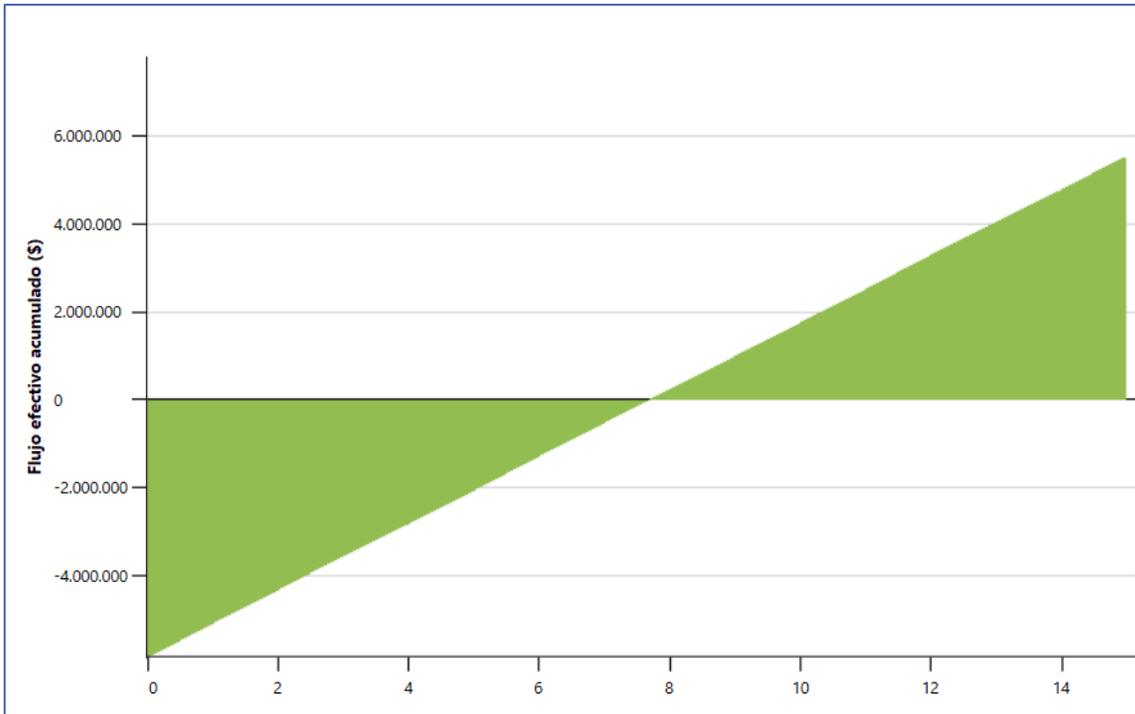


Figura 34. Análisis financiero para la Generación eléctrica en el RS de Ceibales con una Turbina a Gas utilizando el software RetSCREEN

Parámetros financieros		
Tasa de inflación	%	0%
Tiempo de vida del proyecto	año	15
Relación de deuda	%	0%
Costos iniciales totales	\$	5.855.200
Incentivos y donaciones	\$	
Costos anuales/pagos de deuda		
Costos de O y M (ahorros)	\$	295.358
Costo de combustible - caso propuesto	\$	0
Pagos de la deuda	\$	0
Costos anuales totales	\$	295.358
Ahorros e ingresos anuales		
Ingresos por exportación de electricidad	\$	1.054.428
Ahorro en reducción de GEI	\$	0
Ingresos y ahorros anuales totales	\$	1.054.428
Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - activos	%	9,8%
Pago simple de retorno del capital	año	7,7
Repago - capital	año	7,7

4.1.3 Caso de estudio RS de Ceibales – Alternativa 3

Supuesto:

Situándonos en el año 2005 se planifica la construcción del RS Ceibales que iniciará la apertura en el 2010 y cierre en el 2030, durante estos años se depositarán los RSU de la ciudad de Machala y complementariamente se va a Generar electricidad con el biogás para venderlo a la red eléctrica.

Propósito: Aprovechar desde los primeros años la mayor cantidad de biogás que se genera en el RS de Ceibales.

