



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO
ENERGÉTICO DEL BIOGÁS RESIDUAL GENERADO POR EL RELLENO
SANITARIO COMPLEJO AMBIENTAL CHASINATO DE LA EPM-GIDSA”**

AUTOR: Andrés Joffre Guevara Torres

TUTOR: Ing. Mg. Santiago Paúl Cabrera Anda

AMBATO – ECUADOR

Septiembre - 2021

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del Proyecto Técnico, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS RESIDUAL GENERADO POR EL RELLENO SANITARIO COMPLEJO AMBIENTAL CHASINATO DE LA EPM-GIDSA”**, elaborado por el Sr. Andrés Joffre Guevara Torres, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 1804318622, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente proyecto técnico es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, Septiembre 2021

Ing. Mg. Santiago Paúl Cabrera Anda
TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, **Andrés Joffre Guevara Torres**, con C.I. 1804318622, declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el desarrollo del presente proyecto técnico con el tema **“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS RESIDUAL GENERADO POR EL RELLENO SANITARIO COMPLEJO AMBIENTAL CHASINATO DE LA EPM-GIDSA”**, así como también las tablas, los criterios, ideas, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de la referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Septiembre 2021



Andrés Joffre Guevara Torres

C.I. 1804318622

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto Técnico, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Septiembre 2021



Andrés Joffre Guevara Torres

C.I. 1804318622

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico, realizado por el estudiante Andrés Joffre Guevara Torres de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS RESIDUAL GENERADO POR EL RELLENO SANITARIO COMPLEJO AMBIENTAL CHASINATO DE LA EPM-GIDSA”**.

Ambato, Septiembre 2021

Para constancia firman:

Ing. Mg. Luis Eduardo Escobar Luna
Miembro Calificador

Ing. Mg. José Luis Yunapanta Velasteguí
Miembro Calificador

DEDICATORIA

Al Sol y al planeta Tierra por permitirnos aprovechar sus recursos energéticos renovables en energía útil, a nuestra Pacha Mama por cobijar a todo ser viviente y mantener la sostenibilidad ambiental con su independiente y místico poder de sanación, a todas las organizaciones intergubernamentales en la lucha del cambio climático y a la ciudad de los tres Juanes Ambato.

- Andrés Joffre Guevara Torres

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios Jehová, Dios universo por permitirme llevar una vida prudente y con un responsable libre albedrío, que por medio de una sincera oración supo acompañarme durante mis momentos de conflicto y necesidad.

A la Universidad Técnica de Ambato por proveer a los estudiantes una educación de calidad y calidez, por todos sus servicios de biblioteca, transporte, gimnasio, piscina y dispensario médico que supe aprovecharlos estratégicamente en mi proceso de formación profesional. Al centro de idiomas que con sus profesionales me permitieron desarrollar el idioma inglés como segunda lengua hablada.

A los excelentes docentes de la Carrera de Ingeniería Mecánica, todos ellos con diferentes competencias, experiencias y potenciales en su área de especialización que supieron transmitirlos eficazmente a sus estudiantes. A mi tutor Ing. Santiago Cabrera, por su paciencia, apoyo y conocimientos brindados durante mi carrera universitaria.

A la Empresa Pública Municipal GIDSA por facilitar información imprescindible para el desarrollo de esta investigación, además del acceso al relleno sanitario de Ambato. De igual manera a la Empresa GASGREEN S.A. por permitirme inspeccionar juntamente con ellos, el potencial del biogás producido en el relleno sanitario.

Por último, un formidable agradecimiento a mis padres Wilson y Mercedes quienes inculcaron en mí el valor responsable del trabajo y la resiliencia. A mis hermanos mayores Lorena, Maritza, Mercy y Robin quienes diariamente alimentaron mi motivación de culminar con mis estudios de pregrado, también a mis compañeros, que con nuestro lema “la unión hace la fuerza” ahora somos amigos y colegas.

- Andrés Joffre Guevara Torres

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

| | |
|---|------|
| CERTIFICACIÓN | ii |
| AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN | iii |
| DERECHOS DE AUTOR | iv |
| APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO | v |
| DEDICATORIA | vi |
| AGRADECIMIENTO | vii |
| ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS..... | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xii |
| ÍNDICE DE TABLAS | xiv |
| RESUMEN..... | xvi |
| ABSTRACT..... | xvii |
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| MARCO TEÓRICO..... | 1 |
| 1.1. Antecedentes Investigativos..... | 1 |
| 1.2. Objetivos | 4 |
| 1.2.1. Objetivo General: | 4 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos:..... | 4 |
| 1.3. Fundamentación legal..... | 5 |
| 1.4. Fundamentación Teórica | 7 |
| 1.4.1. Residuos Sólidos Urbanos | 7 |
| 1.4.2. Los Rellenos Sanitarios | 8 |
| 1.4.3. Requisitos técnicos con los que debe contar un relleno sanitario..... | 9 |
| 1.4.4. Rellenos Manuales y Rellenos con Compactación Mecanizada..... | 13 |
| 1.4.5. Métodos de Construcción de Rellenos Sanitarios..... | 15 |
| 1.4.5.1. Método de Trinchera | 15 |

| | |
|---|----|
| 1.4.5.2. Método de área | 15 |
| 1.4.6. Landfill gas o biogás generado en rellenos sanitarios | 16 |
| 1.4.7. Producción de landfill gas..... | 18 |
| 1.4.8. Modelos matemáticos para la estimación de producción de landfill gas. 20 | |
| 1.4.8.1. Modelo LandGEM | 20 |
| 1.4.8.2. Modelo Ecuatoriano | 27 |
| 1.4.9. Medidor de gases portátil..... | 29 |
| 1.4.10. Extracción del landfill gas | 31 |
| 1.4.10.1. Sistema pasivo | 31 |
| 1.4.10.2. Sistema Activo..... | 32 |
| 1.4.11. Sistema de tratamiento del landfill gas..... | 35 |
| 1.4.11.1. Métodos de purificación del landfill gas | 36 |
| 1.4.11.2. Método de adsorción | 36 |
| 1.4.11.3. Métodos de absorción | 38 |
| 1.4.11.4. Métodos de separación por diafragma | 38 |
| 1.4.11.5. Métodos biológicos | 39 |
| 1.4.12. Tecnologías en la generación de energía a partir de landfill gas | 40 |
| 1.4.12.1. Motor a combustión interna (MCI) | 43 |
| 1.4.12.2. Turbinas de gas | 44 |
| 1.4.12.3. Microturbinas | 44 |
| 1.4.12.4. Generador eléctrico | 44 |
| 1.4.12.5. Calderas, secadores y hornos | 45 |
| 1.4.12.6. Calentadores infrarrojos | 46 |
| 1.4.12.7. Evaporador de lixiviados | 46 |
| 1.4.12.8. Gas natural comprimido | 47 |
| 1.4.12.9. Gas natural licuado | 47 |
| CAPÍTULO II | 49 |

| | |
|--|----|
| METODOLOGÍA | 49 |
| 2.1. Ubicación del relleno sanitario de Ambato | 49 |
| 2.2. Características climatológicas | 49 |
| 2.3. Datos característicos del relleno sanitario de Ambato | 50 |
| 2.4. Recopilación y control de pesos de RSU en el relleno sanitario de Ambato | 51 |
| 2.5. Cálculo de parámetros para modelo LandGEM | 52 |
| 2.6. Selección de parámetros para modelo ecuatoriano | 53 |
| 2.7. Medición de landfill gas <i>in-situ</i> | 54 |
| 2.7.1. Área de muestreo | 55 |
| 2.7.2. Cuantificación de los pozos de venteo en las zonas de estudio | 55 |
| 2.7.3. Categorización de los pozos de venteo a ser muestreado | 55 |
| 2.7.4. Delimitación de los pozos a ser medidos | 56 |
| 2.7.5. Medición de landfill gas y sus compuestos | 57 |
| 2.8. Determinación de alternativas de aprovechamiento energético | 58 |
| CAPÍTULO III | 59 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 59 |
| 3.1. Análisis del crecimiento de RSU confinados en el relleno sanitario de Ambato | 59 |
| 3.2. Caracterización de los residuos sólidos del cantón Ambato | 60 |
| 3.3. Estimación de producción de biogás modelo LandGEM | 61 |
| 3.4. Estimación de producción de biogás modelo ecuatoriano | 63 |
| 3.5. Tasa de metano contenida en el landfill gas por medición <i>in-situ</i> | 65 |
| 3.6. Estimación de producción de biogás modelo ecuatoriano modificado | 66 |
| 3.7. Comparación de los resultados de los modelos LandGEM, ecuatoriano y ecuatoriano modificado | 68 |
| 3.8. Determinación del caudal de biogás recuperable | 68 |