Paso 1. Conociendo la Curva de generación de biogás del RS de Ceibales Figura 18, se va a aprovechar la selección tecnológica realizada en la Alternativa 1, se plantea ingresar paulatinamente MCI para aprovechar la mayor cantidad de biogás del RS.

Figura 35. MCI que se va a utilizar para realizar un crecimiento de la generación eléctrica.

The image shows a software interface for configuring a system. The settings are as follows:

Sistema	Electricidad
Tecnología	Motor a pistones
Rango de capacidad	0 kW a 80.080 kW
Fabricante	[Empty dropdown]
Modelo	[Empty dropdown]
Capacidad por unidad	730 kW
Número de unidades	1
Capacidad	730 kW

Paso 2. Planificación del crecimiento de la generación eléctrica en el RS de Ceibales con MCI.

Se extrae la información de los puntos de la Figura 18. Para extraer los puntos de la curva de biogás del RS Ceibales se utilizó el software gratuito en línea <https://automeris.io/wpd/>.

Figura 36. Extracción de puntos de la curva de generación de biogás del RS de Ceibales

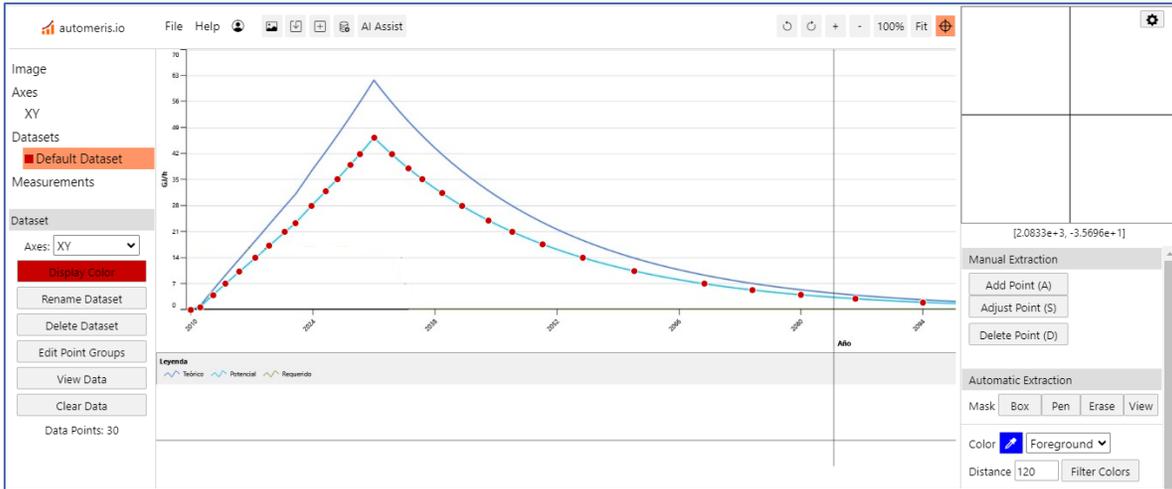


Figura 37. Requerimiento de biogás de cada MCI durante el crecimiento de la Generación eléctrica en el RS de Ceibales.