| | | |
|-------------------------------------|--|----|
| 3.9. | Determinación del potencial de energía eléctrica anual | 71 |
| 3.10. | Determinación de caudales y potenciales energéticos aprovechables | 71 |
| 3.11. | Equipos para transformación energética..... | 72 |
| 3.11.1. | Motogenerador G3406 de CATERPILLAR | 72 |
| 3.11.2. | Cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS de AB ENERGY | 72 |
| 3.11.3. | Sistema radiante SR11 21 de INDELCASA | 72 |
| 3.11.4. | Datos técnicos adicionales de alternativas de equipos para aprovechamiento energético de landfill gas..... | 73 |
| 3.12. | Parámetros para selección de alternativas | 74 |
| 3.13. | Ponderación de parámetros para selección de alternativas de aprovechamiento energético | 75 |
| 3.14. | Evaluación técnica de la aplicación de la alternativa seleccionada de aprovechamiento energético | 76 |
| 3.15. | Diagrama de Sankey para aprovechamiento energético en cogeneración, año 2021 | 77 |
| 3.16. | Diagrama de Sankey para aprovechamiento energético en cogeneración, año 2029 | 77 |
| 3.17. | Análisis de producción de energía eléctrica | 78 |
| 3.18. | Análisis de producción de agua caliente para procesos industriales | 79 |
| 3.19. | Aplicación de la energía eléctrica en iluminación de las zonas viales y en las zonas de disposición final de RSU en el relleno sanitario de Ambato | 80 |
| CAPÍTULO IV | | 81 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | | 81 |
| 4.1. | Conclusiones | 81 |
| 4.2. | Recomendaciones | 82 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 84 |
| ANEXOS | | 89 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Disposición de geomembrana en relleno sanitario de Ambato | 9 |
| Figura 2. Sistema de espina de pescado en celda de desechos industriales, relleno sanitario de Ambato | 11 |
| Figura 3. Pozo y quemador en relleno sanitario de Ambato | 11 |
| Figura 4. Pozo de venteo elevado sobre varias celdas de basura compactada | 12 |
| Figura 6. Trabajo en relleno sanitario manual | 13 |
| Figura 7. Esquema del método de trinchera | 15 |
| Figura 8. Método de área para construir un relleno sanitario | 16 |
| Figura 9. Técnica de relleno en celda, relleno sanitario de Ambato | 16 |
| Figura 10. Fases de producción de biogás después del depósito de residuos sólidos en celdas | 19 |
| Figura 11. Interfaz del modelo LandGEM v3.02 | 21 |
| Figura 12. Interfaz del modelo de biogás de Ecuador | 27 |
| Figura 13. Marca según ATEX, marca de libre comercio | 30 |
| Figura 14. Equipo portátil para medición de gases ÓPTIMA7 Biogás | 30 |
| Figura 15. Vista superior de un pozo obstruido en el relleno sanitario de Ambato ... | 31 |
| Figura 16. a) Pozo de extracción vertical, b) Pozo de extracción horizontal | 32 |
| Figura 17. A la izquierda antorcha abierta y a la derecha antorcha cerrada | 34 |
| Figura 18. Método de absorción con agua (water scrubbing) | 38 |
| Figura 19. Sistema de separación por membranas | 39 |
| Figura 20. Extracción, tratamiento y recuperación energética del biogás residual de un relleno sanitario | 40 |
| Figura 21. Diagrama de un evaporador de lixiviados | 47 |
| Figura 22. Provincia de Tungurahua y cantón en donde está ubicado el relleno sanitario de Ambato | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 23. Medición de temperatura, altura y velocidad del viento en el relleno sanitario de Ambato | 50 |
| Figura 24. Superior entrada al Complejo Ambiental Chasinato, inferior área del relleno sanitario de Ambato | 50 |
| Figura 25. Pesaje de camión recolector | 51 |
| Figura 26. Colocación y compactación de los RSU | 51 |
| Figura 27. Diagrama de flujo para efectuar la medición de la tasa de metano <i>in-situ</i> | 54 |
| Figura 28. Topografía del relleno sanitario de Ambato | 55 |
| Figura 29. Técnica de sellado con funda plástica a pozo de venteo | 56 |
| Figura 30. Medición del biogás producido en el relleno sanitario de Ambato | 57 |
| Figura 31. Lectura de los compuestos del biogás con un alto contenido de metano | 57 |
| Figura 32. Tendencia de los RSU en el futuro | 60 |
| Figura 33. Caracterización de los residuos sólidos del cantón Ambato | 61 |
| Figura 34. Estimación de producción de biogás: LandGEM | 61 |
| Figura 35. Estimación de producción de biogás: Modelo ecuatoriano | 63 |
| Figura 36. Estimación de la recuperación de biogás del sistema existente | 63 |
| Figura 37. Estimación de producción de biogás: Modelo ecuatoriano modificado .. | 66 |
| Figura 38. Estimación de la recuperación de biogás del sistema existente | 66 |
| Figura 39. Generación de biogás respecto al modelo LandGEM, ecuatoriano y ecuatoriano modificado | 68 |
| Figura 40. Producción promedio de biogás y recuperación estimada | 69 |
| Figura 41. Diagrama de Sankey de energía útil y pérdidas del cogenerador ECOMAX5 | 77 |
| Figura 42. Diagrama de Sankey de energía útil y pérdidas del cogenerador ECOMAX5 | 77 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Clasificación de los residuos sólidos | 7 |
| Tabla 2. Tiempo para degradación o extinción de diferentes materiales | 8 |
| Tabla 3. Propiedades geomembrana HDPE | 10 |
| Tabla 4. Comparación de las características de un relleno sanitario manual y mecanizado | 14 |
| Tabla 5. Gases de efecto invernadero más relevantes que afectan al cambio climático | 17 |
| Tabla 6. Potencial de calentamiento global de los principales GEI | 18 |
| Tabla 7. Valores para la tasa de generación de metano (k) | 22 |
| Tabla 8. Velocidad de degradación de algunos materiales | 22 |
| Tabla 9. Valores para la tasa de generación de metano | 23 |
| Tabla 10. Valores para el potencial de generación de metano | 24 |
| Tabla 11. Tipos de gestión de los RSU en rellenos sanitario | 25 |
| Tabla 12. Valores para el factor de corrección de metano (MCF) | 26 |
| Tabla 13. Valores de k y L_0 del modelo ecuatoriano | 29 |
| Tabla 14. Eficiencia del sistema de recolección del modelo ecuatoriano | 29 |
| Tabla 15. Ventajas, desventajas de los pozos verticales y horizontales | 32 |
| Tabla 16. Tipos de tratamiento del landfill gas | 35 |
| Tabla 17. Nivel de tratamiento del landfill gas según su finalidad energética | 36 |
| Tabla 18. Ventajas y desventajas del método de adsorción | 37 |
| Tabla 19. Ventajas y desventajas de los métodos de absorción, membranas y biológicos | 39 |
| Tabla 20. Propiedades de combustión del metano y gas natural | 41 |
| Tabla 22. Tamaños de MCI para biogás con 50% de CH ₄ | 44 |
| Tabla 23. Ejemplos de costos típicos en la implementación de tecnologías de conversión energética | 45 |

| | |
|--|----|
| Tabla 24. Costos de la evaporación de lixiviados | 46 |
| Tabla 25. Diferentes aplicaciones del biogás | 48 |
| Tabla 26. Delimitación de los pozos a ser medidos | 56 |
| Tabla 27. Alternativas de aprovechamiento energético con landfill gas | 58 |
| Tabla 28. Cantidad de RSU ingresados anualmente al relleno sanitario de Ambato | 59 |
| Tabla 29. Composición de los residuos sólidos generados en el cantón Ambato | 60 |
| Tabla 30. Resultados de la estimación de producción de gas de vertedero modelo LandGEM | 62 |
| Tabla 31. Resultados de la estimación de producción de gas de vertedero modelo ecuatoriano | 64 |
| Tabla 32. Resultados de medición <i>in-situ</i> | 65 |
| Tabla 33. Resultados de la estimación de producción de gas de vertedero modelo ecuatoriano modificado | 67 |
| Tabla 34. Estimación de producción y recuperación promedio de gas de vertedero modelo LandGEM, ecuatoriano y ecuatoriano modificado | 70 |
| Tabla 35. Caudal y energía aprovechable de biogás para el año 2021 | 71 |
| Tabla 36. Resumen de las características del motogenerador G3406 | 72 |
| Tabla 37. Resumen de las características del cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS .. | 72 |
| Tabla 38. Resumen de las características del sistema radiante SR11 21 | 72 |
| Tabla 39. Equipos para transformación energética | 73 |
| Tabla 40. Parámetro de selección de equipos para transformación energética | 74 |
| Tabla 41. Selección de alternativas de aprovechamiento energético | 75 |
| Tabla 42. Análisis energético del cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS | 76 |
| Tabla 43. Análisis de producción de energía eléctrica ECOMAX5 BIOGÁS | 78 |
| Tabla 44. Análisis de producción de agua caliente para procesos industriales ECOMAX5 BIOGÁS | 79 |
| Tabla 45. Aplicación de la energía eléctrica producida en iluminación | 80 |

RESUMEN

Las organizaciones intergubernamentales en la lucha del cambio climático desarrollaron varias herramientas para la estimación de producción y emisión de biogás en rellenos sanitarios, con un enfoque a la evaluación del aprovechamiento energético que podría aportar el biogás que se produce en el relleno sanitario de Ambato, este presente proyecto técnico buscó determinar el flujo estimado de biogás, plantear alternativas de aprovechamiento energético y exponer los beneficios en la generación de energía útil que tendría el landfill gas para la ciudad de Ambato. La estimación del flujo de biogás que genera el relleno sanitario se determinó por medio de la aplicación del modelo LandGEM y el modelo ecuatoriano. Posteriormente se realizó una medición de campo con analizador de gases portátil ÓPTIMA7 BIOGÁS para determinar el contenido de los compuestos del biogás y poder calorífico del mismo. Al modelo ecuatoriano se le modificó con la tasa de metano medida *in-situ* y se promedió los resultados de los tres modelos, obteniendo un caudal estimado de biogás recuperado para el año 2021 de 365.40 metros cúbicos por hora y para el año 2029 de 522.33 metros cúbicos por hora. El potencial aprovechable del biogás recuperado para el año 2021 fue de 820 kW y 1180 kW para el año 2029. Se propusieron varias alternativas de aprovechamiento energético destacándose el cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS capaz de producir 499 kW de energía eléctrica útil y 610 kW de energía térmica total en agua recuperada para procesos industriales con un rendimiento total del 83.1 por ciento.

Palabras clave: Modelo LandGEM, Modelo ecuatoriano, Biogás, Relleno sanitario, Tasa de metano y Cogenerador.

ABSTRACT

Intergovernmental organizations in the fight against climate change developed several tools for estimating the production and emission of biogas in landfills. Focused on evaluating the energy using that the biogas produced in the Ambato's landfill could provide this technical project searched to determine the estimated flow of biogas proposing alternatives for energy use and exposing the benefits in the generation of useful energy that the landfill gas should have for the city of Ambato. The estimation of the biogas flow generated by the landfill was determined through the application of the LandGEM model and the Ecuadorian model. Subsequently, a field measurement was carried out with a portable gas analyzer ÓPTIMA7 BIOGAS to determine the content of the biogas compounds and the calorific value of that. The Ecuadorian model was modified with the methane rate measured in-situ and the results of the three models were averaged obtaining an estimated flow of biogas recovered for the year 2021 of 365.40 cubic meters per hour and for the year 2029 of 522.33 cubic meters per hour. The potential for recovery of biogas for the year 2021 was 820 kW and 1180 kW for the year 2029. Several alternatives for energy use were proposed highlighting the ECOMAX5 BIOGAS cogenerator capable of producing 499 kW of useful electrical energy and 610 kW of total thermal energy in recovered water for industrial processes with a total efficiency of 83.1 percent.

Keywords: LandGEM model, Ecuadorian model, Biogas, Landfill, Methane rate and Cogenerator.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

Los residuos sólidos urbanos (RSU) han tenido un incremento significativo desde ya algunas décadas, esto como efecto del incremento poblacional. El confinamiento de los RSU en rellenos sanitarios ha facilitado la gestión de estos, pero dicha acción genera efectos secundarios como la producción de biogás y lixiviados, varias han sido las soluciones para el aprovechamiento energético del biogás como: la transformación en energía eléctrica, térmica, gas natural y en combustibles para vehículos, produciendo así bonos de carbono, reducción de olores e impacto ambiental.

El aprovechamiento energético está ligado al potencial y producción del biogás, para esto se cuenta con varios modelos matemáticos que permiten estimar la producción de biogás y predecir la duración que tendrá dicha fuente de energía durante la vida útil del relleno sanitario. Para el soporte de esta investigación se citan varias investigaciones y estudios realizados a rellenos sanitarios nacionales, como de la región, la mayoría enfocados a evaluar y aprovechar el biogás residual de los mismos.

En la investigación realizada por Juan Flechas en el 2006 denominada “ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA EL APROVECHAMIENTO Y/O DESTRUCCIÓN TÉRMICA DEL BIOGÁS DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN BOGOTÁ D.C”, planteó varias alternativas para el aprovechamiento energético del biogás residual del relleno sanitario Doña Juana en Bogotá-Colombia como: generación de energía eléctrica, generación de gas vehicular y la destrucción térmica controlada del biogás [1].

Según Crisanto [2], en su tesis titulada: “ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA CENTRAL ELÉCTRICA APROVECHANDO EL BIOGÁS GENERADO POR EL RELLENO SANITARIO EL INGA”, del 2013, estimó que la

producción de biogás para el año 2021 en el relleno sanitario el Inga del Distrito Metropolitano de Quito, será de 5472 Nm³/h, este año corresponde al de mayor producción de biogás según las proyecciones de Crisanto, resultado que le permitió hacer una selección apropiada del generador eléctrico para dicha central eléctrica.

El Ingeniero Edwin Albán en su tesis “EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN SALCEDO DURANTE EL AÑO 2015, PROPUESTA PARA UN APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE”, del 2016, realizó cromatografías al biogás del relleno sanitario, los cuales determinaron la tasa de metano y poder calorífico del mismo, además propuso como alternativa de aprovechamiento energético, un evaporador de lixiviados que trabaja con biogás como fuente principal de combustible con capacidad de 150 l/h [3].