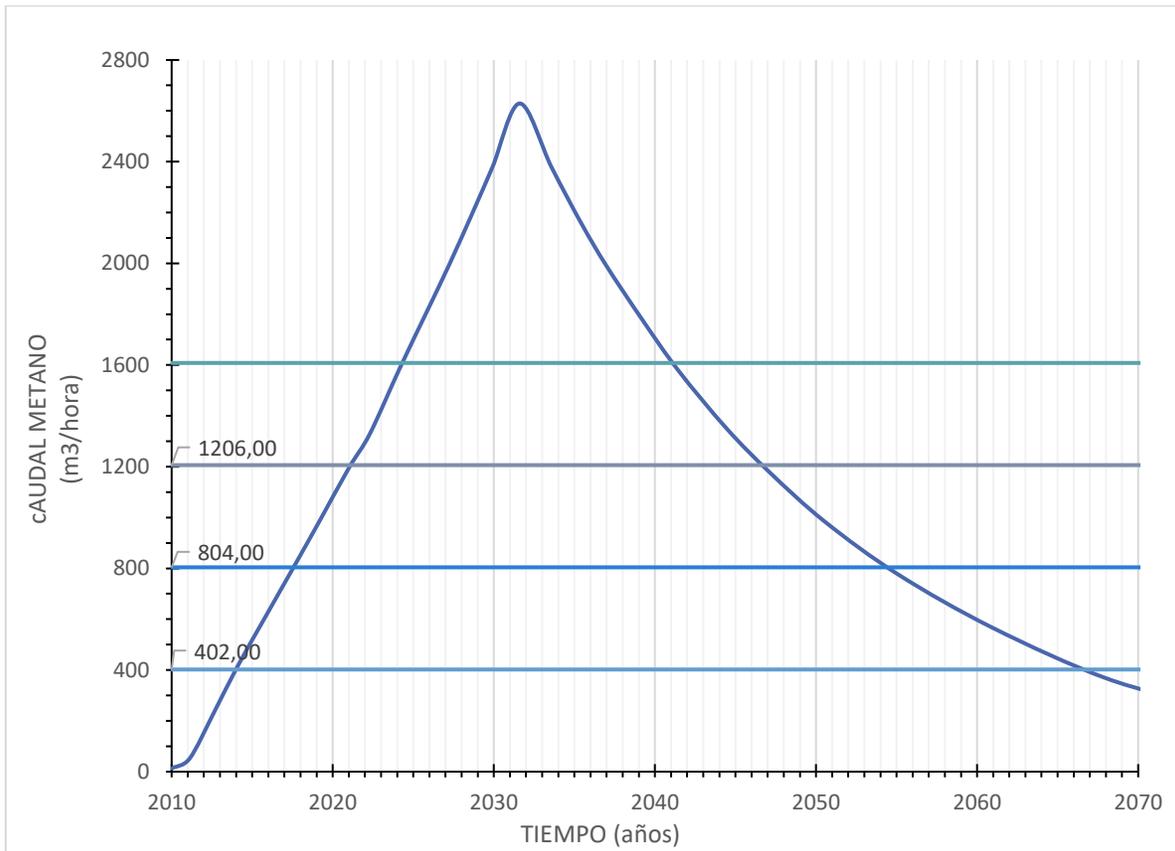
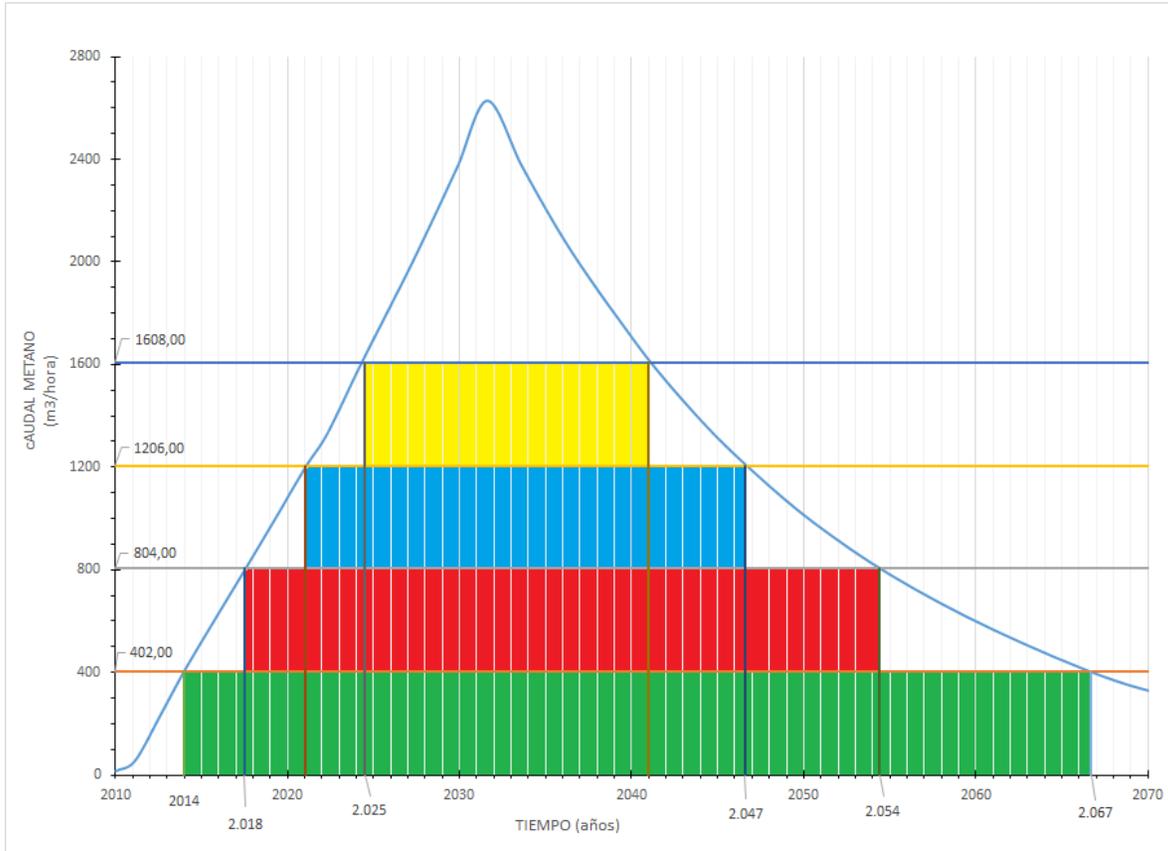