En el artículo realizado por: Glen Madrigal Pérez, Juan José Quispe Saavedra, Yoel Vargas Huamán, en el año 2018, denominado: “CÁLCULO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS PARA EL RELLENO SANITARIO DE LA CIUDAD DE JULIACA, UTILIZANDO EL MODELO LANDGEM VERSIÓN 3.02 DE LA USEPA Y ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA”, se empleó la herramienta de estimación de generación de biogás LandGEM proporcionado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, obteniendo una proyección de generación más alta de biogás para el año 2044 con 58.285.801,66 m³/año y un promedio de biogás de 29.925.493,1 m³/año en los años de 2018 a 2058 [4].

En la tesis ejecutada por Jonathan Olmedo, Jonathan Curillo, en el 2019, bajo el tema “VALORACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL BIOGÁS QUE SE GENERA EN EL RELLENO SANITARIO CEIBALES DE LA CIUDAD DE MACHALA”, se estimó la producción de biogás con tres modelos matemáticos, LandGEM, Modelo de Ecuador y el IPCC, concluyendo que el modelo IPCC presentó un comportamiento atípico con una menor estimación de biogás [5].

En el artículo desarrollado por Pablo García Escamilla, en el año 2019, titulado: “EFICIENCIA Y CONFIABILIDAD DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS”, se hace un importante análisis comparativo entre modelos teóricos y la medición de emisiones de metano *in situ*, García concluyó que la medición *in situ* fue igual a 3355,99 m³/h, mientras con el modelo EPA fue de 6270,57 m³/h y con el modelo mexicano fue de 8379,52 m³/h, lo cual evidenció la confiabilidad de cada método de estimación de biogás [6].

Bertha Ibarra López, Mariana Narváez Castro y Andrés de la Rosa, en su artículo desarrollado en el año 2020 denominado: “ANÁLISIS DE LA DISPOSICIÓN Y GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO DE AMBATO, ECUADOR”, caracterizaron y dividieron el relleno sanitario en zonas de estudio, al igual que sus chimeneas con el fin de evaluar el biogás mediante cromatografías de muestras de biogás recolectadas, concluyeron que la zona C posee biogás con el mayor porcentaje de metano que las otras zonas [7].

THE LFG ENERGY PROJECT DEVELOPMENT HANDBOOK, publicado en el año 2020 por la U.S. EPA y en coordinación con Landfill Methane Outreach Program, proporciona una descripción completa acerca de la energía que podría producir el biogás de vertedero, además presenta consideraciones tecnológicas, regulatorias y económicas que están involucradas en la viabilidad de pequeños y grandes proyectos de energía alternativa a partir de biogás residual de rellenos sanitarios [8].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General:

- Evaluar el potencial de aprovechamiento energético del biogás residual generado por el relleno sanitario Complejo Ambiental Chasinato de la EPM-GIDSA.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Estimar la producción promedio del Biogás.

Se utilizará el modelo de emisión de gases de rellenos sanitario LandGEM y el modelo de producción de biogás de Ecuador, herramientas desarrolladas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) y la Iniciativa Global de Metano (GMI) para la estimación de producción de biogás en rellenos sanitarios.

- Cuantificar la tasa de metano contenido en el biogás generado por el relleno sanitario.

Se realizará mediciones *in situ* con analizador portátil de gases modelo ÓPTIMA7 Biogás en varios de los pozos posicionadas en zonas segmentadas del relleno sanitario de Ambato, posteriormente se modificará al modelo ecuatoriano con los resultados *in situ* y se contrastarán los resultados con el modelo LandGEM y ecuatoriano no modificado.

- Determinar el potencial energético aprovechable del biogás.

Se hará uso de la ecuación de potencia nominal disponible, asumiendo una generación constante de energía, esta ecuación involucra principalmente al caudal del biogás recuperable por hora, la fracción de metano contenido y el poder calorífico del metano.

- Plantear propuestas técnicas para el aprovechamiento energético del biogás.

En base a la producción de biogás y a la fracción de metano contenida en el biogás del relleno sanitario de Ambato, se planteará propuestas técnicas de aprovechamiento energético, haciendo una lista de alternativas de utilización del biogás, alternativas reales que funcionarán en el mismo sitio de estudio.

1.3. Fundamentación legal

De acuerdo, a la Constitución de la República del Ecuador, Registro Oficial 449 de 20 de octubre del 2008. En el Título II de los Derechos, Capítulo Segundo, Derechos del buen vivir, contempla:

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*.

Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua [9].

La Constitución de la República del Ecuador, Registro Oficial 449 de 20 de octubre del 2008. En el Título VII del Régimen del Buen Vivir, Capítulo Segundo, Naturaleza y Ambiente, Sección séptima de la Biosfera, ecología urbana y energías alternativas indica los siguientes artículos:

Art. 413.- El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.

Art. 414.- El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas

para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo [9].

De igual manera, en el objetivo 3 del Plan Nacional de Desarrollo “Toda una Vida”, se promueve la Revolución Ecológica mediante la aplicación de conocimientos tradicionales y científicos, para iniciar una nueva fuente de bioeconomía proveniente del aprovechamiento sostenible de los recursos biológicos renovables y de la transformación de material orgánico en productos alimenticios y bienes industriales, reduciendo así, los productos fabricados con energías fósiles y fortaleciendo el cambio de la matriz productiva y energética [10].

Según el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA) en el capítulo VI correspondiente a la Gestión Integral de Residuos Sólidos no Peligrosos, Desechos Peligrosos y/o Especiales expone el siguiente artículo:

Art. 57.- Responsabilidades de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. Garantizarán el manejo integral de residuos y/o desechos sólidos generados en el área de su competencia, ya sea por administración o mediante contratos con empresas públicas o privadas; promoviendo la minimización en la generación de residuos y/o desechos sólidos, la separación en la fuente, procedimientos adecuados de barrido y recolección, transporte, almacenamiento temporal de ser el caso, acopio y/o transferencia; fomentar su aprovechamiento, dar adecuado tratamiento y correcta disposición final de los desechos que no pueden ingresar nuevamente a un ciclo de vida productivo [11].

Art. 73.- Del aprovechamiento. - En el marco de la gestión integral de residuos sólidos no peligrosos, es obligatorio para las empresas privadas y municipales el impulsar y establecer programas de aprovechamiento mediante procesos en los cuales los residuos recuperados, dadas sus características, son reincorporados en el ciclo económico y productivo en forma eficiente, por medio del reciclaje, reutilización, compostaje, incineración con fines de generación de energía, o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales y/o económicos [11].

1.4. Fundamentación Teórica

1.4.1. Residuos Sólidos Urbanos

Los RSU son aquellos que se generan por cualquier actividad dentro de una población, esto evidencia que las actividades que se lleva a cabo una determinada comunidad producen desechos sólidos, se originan en industrias, cárceles, instituciones, comercios, domicilios y hasta en la propia actividad agroindustrial y turística [16], [23], pueden clasificarse según la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los residuos sólidos [11], [23]

| Clase de residuos | Tipo de residuos |
|---------------------------|--|
| Orgánicos o domiciliarios | Residuos de madera, jardines, cuero, papel, cartón, textiles, residuos de comida y alimentos. |
| Inorgánicos | Metales, plásticos, vidrio, envases de enlatados, material de construcción y de acabados. |
| Peligrosos | Medicinas vencidas, envases de productos hospitalarios, químicos, venenos, pilas y plaguicidas. |
| Residuos urbanos | Residuos de origen de empresas, oficinas y empresas. |
| Residuos industriales | Residuos de la transformación de la materia prima, de construcción, material radioactivo. |
| Residuos agrícolas | Residuos de cosechas, insumos agrícolas y plásticos de invernaderos |
| Residuos hospitalarios | Insumos de protección biológica, residuos de las salas de operación, reactivos e instrumentos de operación |

La generación y recolección de los residuos sólidos propone un serio problema en el momento de la disposición final de los mismos, lamentablemente la cultura del hombre no ha tomado conciencia y sigue arrojando residuos de basura a diferentes sitios como calles, parques, playas entre otros, el tiempo de degradación o extensión de un residuo sólido sin manejo o tratamiento de disposición final se representan en la tabla 2.

Tabla 2. Tiempo para degradación o extinción de diferentes materiales [22]

| Materia | Tiempo o periodo |
|--------------------------------|-------------------------|
| Bolsa de plástico | 12 a 20 años |
| Botella de vidrio | Cerca de 4000 años |
| Medias de lana | 1 a 5 años |
| Telas de nailon | Entre 30 a 40 años |
| Pañuelos de algodón | 1 a 5 meses |
| Cáscara de banano | 2 a 10 días |
| Cáscara de naranja | 6 meses |
| Zapatos de cuero | 25 a 40 años |
| Vasos de aislante térmico (PE) | 1 a 100 años |
| Envases Tetra PACK | 5 años |
| Papel | 2 a 5 meses |
| Filtros de cigarrillos | 1 a 2 años |
| Hierro | 10 000 años |

1.4.2. Los Rellenos Sanitarios

La definición de relleno sanitario por parte del TULSMA [11], se refiere a que, es una técnica de ingeniería con el fin de confinar desechos sólidos, que consiste en almacenarlos en celdas dispuestas con geomembrana, principalmente para proteger la contaminación al agua, suelo, atmósfera y precautelar la salud de la población cercana.

La compactación de los residuos se realiza a su mínimo volumen, posteriormente se cubre con una capa de tierra, quedando enterrados los residuos sólidos para su descomposición, también se controla los gases y lixiviados producidos por la descomposición anaeróbica de los desechos orgánicos e inorgánicos. Un relleno sanitario es considerado por algunos expertos como un reactor bioquímico, donde las principales entradas son los desechos sólidos y agua, mientras que los productos o las salidas son el biogás y lixiviados [12].

1.4.3. Requisitos técnicos con los que debe contar un relleno sanitario

Los rellenos sanitarios cumplen una función ambientalmente segura al momento de almacenar residuos sólidos urbanos, se presentan algunos requisitos con los que debe operar un relleno sanitario.

- Geomembrana o capa base de impermeabilización

La protección que cumple la impermeabilización con geomembrana en la parte inferior de la trinchera o celda confinada de RSU, es la de no permitir que el lixiviado emigre al exterior, haciendo que estos líquidos sean recogidos por un sistema de conducción y extracción soportados por la geomembrana, además que evita la contaminación en el nivel freático [5]. La geomembrana resulta tener una eficiencia del 90% en el ámbito de seguridad contra filtraciones de biogás, comparada con la cobertura diaria de RSU que posee un 75% de eficiencia [17].



Figura 1. Disposición de geomembrana en relleno sanitario de Ambato

Fuente: Autor

La flexibilidad, resistencia a la tensión y la resistencia al ataque químico por parte del lixiviado hacen que las geomembranas de HDPE sean las más empleadas en rellenos sanitarios, pero en casos donde las condiciones de tensión sean altamente solicitadas se prevé de geomembranas de PVC, VLDPE, LDPE [17]. La tabla 3 expone las propiedades de las geomembranas de HDPE, así como las normas para los ensayos de tracción de plásticos reforzados y no reforzados.

Tabla 3. Propiedades geomembrana HDPE [18]

| Descripción | Norma | Unidad |
|---|-------------------|--------------------|
| Resistencia a la tensión y a la rotura | ASTM D638 Tipo IV | kN/m |
| Elongación al límite elástico y a la rotura | ASTM D638 Tipo IV | % |
| Resistencia al rasgado | ASTM D-1004 | N |
| Resistencia a la perforación | ASTM D-4833 | N |
| Densidad | ASTM-1505 | gr/cm ³ |

- Extracción de lixiviados

El líquido percolado como también se lo conoce al lixiviado, es producido por la descomposición de los residuos orgánicos, esto acompañado de las precipitaciones sobre los RSU a cielo abierto, así como las infiltraciones de agua del exterior al material del subsuelo del relleno sanitario también contribuyen a la producción de lixiviados [17]. Los lixiviados son considerados peligrosos al contacto humano y animal, estos pueden contener componentes altamente tóxicos como: fósforo, nitrógeno, arsénico, cadmio, plomo entre otros [7], [17].

Los sistemas de extracción o drenaje de lixiviados prácticamente constan de tuberías perforadas, dispuestas en triángulos formando un sistema de espina de pescado, esta disposición es recomendable para mantener una conducción rápida y eficaz hacia la planta de tratamiento de lixiviados. La tubería perforada permite que todos los líquidos ingresen al interior y que fluyan en dirección de acuerdo con el sistema construido, pero es fundamental que cuenten con capas de saquillo o geotextil extendido que actúan como filtros en el sistema, la tubería suele ser de PVC, HDPE con diámetros que van de entre los 100 a 250 mm [13].



Figura 2. Sistema de espina de pescado en celda de desechos industriales, relleno sanitario de Ambato

Fuente: Autor

- Pozo de control

El monitoreo de la infiltración de lixiviados a aguas subterráneas se la realiza por medio de un pozo de control, el pozo se ubica estratégicamente según la geografía del relleno sanitario, donde el nivel freático se encuentre menor o igual a 3m del fondo del relleno sanitario o próximo a algún contacto con lixiviados [5], [13].

- Pozos de venteo

La liberación localizada de gases se la realiza por medio de pozos, los pozos están dispuestas en varios puntos del relleno sanitario y promueven la evacuación del biogás a la atmósfera, es primordial que el biogás sea combustionado disminuyendo la tasa de GEI emitidos al medio ambiente y los riesgos de salud ocupacional, los gases son incinerados por medio de un quemador colocado al extremo final del pozo de venteo [5], [13], [20].



Figura 3. Pozo y quemador en relleno sanitario de Ambato

Fuente: Autor

Los pozos se prefieren que sean perforados, los materiales de fabricación suelen ser HDPE, hormigón y PVC. La separación de las chimeneas estará entre 20 a 25m en rellenos con compactación mecanizada. El material de relleno del alrededor de la chimenea es de grava o piedra tipo bola con un diámetro menor a 16 cm [13]. La altura del pozo incrementará de acuerdo, a la elevación del nivel del relleno sanitario celda por celda tal como se muestra en la figura 4.

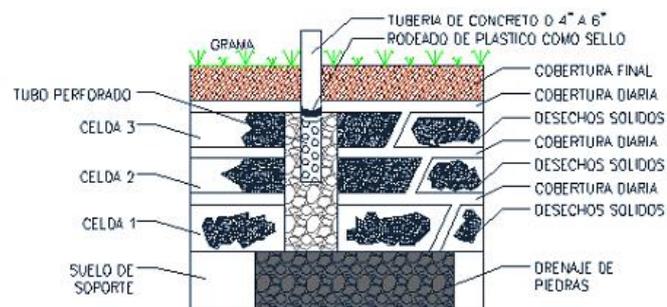


Figura 4. Pozo de venteo elevado sobre varias celdas de basura compactada

Fuente: [2]

La figura 5 representa un esquema general de un relleno sanitario con todos sus requisitos y funcionalidades.

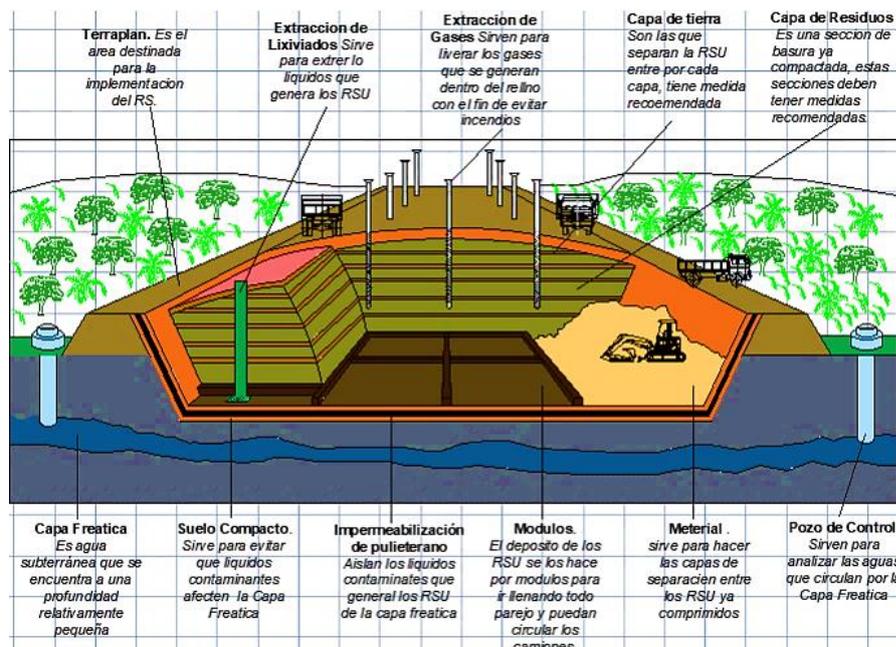


Figura 5. Esquema general de un relleno sanitario

Fuente: [5]

1.4.4. Rellenos Manuales y Rellenos con Compactación Mecanizada

Los rellenos clasificados como manuales y con compactación mecanizada están basados en el número de habitantes de la zona, en un relleno manual los obreros del relleno sanitario realizan un conjunto de tareas a mano, donde dichos obreros están encargados de la descarga, compactación y cobertura de los residuos, por otro lado, también se encargan de la construcción del drenaje de lixiviados, chimeneas y del mantenimiento en general del relleno.

Los rellenos sanitarios manuales tienen sus desventajas, la estabilidad del suelo rellenado está limitado por la compactación manual, es menos eficiente y ocasiona que no se pueda alcanzar alturas elevadas en el relleno, esto causa que se requiera una mayor área de depósito [13].

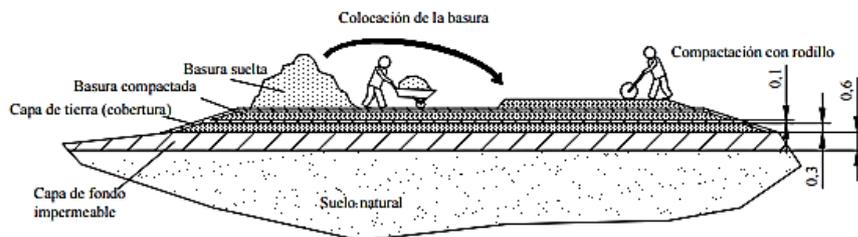


Figura 6. Trabajo en relleno sanitario manual

Fuente: [13]

En ciudades medianas y grandes, la mejor tecnología utilizada en rellenos sanitarios es la de compactación mecanizada, la alta cantidad de residuos generados a diario requiere el uso de maquinaria pesada, maquinaria destinada a la colocación, compactación y cubierta de los RSU, de igual manera, la municipalidad brindará recursos para el servicio de limpieza, recolección y transporte de los residuos al relleno sanitario [14]. En la tabla 4 se muestran algunos casos y recomendaciones para la construcción de un relleno sanitario manual o con compactación mecanizada.

Tabla 4. Comparación de las características de un relleno sanitario manual y mecanizado [14]

| Característica | Relleno Manual | Relleno con Compactación Mecánica |
|--|--|--|
| Poblaciones < 5000 habitantes | Si | No |
| Poblaciones < 50 000 habitantes | Se recomienda su uso, con herramientas y maquinaria adaptada | No |
| 50 000 < Poblaciones < 200 000 | No | Si |
| Poblaciones > 200 000 habitantes | No | Si |
| Utilización de herramientas menores (pala, carretilla, pico, trinche, rastrillo) | Si | Si |
| Utilización de maquinaria adaptada (tractor agrícola, rodillos, saltarín) | Si | Si |
| Utilización de maquinaria pesada (tractores, orugas, retro excavadoras) | No | Si |
| Personal calificado | No | Si |
| Cerco perimetral | Si | Si |
| Caseta de control | No | Si |
| Báscula de pesaje | No | Si |
| Sistema de tratamiento de lixiviado y gases | Si | Si |
| Metodología para el frente de trabajo | Excavación de celdas en terrenos planos | Colina artificial sobre terreno plano |
| | Construcción de celdas terrazadas sobre un talud | Relleno de un hueco o fosa |

1.4.5. Métodos de Construcción de Rellenos Sanitarios

1.4.5.1. Método de Trinchera

Método recomendado para terrenos planos y en suelos con propiedades cohesivas, sin riesgo de deslizamientos, esta técnica consiste en excavar zanjas con retro excavadoras de 2 a 3m de profundidad o más, esto dependerá del nivel freático o del acuífero del lugar, una vez realizada la trinchera se procede a depositar, compactar los residuos sólidos y finalmente cubrirlos con el mismo material que se retiró en la excavación de las trincheras [14]. Las trincheras se deben construir con canales capaces de desviar y drenar el agua proveniente de lluvias esporádicas, peor aún en temporadas de lluvias, esto con el fin de evitar inundaciones y bombeos del agua acumulada en las zanjas [2].

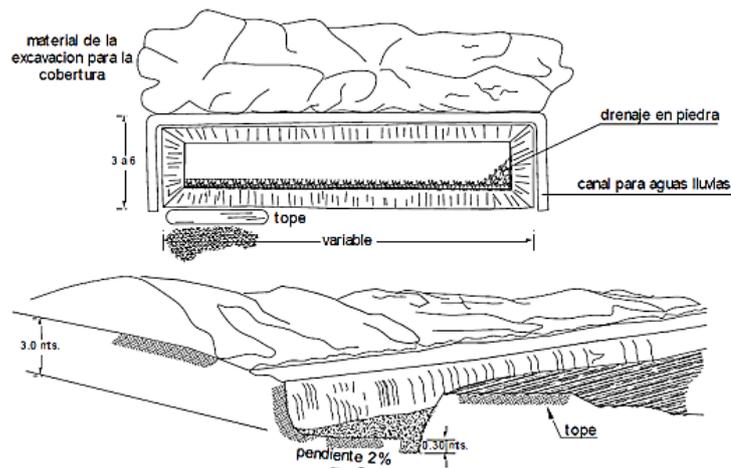


Figura 7. Esquema del método de trinchera

Fuente: [2]

1.4.5.2. Método de área

El método de área reemplaza al método de trinchera, ya que en el terreno no es posible construir zanjas, los RSU se colocan en terrazas sobre el suelo original dando la posibilidad de elevar el nivel del relleno en algunos metros. Existen casos en que el material de cobertura es importado de un lugar cercano o es obtenido de las laderas, éste último para rellenar depresiones o fosas alteradas por minería [16].

El relleno gana altura por las diferentes celdas de basura compactada, la operación se inicia desde el fondo hacia arriba, se vacía los residuos en la base del talud, se esparce y se compacta contra el talud, finalmente se cubre con tierra de 10 a 20 cm de espesor, es fundamental conservar una pendiente de 30 grados, evitando deslizamientos [2].

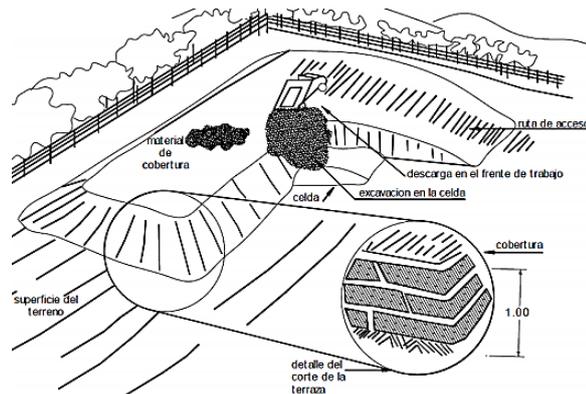


Figura 8. Método de área para construir un relleno sanitario

Fuente: [2]



Figura 9. Técnica de relleno en celda, relleno sanitario de Ambato

Fuente: Autor

1.4.6. Landfill gas o biogás generado en rellenos sanitarios

El biogás es un subproducto generado por la biodegradación de residuos orgánicos bajo condiciones anaeróbicas, la digestión sin oxígeno de los residuos en el subsuelo de un relleno sanitario es impulsada por procesos físicos y químicos, produciendo biogás, el cual está compuesto principalmente de 50 a 55% de metano (CH_4), 45 a 50% de dióxido de carbono (CO_2) y el 1% restante de compuestos químicos como impurezas que deberán ser removidas según la utilización final del biogás [8], [12].