Figura 38. Año de ingreso de cada MCI durante el crecimiento de la Generación eléctrica en el RS de Ceibales.



En la Tabla 17 se puede encontrar el ingreso de todos los MCI que se han determinado en la Figura 37.

Tabla 17. Generación eléctrica de cada MCI en la Alternativa 3

Banda	Nro. MCI	Flujo de biogás Q (m^3/hr)	Generación (KW)	Inicio	Fin	Tiempo de servicio
Verde	1	402	730	2014	2067	53
Rojo	2	402	730	2018	2020	36
Celeste	3	402	730	2021	2047	26
Amarillo	4	402	730	2025	2041	16

Tabla 18. Parámetros técnicos de cada MCI para la Alternativa 3

Banda	Verde	Rojo	Celeste	Amarillo
Nro. MCI	1	2	3	4
Generación eléctrica (KW)	730	730	730	730
Combustible requerido - promedio (m3/año)	402	402	402	402
Combustible requerido - anual (m3/año)	3518175	3518175	3518175	3518175
Costo compra equipo (\$)	803000	803000	803000	803000
Costo O y M - anual (\$)	136510	136510	136510	136510
Energía exportada a la red (MWh)	5436	5436	5436	5436
Ingreso por exportación de electricidad (\$)	380491	380491	380491	380491
Tiempo de servicio (años)	52	36	26	16

Figura 39. Flujo de Caja para la Alternativa 3

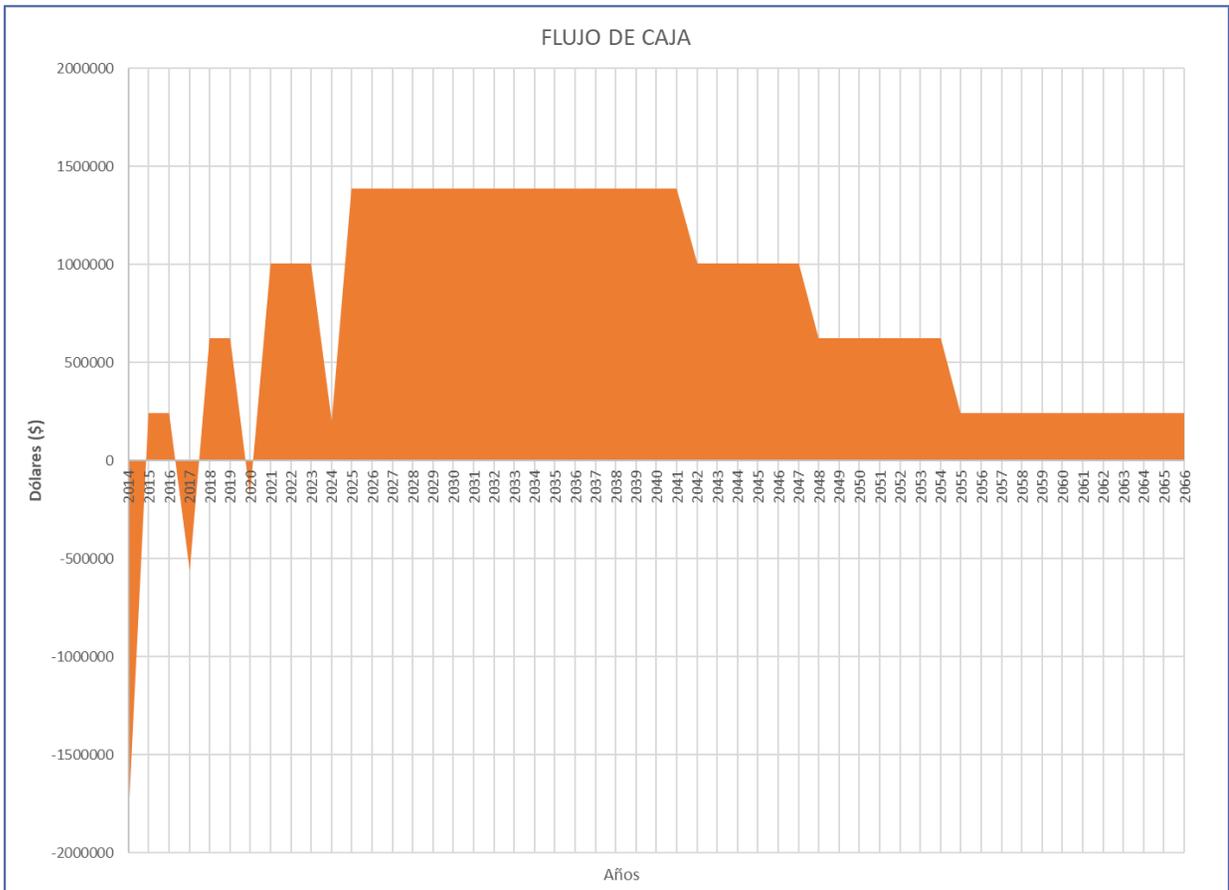
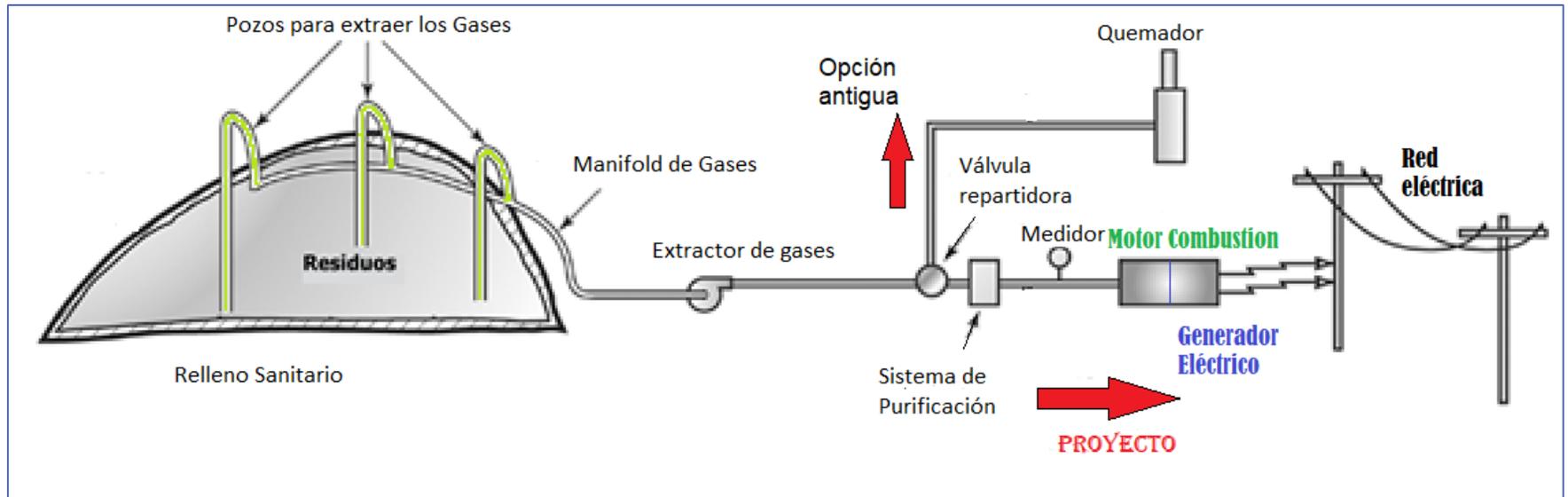