El metano es un eficaz GEI en contener el calor en la atmósfera en un tiempo de 100 años, su poder de retención es de 28 a 36 veces más que el usualmente conocido dióxido de carbono [12], por lo cual, una de las vías para disminuir la emisión de GEI producidos en un relleno sanitario, es la destrucción o incineración del gas metano en antorchas abiertas o cerradas, convirtiéndolo en CO₂ y reduciendo los olores desulfurados imperceptibles del biogás [3].

Tabla 5. Gases de efecto invernadero más relevantes que afectan al cambio climático [24]

| Gas | Nomenclatura química | Fuente de emisión | Años de permanencia en la atmósfera |
|-------------------------------|-----------------------------|--|--|
| Dióxido de carbono | CO ₂ | Transporte, procesos industriales, calefacción e incineración | 100 años |
| Metano | CH ₄ | Biodegradación de residuos orgánicos, agricultura y cría de ganado | 10 años |
| Óxido nitroso | N ₂ O | Combustión de desechos sólidos y combustibles fósiles | 170 años |
| Hidrofluorocarbonos | HFC _s | Fabricación de aerosoles | 60 – 100 años |
| Perfluorocarbonos | PFC _s | Fabricación de refrigerantes y espumas | 100 años |
| Hexafluoruro sulfúrico | SF ₆ | Equipos eléctricos y fabricación de semiconductores | 80 años |

El dióxido de carbono es utilizado como referencia a fin de comparar el potencial de calentamiento global que tienen los GEI vistos en la tabla 5, a cada uno de estos gases se denomina un factor con el que se indica la cantidad de CO₂ que generaría el mismo efecto invernadero en un intervalo de 100 años. Si hablamos del metano generado por distintas fuentes en el planeta Tierra, éste tiene un potencial de calentamiento de 21 veces más potente en la retención de calor en la atmósfera que el CO₂ [25].

Tabla 6. Potencial de calentamiento global de los principales GEI [25]

| Gas | Potencial de calentamiento global (PCG) |
|------------------|---|
| CO ₂ | 1 |
| CH ₄ | 21 |
| N ₂ O | 310 |
| HFC _s | 11 700 |
| PFC _s | 9 200 |
| SF ₆ | 22 200 |

1.4.7. Producción de landfill gas

La biodegradación de los residuos sólidos en un relleno sanitario lleva un tiempo determinado, pero existen factores y condiciones que incrementan la velocidad y calidad de producción de biogás, estos son: nutrientes, contenido de humedad, temperatura, pH, mezcla, cobertura y compactación de los RSU son las variantes más significativas [2], [3], [16]. La biodegradación de los RSU está determinada por fases de descomposición en procesos aeróbicos y anaeróbicos, a continuación, se refleja el patrón de las fases por las que atraviesa los RSU en su biodegradación, sustentado por el Landfill Gas Energy Project Development Handbook [8].

- Fase I

Se evidencia una gran cantidad de bacterias en un ambiente aeróbico, estas bacterias consumen oxígeno mientras van rompiendo las grandes cadenas moleculares de carbohidratos complejos, lípidos y proteínas que se hayan en los residuos orgánicos. El principal subproducto es el CO₂ y la fase continúa hasta que el oxígeno se agota.

- Fase II

Desciende las condiciones aeróbicas y el oxígeno, los compuestos transformados por las bacterias aeróbicas son convertidos en ácidos y alcoholes como el etanol y metanol, el nitrógeno es consumido paulatinamente mientras que los ácidos se mezclan con la humedad de la celda de residuos confinados, las condiciones anaeróbicas han tomado el entorno, generando hidrogeno y CO₂.

- Fase III

Las bacterias metanogénicas se activan consumiendo dióxido de carbono y acetato, este último es un ácido orgánico constituido por los subproductos formados en la fase II, el entorno se vuelve algo más neutral dando paso a la formación de metano.

- Fase IV

En este punto la composición y producción de biogás sigue siendo en condiciones anaeróbicas, con la variante de que las tasas de biogás generadas en esta fase permanecen estables, con un volumen aproximadamente de entre 50 a 55% de metano, del 45 a 50% de dióxido de carbono y del 2 a 5% de otros gases, por lo general la fase IV durará 20 años o menos, produciendo biogás constantemente.

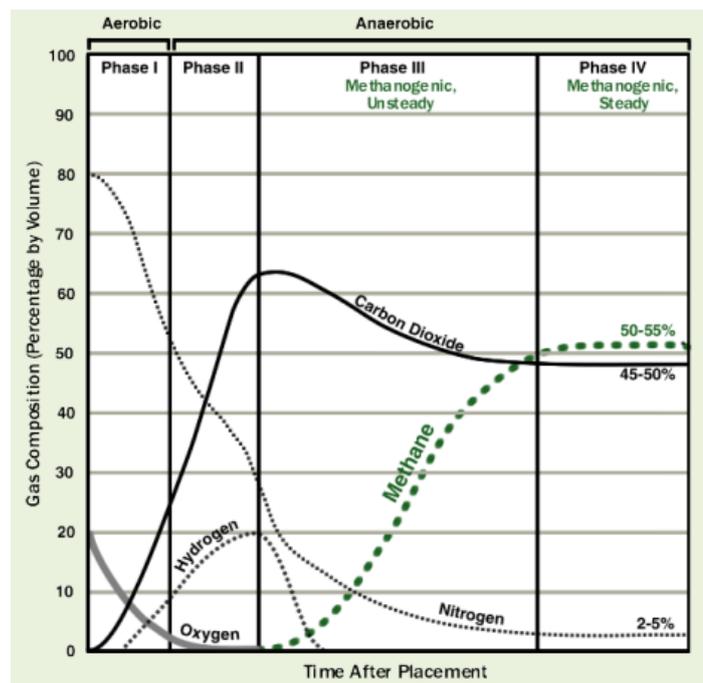


Figura 10. Fases de producción de biogás después del depósito de residuos sólidos en celdas

Fuente: [8]

Aunque no se menciona en el Landfill Gas Energy Project Development Handbook, se habla de una fase V, en la cual la producción de metano y dióxido de carbono disminuyen, ocasionado por sustratos con un grado de biodegradación baja y a la ausencia de nutrientes en los residuos orgánicos, la fase V es de carácter aeróbico y durará hasta cuando el relleno no pueda generar más algún tipo de subproducto, esto se dará después de varios años del cierre total del relleno sanitario [3], [12], [16], [17].

1.4.8. Modelos matemáticos para la estimación de producción de landfill gas

La producción de biogás en un relleno sanitario es inminente, pero con fines medioambientales y de aprovechamiento energético es primordial saber la mayor posible aproximación de cantidad de gas que se genera en un relleno sanitario. Con una visión de contribuir a la protección del planeta Tierra contra el cambio climático, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) ha contribuido con herramientas y modelos matemáticos para la estimación de producción de biogás en sitios de disposición final de RSU [2], [12].

1.4.8.1. Modelo LandGEM

El modelo LandGEM de emisión de gases de relleno sanitario fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), este modelo es una herramienta programada en el software de cálculo Microsoft Excel para la estimación de producción de biogás, metano, dióxido de carbono, entre otros. Conjuntamente LandGEM asume que la producción máxima de biogás llegará al producirse un equilibrio anaeróbico dentro del confinamiento de los RSU.

Las herramientas y modelos por parte de la USEPA son de libre acceso y el modelo LandGEM versión 3.02 se lo puede encontrar en la página oficial de la USEPA o en [27] se puede hacer una descarga directamente al ordenador. El modelo LandGEM está basada en la ecuación (1) de primer orden y los datos que necesita para el cálculo, son el año de apertura, clausura y la cantidad de RSU anuales, así como dos parámetros

fundamentales k , L_0 que pueden seleccionarse o calcularse dependiendo de las características del relleno y ubicación geográfica [4], [5], [12].

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10}\right) \cdot e^{-kt_{ij}} \quad (Ec. 1)$$

En donde:

Q_{CH_4} : Generación anual de metano en el año n calculado, [m^3 /año].

i : Incremento de tiempo de 1 año.

j : Incremento de tiempo de 0.1 año.

n : Diferencia entre año del cálculo y año que empieza a recibir residuos.

k : Tasa de generación de metano, [1/año].

L_0 : Potencial de generación de metano, [m^3 de CH_4 / ton de RSU].

M_i : Cantidad de residuos dispuestos en el año i [ton].

t_{ij} : Año de la “ j ” sección de los residuos acumulados en el año “ i ”.

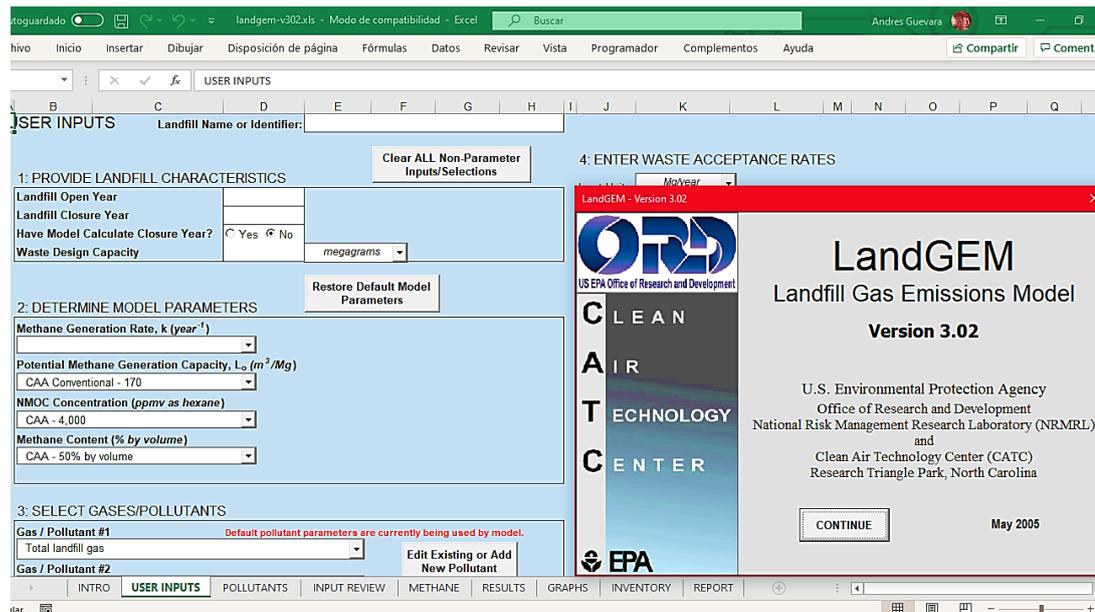


Figura 11. Interfaz del modelo LandGEM v3.02

Fuente: Autor

Los datos y parámetros fundamentales que se debe ingresar para el correcto funcionamiento y cálculo por parte de LandGEM se describen a continuación:

- k : Tasa de generación de metano, [1/año].

k establece la tasa de generación de metano para la masa de RSU confinados en un relleno sanitario, mientras mayor sea k mayor será la rapidez con la que los RSU se degradan para generar CH₄. LandGEM utiliza la tabla 7 para seleccionar los valores de k , estas constantes están dispuestas por los protocolos de la U.S.EPA y CAA (Clean Air Act) para los rellenos sanitarios de los Estados Unidos en cumplimiento con las leyes medioambientales y de aire limpio [5], [28].

Tabla 7. Valores para la tasa de generación de metano (k) [28]

| Tipo predeterminado | Tipo de relleno sanitario | Valores de k [1/año] |
|---------------------|---------------------------|------------------------|
| CAA | Convencional | 0.05 (por defecto) |
| CAA | Zona Árida | 0.02 |
| U.S. EPA | Convencional | 0.04 |
| U.S. EPA | Zona Árida | 0.02 |
| U.S. EPA | Húmedo (biorreactor) | 0.7 |

El valor de k para rellenos sanitarios de Ecuador deberá ser calculado, ya que los RSU no están regidos a las leyes de los Estados Unidos, k se calcula en función de la precipitación media anual, pH, temperatura, tipo de degradación y composición de los RSU, la degradación de los residuos se la clasifica según la tabla 8.

Tabla 8. Velocidad de degradación de algunos materiales [5]

| Tipo de degradación | Materiales |
|---------------------|---|
| Muy lenta | Madera, elastómeros, restos de piel y hueso |
| Medianamente lenta | Papel, cartón y textiles |

| | |
|---------------------|---|
| Medianamente rápida | Papel higiénico, residuos vegetales, poda de jardines o parques municipales |
| Rápida | Residuos alimenticios, orgánicos y un 20% de pañales |

Con la ecuación (2) y la tabla 9 se puede calcular el valor de la tasa de generación de metano k según la ubicación geográfica, precipitación media anual y tipo de degradación de los RSU del relleno sanitario de estudio [5].

$$k = \frac{\sum \text{Valores del tipo de degradación}}{N} \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde:

k : Tasa de generación de metano, [1/año].

N : Número de valores que se tomen

Por ejemplo, si se requiere calcular la tasa de generación de metano de un relleno sanitario que se encuentra en un clima moderadamente húmedo con precipitaciones de 1200 mm/año y el tipo de degradación de los RSU es moderadamente rápida y lenta, el valor de k será:

$$k = \frac{0.12 + 0.048}{2}; \quad k = 0.084 \text{ 1/año}$$

Tabla 9. Valores para la tasa de generación de metano [5]

| Tipo de clima | Precipitación (mm/año) | 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 |

➤ L_0 : Potencial de generación de metano, [m^3 de CH_4 / ton de RSU].

L_0 depende del tipo y composición de los RSU, mientras mayor sea el contenido de celulosa mayor será el valor de L_0 , como se describió en el caso anterior de k , L_0 también posee sus propios valores predeterminados por protocolos de la U.S. EPA, CAA y se observan en la tabla 10.

Tabla 10. Valores para el potencial de generación de metano [28]

| Tipo de emisión | Tipo de relleno sanitario | L_0 [m^3 de CH_4 / ton de RSU] |
|-----------------|---------------------------|---|
| CAA | Convencional | 170 (por defecto) |
| CAA | Zona Árida | 170 |
| U.S. EPA | Convencional | 100 |
| U.S. EPA | Zona Árida | 100 |
| U.S. EPA | Húmedo (biorreactor) | 96 |

Es necesario calcular el valor de L_0 en función de las características del relleno sanitario de estudio, según El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) se puede hacer uso de la ecuación (3), de igual manera se procederá con la definición y determinación de los valores que conforman dicha ecuación [5], [12].

$$L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{1}{\rho_{CH_4}} \cdot \frac{16}{12} \cdot 1000 \quad (Ec. 3)$$

En donde:

L_0 : Potencial de generación de metano, [m^3 de CH_4 / ton de RSU].

MCF : Factor de corrección de metano.

DOC : Carbono orgánico degradable.

DOC_F : Fracción de carbono orgánico biodegradable.

F : Fracción de metano contenido en biogás, típicamente se asume 0,5.

ρ_{CH_4} : Densidad del metano, 0.66 [kg/m³].

1000: Constante para obtener kg de CH₄.

$\frac{16}{12}$: Constante estequiométrica (cociente de pesos moleculares entre el CH₄/C).

- MCF : el factor de corrección de metano está ligado a las características del relleno y al manejo que se les da a los RSU, en la tabla 11 se define los tipos de gestión que posee un relleno sanitario y en la tabla 12 se muestran los valores aproximados que acoge el MCF [5].

Tabla 11. Tipos de gestión de los RSU en rellenos sanitario [5]

| Tipo de gestión de RSU | Definición |
|--------------------------------------|---|
| Gestión anaeróbica | Sitio que cumple con los requisitos técnicos y hace un control de la disposición de los RSU. |
| Gestión semi-aeróbica | Debe cumplir con material de cobertura permeable; sistema de drenaje de lixiviados, estanques de regulación y ventilación de gases. |
| No gestionado profundo (>5m) | Aquellos que no cumplen con los requisitos técnicos de los rellenos sanitarios, llenado de RSU en un área con aguas fluviales cercanas. |
| No gestionado poco profundo (<5m) | Aquellos que no cumplen con los requisitos técnicos de los rellenos sanitarios. |
| Rellenos sanitarios no categorizados | Si a los rellenos sanitarios no se los puede categorizar dentro de las gestiones anteriores, pueden acogerse a este tipo de gestión. |

Tabla 12. Valores para el factor de corrección de metano (MCF) [5]

| Tipo de relleno sanitario | Valores para el factor (MCF) |
|---|------------------------------|
| Gestionado anaeróbico | 1 |
| Gestión semi-aeróbica | 0.5 |
| No gestionado profundo (>5m de residuos) | 0.8 |
| No gestionado poco profundo (<5m de residuos) | 0.4 |
| Rellenos sanitarios no categorizados | 0.6 |

- DOC : el factor de carbono orgánico degradable comprende la composición de RSU orgánicos y se lo calcula en base a la ecuación (4).

$$DOC = 0.4 \cdot A + 0.17 \cdot B + 0.15 \cdot C + 0.3 \cdot D \quad (Ec.4)$$

En donde:

A : Porcentaje de residuos que conforman papel, cartón y textiles.

B : Porcentaje de residuos de jardinería, orgánicos (excluidos los alimentos).

C : Porcentaje de residuos de alimentos.

D : Porcentaje de residuos de madera y paja.

- DOC_F : la fracción de carbono orgánico biodegradable es catalogado como la porción de carbono transformada en biogás, la ecuación (5) proporciona el cálculo de DOC_F .

$$DOC_F = 0.014 \cdot T + 0.28 \quad (Ec.5)$$

En donde:

T : Temperatura del relleno sanitario, [°C].

➤ CH_4 : Contenido de metano (%)

La tasa de metano por defecto en LandGEM es del 50% según el CAA, sin embargo, si se realiza alguna medición *in situ* del contenido de CH_4 en el relleno sanitario de estudio, éste deberá estar entre el valor de 40% y 60% [5], [28].

Los parámetros anteriormente descritos servirán para un correcto cálculo por parte de LandGEM, cabe mencionar que también existen parámetros que no son obligatorios o necesarios de ingresar para la estimación de producción de biogás.

1.4.8.2. Modelo Ecuatoriano

El modelo ecuatoriano de estimación de landfill gas es una modificación del modelo mexicano, desarrollado por SCS Engineers en concordancia con la U.S. EPA en el año 2003. Los diferentes estudios de prefactibilidad de aprovechamiento de biogás realizados en algunos rellenos sanitarios del Ecuador contribuyeron al desarrollo y calibración del modelo ecuatoriano. Los rellenos sanitarios que formaron parte del modelo ecuatoriano fueron: Las Iguanas en Guayaquil, Pichacay en Cuenca, Chabay en Azoguez, El Valle en Cuenca y el relleno sanitario de Loja [5], [29].

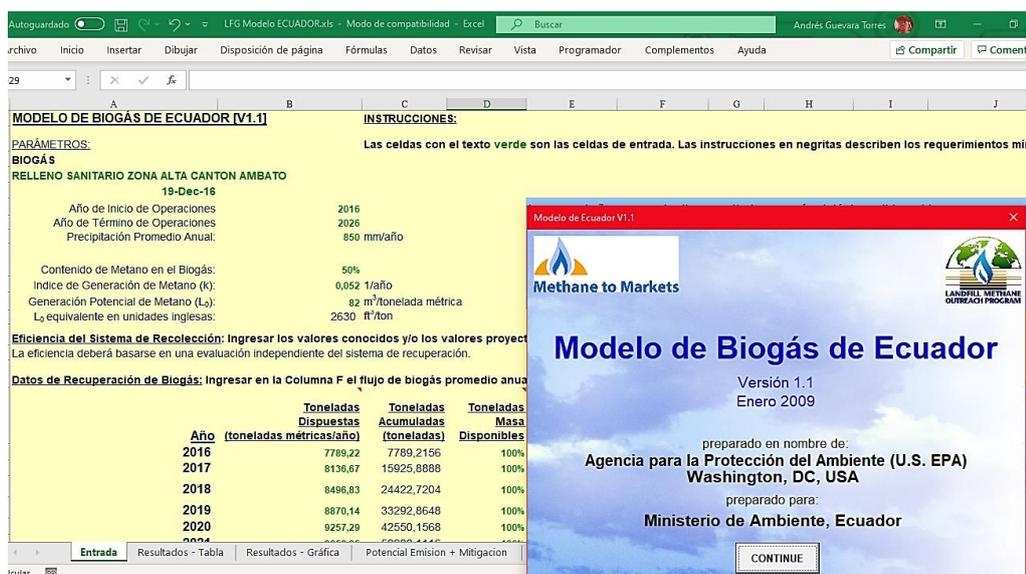


Figura 12. Interfaz del modelo de biogás de Ecuador

Fuente: Autor

El modelo ecuatoriano usa la ecuación (6) para estimar la cantidad de biogás.

$$Q = \sum_0^n \frac{1}{\%vol} k \cdot M \cdot L_0 \cdot e^{-k(t-t_{lag})} \quad (Ec. 6)$$

En donde:

Q : Cantidad total de biogás generado, [m³/año].

n : Número total de años modelado.

$\%vol$: Porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno.

k : Tasa de generación de metano, [1/año].

M : Cantidad de residuos dispuestos en el año i [ton].

L_0 : Potencial de generación de metano, [m³ de CH₄/ ton de RSU].

t : Tiempo en años, desde el inicio de la disposición de desechos.

t_{lag} : Tiempo estimado entre el depósito del desecho y la generación de metano.

El propósito del modelo ecuatoriano es apoyar al Ministerio del Ambiente y a los encargados de los rellenos sanitarios a evaluar y utilizar el biogás como aprovechamiento energético, así como en el control de las emisiones de GEI. El modelo ecuatoriano exige el ingreso de los siguientes parámetros:

- Año de apertura y cierre del relleno sanitario.
- Precipitación promedio anual en la zona del relleno sanitario [mm/año].
- Eficiencia del sistema de extracción de biogás.
- Tasa de generación de metano (k) [1/año].
- Cantidad de residuos dispuestos en el año (M) [ton].
- Potencial de generación de metano (L_0) [m³ de CH₄/ ton de RSU].

Los valores de k y L_0 pueden ser seleccionados directamente de la tabla 13, esta tabla se encuentra dentro del modelo ecuatoriano y fue calibrada a las características del Ecuador, tanto para las precipitaciones anuales, como a la composición de los residuos orgánicos generados en el país [29].