Tabla 19. Flujo de Caja para la Alternativa 3

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040			
Ingreso Banda 1		380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491		
Ingreso Banda 2					380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	
Ingreso Banda 3								380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	
Ingreso Banda 4																														
Total Ingresos	0	380491	380491	380491	760982	760982	760982	1141473	1141473	1141473	1141473	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	1521964	
Gasto O y M		136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510
Compra equipo	803000				803000			803000				803000																		
Inversión inicial	1000000																													
Total Gastos	1803000	136510	136510	939510	136510	136510	939510	136510	136510	939510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510
Flujo de Caja	-1803000	243981	243981	-559019	624472	624472	-178528	1004963	1004963	1004963	201963	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454	1385454

	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066			
Ingreso Banda 1	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491		
Ingreso Banda 2	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491														
Ingreso Banda 3	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491																						
Ingreso Banda 4	380491																												
Total Ingresos	1521964	1141473	1141473	1141473	1141473	1141473	1141473	760982	760982	760982	760982	760982	760982	760982	760982	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	380491	
Gasto O y M	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510
Compra equipo																													
Inversión inicial																													
Total Gastos	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510	136510
Flujo de Caja	1385454	1004963	1004963	1004963	1004963	1004963	1004963	624472	624472	624472	624472	624472	624472	624472	624472	243981	243981	243981	243981	243981	243981	243981	243981	243981	243981	243981	243981	243981	243981

Figura 40. Configuración de una Planta de Generación eléctrica con biogás de un Relleno Sanitario



CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES

Luego del desarrollo del presente trabajo en la parte de investigación y la propuesta de instalar una Planta de Generación eléctrica que utilice el metano de un RS, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1.- Contribución al Medio Ambiente: El diseño e implementación de una planta de generación eléctrica a partir de biogás de un relleno sanitario representa una significativa contribución a la lucha contra el calentamiento global. Al capturar y utilizar el metano, un gas de efecto invernadero altamente potente, se evita su liberación directa a la atmósfera, reduciendo así las emisiones de gases que contribuyen al calentamiento global.

2.- Alineación con Iniciativas Globales: La construcción de esta planta se alinea con varias iniciativas globales y nacionales dirigidas a la mitigación del cambio climático. La adhesión a acuerdos internacionales como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, y el cumplimiento de normativas nacionales de gestión de residuos y energías renovables, muestran el compromiso con un desarrollo sostenible.

3.- Avances Tecnológicos: La tecnología empleada en la planta de biogás refleja avances significativos en ingeniería y gestión de residuos que pueden implementarse en Ecuador. El uso de sistemas de captura y purificación de biogás garantiza el éxito del proyecto.

4.- Diversificación Energética: La planta de biogás contribuye a la diversificación de la matriz de generación eléctrica, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles y promoviendo el uso de fuentes de energía renovable. Este cambio mejora la seguridad energética del país y genera beneficios económicos y ambientales a largo plazo.

5.- Impacto Social: La implementación de la planta de biogás tiene un impacto positivo en la comunidad local, creando empleo y promoviendo la conciencia ambiental. Generar energía a partir de residuos, va de la mano con un proceso de reciclaje, lo cual disminuye la cantidad de basura en los rellenos sanitarios, prolongando su vida útil y reduciendo problemas asociados como la contaminación del suelo y del agua.

6.- Modelo Sostenible: La planta de generación eléctrica con biogás de relleno sanitario es un ejemplo de cómo la integración de tecnologías verdes en la gestión de residuos puede ser sostenible y beneficiosa a largo plazo. El proyecto puede servir como modelo para futuras iniciativas similares.

7.- Viabilidad Económica: Se desarrollaron alternativas tecnológicas que demostraron ser económicamente viables, siendo la tecnología de motores de combustión interna (MCI) la más rentable frente a la opción de turbinas a gas. Para una potencia de generación eléctrica menor a 3 MW.