Tabla 13. Valores de k y L_0 del modelo ecuatoriano [29]

| Precipitación (mm/año) | k Contenido medio de residuos alimenticios $\leq 50\%$ | k Alto contenido de residuos alimenticios $\geq 60\%$ | L_0 Contenido medio de residuos alimenticios $\leq 50\%$ | L_0 Alto contenido de residuos alimenticios $\geq 60\%$ |
|-----------------------------------|---|--|---|--|
| 0 - 249 | 0.04 | 0.043 | 60 | 62 |
| 250 – 499 | 0.05 | 0.053 | 80 | 83 |
| 500 – 999 | 0.065 | 0.69 | 84 | 87 |
| 1000 – 1999 o Saturado | 0.08 | 0.085 | 84 | 87 |
| 2000+ o Saturado | 0.08 | 0.085 | 84 | 87 |

La eficiencia de extracción de biogás se basa en el diseño, tipo de suelo, material de cobertura y en el sistema con el que operan los pozos de recolección, el modelo ecuatoriano posee sus propios valores de la eficiencia del sistema de recolección.

Tabla 14. Eficiencia del sistema de recolección del modelo ecuatoriano [29]

| Sistema de recolección | Arcilla saturada o geomembranas | Arcilla no saturada |
|---|--|--------------------------------|
| Pozos verticales de gas perforados o Colectores horizontales | 80% | 70% |
| Pozos de venteo pasivos convertidos/modificados | 60% | 40% |

1.4.9. Medidor de gases portátil

Los principios de la medición de gases son utilizar sensores y hacer que interactúen con ciertas propiedades de los gases o vapores convirtiéndolas en señales eléctricas. Dependiendo del tipo de gas a medir, existen dispositivos portátiles y fijos que están equipados con sensores electroquímicos, infrarrojos y de perla catalítica.

Los medidores deben garantizar su calidad de funcionamiento y de seguridad durante la medición de gases inflamables o tóxicos en diferentes ambientes. Existen equipos con carcasas antideflagrantes, alarmas, con certificaciones de comercio y de protección contra explosión como es la ATEX (atmósferas explosivas) [30].

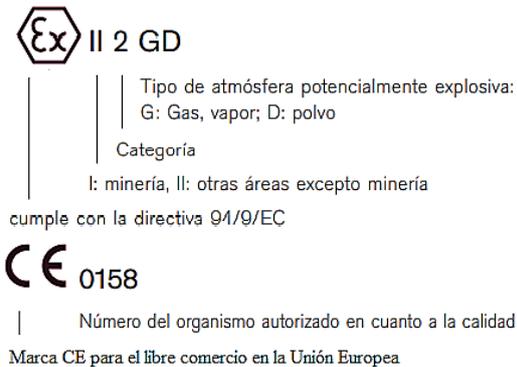


Figura 13. Marca según ATEX, marca de libre comercio

Fuente: [30]

En la presente investigación se hará uso del medidor portátil de gases ÓPTIMA7 Biogás, un versátil y potente detector de gas, capaz de hacer mediciones de presión, temperatura y de flujo de hasta 7 gases entre ellos CH₄, CO, CO₂, H₂S, NO, NO₂ y O₂, este equipo incorpora sensores catalíticos, PID, electroquímicos, galvánicos e infrarrojos los cuales garantizarán la medición del landfill gas y sus compuestos.



Figura 14. Equipo portátil para medición de gases ÓPTIMA7 Biogás

Fuente: Autor

1.4.10. Extracción del landfill gas

Los proyectos de aprovechamiento energético de biogás residual de un relleno sanitario se apoyan de sistemas de extracción de biogás, los cuáles permiten la conducción del biogás a los equipos de destrucción o de generación energética, pero antes, el gas debe pasar por un proceso de tratamiento, purificando y elevando el poder calorífico del metano [5], existen dos sistemas de extracción de biogás, el sistema activo y el sistema pasivo, a continuación, se presentan sus características.

1.4.10.1. Sistema pasivo

Los sistemas pasivos no son recomendados para el aprovechamiento energético, ya que no cuentan con equipos que fuercen la salida del biogás, algunos municipios han implementado estos sistemas por sus bajos costos de instalación y de mantenimiento, existen sistemas de extracción pasivos con y sin pozos de recolección, los sistemas sin pozos son peligrosos, ya que al no contar con drenajes, el gas se emitirá a la atmósfera sin control, filtrándose paulatinamente por toda el área del relleno hacia el exterior.

Los sistemas de captación con chimeneas permiten focalizar la emisión e incinerar el biogás mediante un quemador, pero la conducción y el paso de biogás es pobre, a causa de las características del relleno, las malas construcciones de los pozos y en algunas ocasiones por la obstrucción parcial o completa de los pozos a causa del movimiento de tierras y al material de la tubería utilizado [5], [19].



Figura 15. Vista superior de un pozo obstruido en el relleno sanitario de Ambato

Fuente: Autor

1.4.10.2. Sistema Activo

El sistema activo aporta la extracción más eficiente de gas, este sistema posee configuraciones de pozos verticales o de zanjas horizontales, incluye equipos de inducción de vacío o sopladores que fuerzan la evacuación del biogás y antorchas que queman el exceso de biogás mientras la planta se encuentre paralizada.

El proceso de instalación que sigue el sistema activo es perforar pozos en el área de RSU ya confinados, luego conectar cabezales a las tuberías de conducción y transportar el gas al siguiente proceso de tratamiento o purificación [2], [8], [12].

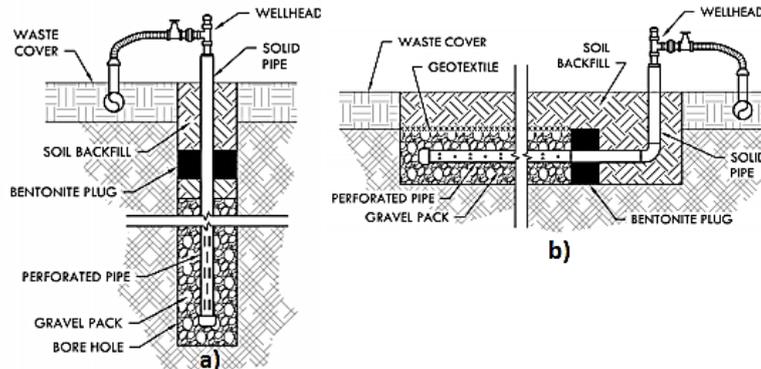


Figura 16. a) Pozo de extracción vertical, b) Pozo de extracción horizontal.

Fuente: [8]

Tabla 15. Ventajas, desventajas de los pozos verticales y horizontales [17]

| Tipo de pozo | Ventajas | Desventajas | Otras características |
|-------------------------|---|--|--|
| Pozos verticales | <ul style="list-style-type: none"> - Interrupción mínima de operación - Facilidad de inspección | <ul style="list-style-type: none"> - Deben colocarse una vez que el pozo se cierra o cuando queda menos de un año para el cierre del pozo - En caso de obstrucción tiene un largo período de inactividad | <ul style="list-style-type: none"> - Profundidad de 15 a 20m - Radio de influencia de 25m² a 35m², a menores radios mayor eficiencia |

| | | | |
|----------------------------------|---|---|--|
| <p>Pozos horizontales</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Menor captación de lixiviados - Instalación antes del cierre del pozo - Menor implementación de equipos | <ul style="list-style-type: none"> - Menores profundidades de instalación - Mayor riesgo de captación de aire - Mayor posibilidad de fallar por inundaciones | <ul style="list-style-type: none"> - Profundidad de instalación de 3 a 6m |
|----------------------------------|---|---|--|

El sistema activo compromete varios costos de implementación, pero se prefieren los pozos de extracción activos verticales que usualmente su recuperación de gas es del 25 a 75 m³/h [17], el sistema activo incorpora los siguientes componentes:

a) Cabezal de pozo

El cabezal (wellhead) está ubicado en la parte superior del pozo de recolección, su función es evacuar líquidos condensados y controlar el flujo del biogás [12].

b) Tuberías colectoras

Las tuberías permiten conducir el biogás extraído, el material empleado suelen ser HDPE o LDPE, polímeros con óptima resistencia mecánica y química, pero el circuito debe contar con válvulas y secciones para la evacuación de agua [12].

c) Recolector de condensados

Es indispensable que los líquidos condensados sean eliminados, éstos podrían producir bloqueos en las tuberías colectoras e interrumpir el proceso de recuperación de biogás, la formación de condensado se produce cuando el gas caliente extraído se va enfriando conforme viaja por el sistema de tuberías [8].

d) Compresores, sopladores de extracción

Los compresores y sopladores centrífugos son los encargados de la aspiración del gas hacia los cabezales, hacia los sistemas de recuperación y de tratamiento aguas abajo, existen equipos que cuentan con elementos de supresión de llama

en caso de una auto combustión por parte del metano, las características, el número y el tipo de los sopladores se implementarán de acuerdo, al caudal del biogás y de la distancia de los pozos a los procesos posteriores [8], [12].

e) Antorcha

Las emisiones de landfill gas pueden ser controladas mediante los dispositivos llamados antorchas, las antorchas abiertas y cerradas son implementadas como elementos de control y quema de exceso de biogás, esto en las etapas de arranque, inactividad y expansión de los sistemas de conversión de energía [8].

Las antorchas abiertas son de un costo menor comparadas a las cerradas, este tipo de antorchas constan de una tubería vertical, un quemador y una cubierta. La eficiencia de las antorchas abiertas dependerá del diseño y el flujo total que será captado, en el mejor de los casos las antorchas abiertas pueden llegar a una eficiencia del 98%, las desventajas de este tipo de antorchas son sus combustiones incompletas y la regulación del flujo de entrada [17].

A nivel mundial se emplean antorchas cerradas, este tipo de antorchas son más costosas, pero involucran eficiencias del 99% o más, gracias a su mejor combustión y tasas de destrucción de metano más altas, entre las ventajas están: reducción de contaminación visual por ocultamiento de llama, minimización de ruido, aprobación de regulaciones estatales y control de la combustión [8], [17].



Figura 17. A la izquierda antorcha abierta y a la derecha antorcha cerrada.

Fuente: [8]

El caudal generado por el relleno sanitario y el caudal recuperado en la extracción no son lo mismo, ya que el caudal recuperado o la tasa extraída de biogás dependerá de la correcta instalación, diseño y operación del sistema de extracción de biogás, además se deberá evitar una sobre extracción, esto impedirá la incorporación de aire en los pozos, alterando el caudal y la composición del biogás [21].

1.4.11. Sistema de tratamiento del landfill gas

Una vez extraído el landfill gas y antes de pasar al proceso de aprovechamiento energético, es primordial efectuar una purificación al gas, los principales objetivos del tratamiento son: eliminar el exceso de humedad, excluir impurezas, remoción de CO₂, siloxanos y sulfurados [2], [12], [17]. Los métodos de purificación buscan elevar el poder calorífico y garantizar el rendimiento de explotación energética [5].

La purificación del biogás será parcial, media o alta dependiendo la finalidad y de la tecnología en donde se convertirá en energía útil. La mayoría de las calderas y motores demandan un tratamiento de deshumidificación y filtración, en cambio otros como las turbinas, microturbinas y los MCI requieren la eliminación de siloxanos y azufre [8], [12]. En las tablas 16 y 17, se exponen los tipos y los niveles de tratamiento del biogás.