8.- Planificación Integral: Planificar el relleno sanitario y la planta de generación eléctrica simultáneamente permite diseñar la capacidad de generación eléctrica acorde al aumento de la producción de biogás, incrementando los réditos económicos del proyecto.

9.- Beneficios Económicos: La venta de electricidad generada a partir de biogás proporciona ingresos adicionales al gobierno local, mejorando la gestión de residuos y la salud pública.

10.- Proyección a Futuro: El diseño de la planta contempla el crecimiento en la producción de biogás, teniendo la capacidad de aumentar la capacidad de generación eléctrica asegurando la viabilidad y rentabilidad del proyecto a largo plazo.

11.- Eficiencia Energética: La planta de generación eléctrica con biogás mejora la eficiencia energética al utilizar residuos que de otra manera serían subutilizados.

12.- Conciencia Ambiental: El proyecto promueve la conciencia ambiental entre la población, incentivando prácticas de reciclaje y manejo adecuado de residuos.

13.- Réplica del Proyecto: El modelo de planta de biogás es rentable y puede ser replicado en otros rellenos sanitarios del país, maximizando los beneficios ambientales y económicos de la administración municipal.

14.- Mejora de la Calidad del Aire: Al reducir la quema abierta de residuos y la liberación de metano, la planta contribuye a la mejora de la calidad del aire en las comunidades cercanas.

15.- Fomento de la Colaboración: El proyecto fomenta la colaboración entre entidades gubernamentales, privadas y académicas, promoviendo un enfoque integral y coordinado para la gestión de residuos y la generación de energía.

Sobre las alternativas de Diseño de una Planta de generación eléctrica para un RS con disposición final de 400 ton/día:

16.- Se desarrollaron las alternativas de solución 1 y 2, contrastando la información recomendada en la bibliografía existente que se desarrolló en el Marco teórico y poniendo a prueba el conocimiento propuesto. De acuerdo con el flujo de biogás y la capacidad de generación eléctrica, la tecnología que se debía desarrollar era la de la Alternativa 1, con la cual se llega a una capacidad de generación de 1.4 MW con dos motores de combustión interna. Mientras que la Alternativa 2, al seleccionar una Turbina a Gas los costos son más elevados, y en el análisis económico se observa que el tiempo en obtener el retorno de la inversión con esta tecnología es mayor y es más susceptible de tener problemas financieros si cambian condiciones como el precio de venta de la electricidad, biogás disponible para la generación, incremento de otros costos, etc.

17.- En la Alternativa 3 se propone planificar el Relleno Sanitario y la Planta de Generación eléctrica al mismo tiempo, lo cual permite que se diseñe la capacidad de la generación eléctrica siguiendo el aumento de la producción de biogás al aumentar los años de vida y el depósito de los desechos. El beneficio que se obtiene es una planta con mayores réditos económicos al tener mayor capacidad de energía eléctrica que se puede vender a la red eléctrica.

REFERENCIAS

- Alexander, Amy; Burklin, Clint; Singleton, Amanda; Eastern Research Group. (s.f.). *EPA United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 20 de 05 de 2024, de <https://www.epa.gov/land-research/landfill-gas-emissions-model-landgem>
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (Marzo de 2017). Recuperado el 2024, de <https://publications.iadb.org/es>
- Dávila, J. L. (2004). *Global Methane Initiative (GMI)*. Recuperado el 2024, de <https://globalmethane.org/search/index.aspx>
- Escamilla-García, P. E. (28 de Febrero de 2019). Eficiencia y Confiabilidad de Modelos de Estimación de Biogas en Rellenos Sanitarios. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 19(1), 32-44. doi:<http://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.03>
- Ogunjuyigbe, A. S., Ayodele, T. R., & Alao, M. A. (2017 de Mayo de 2017). <https://www.sciencedirect.com/>. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117308134>
- Pipatti, R., Svardal, P., Silva, J. W., Gao, Q., López, C., Mareckova, K., . . . Yamada, M. (2006). *Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC*. (S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Edits.) Obtenido de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol5.html>
- Rodrigo Clavero, M. E. (Septiembre de 2016). *BIOLEACH: un modelo matemático para la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Wellinger, A., Murphy, J., & Baxter, D. (2013). *The biogas handbook. Science, production and applications*. Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing Limited.

APÉNDICES Y ANEXOS