Tabla 16. Tipos de tratamiento del landfill gas [5]

| Tratamiento de bajo nivel de energía | Tratamiento de medio grado de energía | Tratamiento de alto grado de energía |
|--|---|--|
| Son tratamientos primarios y permiten la remoción de condensado, disminución de la humedad y filtración de partículas. | Tratamientos secundarios que incluyen la compresión, refrigeración para deshidratar el biogás; y tratamientos químicos para remoción de componentes como sulfuros, siloxanos y de compuestos orgánicos volátiles. | Son los más costosos y consisten en la separación del CO ₂ y otros gases. Este tipo de tratamiento necesitan elevados grados de purificación y de tecnología especializada. |

Tabla 17. Nivel de tratamiento del landfill gas según su finalidad energética [12], [19]

| Uso final | Eliminación de agua | Eliminación de CO₂ | Eliminación de H₂S |
|---|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Producción térmica en calderas | Parcial | No | No/Parcial/Elevado |
| Producción de electricidad en motores estacionarios | Parcial/Elevado | No/Parcial/Elevado | Parcial/Elevado |
| Combustible para vehículos o para turbinas | Elevado | Elevado | Elevado |
| Sustituto del gas natural | Elevado | Elevado | Elevado |
| Celdas de combustible | Elevado | Elevado | Elevado |

1.4.11.1. Métodos de purificación del landfill gas

Las tecnologías de transformación energética a partir de biogás emplean un rango máximo de H₂S, el cual está entre los 200 a 500 ppm, ya que durante la combustión el sulfuro de hidrógeno se convierte en ácido sulfhídrico y podría comprometer a serios problemas de corrosión en los equipos electrógenos [2]. Los métodos de tratamientos del biogás se clasifican según la tecnología utilizada o los compuestos a eliminar.

1.4.11.2. Método de adsorción

El sulfuro de hidrógeno (H₂S) es atrapado por adsorbentes como el carbón activado, sílica gel y tamices de zeolitas o de carbón, en el caso del carbón activado se impregnan con catalizadores para aumentar la eficiencia en la adsorción del H₂S, algunos catalizadores son: el yoduro de potasio (KI), el carbonato de potasio (K₂CO₃) y el permanganato de potasio (KMnO₄) [2], [25].

La tecnología más usada para la separación del CO₂ es la de PSA (adsorción por oscilación de presión), los adsorbentes son el carbón activado, zeolitas o la combinación de ambos. La tecnología consta de cuatro recipientes, cada uno lleva procesos de presurización-adsorción-despresurización-desorción, el biogás ingresa por la parte inferior luego va ascendiendo a través del recipiente y finalmente el absorbente incorporado extrae la mayor cantidad de dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno. El PSA recupera una tasa de metano que está entre el 85% a 90% [2].

Tabla 18. Ventajas y desventajas del método de adsorción [2], [19]

| Tecnología | | Ventajas | Desventajas |
|---------------------|------------------|--|---|
| Método de Adsorción | Carbón activado | Eliminación de siloxanos con eficiencia del 95% Eliminación de H ₂ O Reducción del H ₂ S a valores cercanos a 4ppm Disminución del CO ₂ entre el 1 y 3% Adecuado para el tratamiento de caudales pequeños | Mejores resultados a altas presiones Se prefiere que la humedad relativa del biogás sea menor al 50% Costo de operación elevado La eficiencia del tratamiento disminuye con la saturación del carbón activado |
| | Sílica gel | Depuración de siloxanos Eliminación de H ₂ O Eficiencias del 98% en operaciones piloto | Aplicación experimental Costo mayor al carbón activado Altos contenidos de humedad que disminuyen la vida útil del sílica gel |
| | Grafito (carbón) | Elevada eficiencia en la depuración de determinados siloxanos Elimina otros compuestos del biogás | Costo mayor al del carbón activado y sílica gel Altos contenidos de humedad que disminuyen la vida útil del grafito La eficiencia del tratamiento disminuye con la saturación del grafito La viabilidad económica requeriría regeneración mediante PSA |

1.4.11.3. Métodos de absorción

Sistemas utilizados por sus bajos costos de operación y reactividad al H₂S. La absorción emplea residuos de hierro humedecidos, mezclados usualmente con residuos de madera como el aserrín, los materiales se ubican en columnas de purificación y mediante la hidrodinámica se logra eliminar el H₂S del biogás [2].

La absorción ocurre en columnas de purificación, donde el agua actúa como absorbente al contacto con el biogás en contracorriente iniciando la transferencia de masa del CO₂ y H₂S al agua, la retención de estos compuestos hace que se deba incorporar entre el 10 a 20% de agua al sistema, este método maneja altas presiones y bajas temperaturas provocando una eficiencia de operación baja [2]. Esta técnica Water Scrubbing disuelve las impurezas en el agua, envía el flujo contaminado a columnas de regeneración y finalmente libera el CO₂ purificando el metano [17].

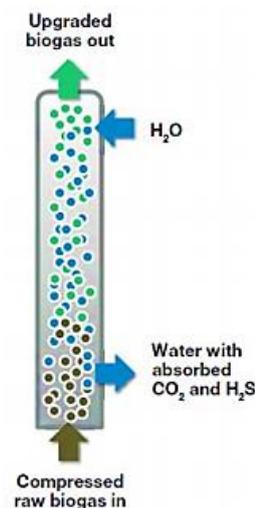


Figura 18. Método de absorción con agua (water scrubbing)

Fuente: [17]

1.4.11.4. Métodos de separación por diafragma

Las permeabilidades de las membranas se seleccionan de acuerdo al elemento a separar, fundamentalmente se usan diafragmas para separar CH₄ o CO₂, existen membranas porosas y difusionales, en las difusionales la diferencia de presiones será

la encargada de movilizar el biogás a través de las membranas en función de su estructura molecular, el resultado final será un gas rico en metano con alta presión en el exterior y un gas rico en dióxido de carbono con baja presión en el interior de los diafragmas [2], [25], [26].

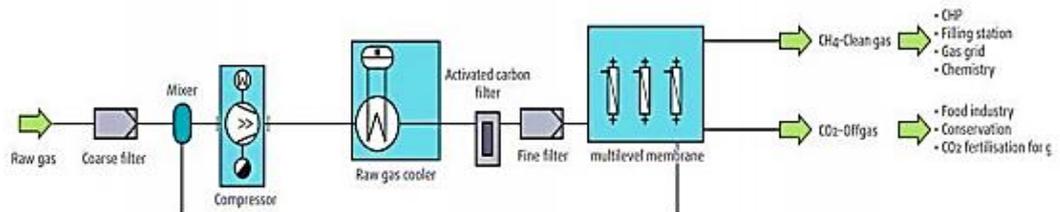


Figura 19. Sistema de separación por membranas

Fuente: [16]

1.4.11.5. Métodos biológicos

La utilización de biofiltros hace que los niveles de sulfuro de hidrógeno H_2S lleguen aproximadamente hasta 50 ppm, los biofiltros funcionan con microorganismos que digieren el sulfuro de hidrógeno, existen productos que usan algas de macro y micro tamaño con efecto bio catalítico, haciendo que el biogás tratado por este método se emplee como biocombustible en vehículos y en motores de cogeneración [2].

Tabla 19. Ventajas y desventajas de los métodos de absorción, membranas y biológicos [2], [19]

| Tecnología | | Ventajas | Desventajas |
|---------------------|---|---|---|
| Método de absorción | Scrubber, lavado con soluciones aminas | Absorbe el H_2S y CO_2 Eliminación de CO_2 hasta un 98% | Elevados costos de operación Requiere energía en la fase de recuperación del CO_2 |
| | Scrubber, lavado con soluciones alcalinas | Absorbe el H_2S y CO_2 Elimina problemas de formación de espumas y corrosión | El agente antiespumante hace que el equipamiento y operación se dificulte Consume más energía en el bombeo de la solución y de los gases |

| | | | |
|----------------------|-------------------------|---|---|
| Método de separación | Separación por membrana | Separación del H ₂ S y CO ₂ Equipos y operación de simple manejo | Eficiencia de separación baja Costos de operación elevados Aplicación de presiones elevadas |
| Métodos biológicos | Métodos biológicos | Eliminación de H ₂ S Los microorganismos pueden vivir en presencia o no de O ₂ El contenido de H ₂ S puede reducirse de 3000-5000 ppm a 50-100 ppm | Se debe agregar O ₂ al biogás para desulfurización biológica, cuyo nivel depende de la concentración de H ₂ SO ₄ , que normalmente está entre 2% a 6% volumen de aire en el biogás |

1.4.12. Tecnologías en la generación de energía a partir de landfill gas

Luego de que el landfill gas haya sido extraído y purificado se lo puede emplear en la generación de energía, el porcentaje del combustible CH₄ contenido en el biogás determinará su uso en la producción energética, por ejemplo, si la tasa de CH₄ es menor a 25% este deberá ser incinerado u emitido a la atmósfera sin recuperación energética, si se encuentra entre el 25 y 40% debería ser quemado en antorchas y si la tasa de CH₄ es mayor a 40% se lo considera una fuente de combustible aprovechable [2].

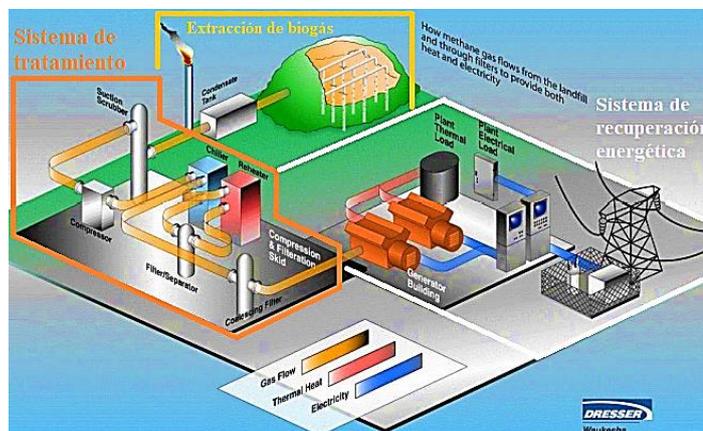


Figura 20. Extracción, tratamiento y recuperación energética del biogás residual de un relleno sanitario

Fuente: [8]

Enfocados en el CH₄, que es el combustible que liberará energía, se prevé de algunas propiedades de combustión del metano y gas natural en la tabla 20.

Tabla 20. Propiedades de combustión del metano y gas natural [15]

| Propiedad | Metano | Gas natural |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Densidad | 0.657 kg/m ³ | 0.828 kg/m ³ |
| Porcentaje máximo de CO ₂ | 9.506 % | 12.06 % |
| Poder calorífico superior volumétrico | 37.5 MJ/ m ³ | 43.12 MJ/ m ³ |
| Poder calorífico inferior volumétrico | 33.7 MJ/ m ³ | 39 MJ/ m ³ |
| Límite inferior de inflamabilidad | 5 | |
| Límite superior de inflamabilidad | 15 | |

Una planta de generación energética a partir de biogás estará equipada con diferentes tecnologías y las características de éstas estarán basadas en la producción de biogás que tenga el relleno sanitario, el caudal del biogás los proporcionan los modelos matemáticos de estimación de biogás o de alguna medición *in situ*, esto para determinar el total de metano por hora y con la que operará el equipo electrógeno [12].

El caudal recuperable es decir el biogás final obtenido después de las etapas de extracción se calcula mediante la ecuación (7).

$$Q_{b.r} = \gamma \cdot Q_{biogás} \quad (Ec. 7)$$

En donde:

$Q_{b.r}$: Biogás recuperable [m³/año].

γ : Eficiencia de recuperación de biogás.

$Q_{biogás}$: Caudal de biogás generado en el relleno sanitario (estimación por modelos matemáticos o por mediciones *in situ*).

El porcentaje de la eficiencia de recuperación de biogás estará basado en el diseño, sistema de extracción y características del relleno sanitario, para una estimación de la eficiencia en la captación de biogás en rellenos sanitarios que cuentan con requisitos técnicos de operación se asume tres posibles casos como se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Estimación de eficiencias según el tipo de escenario del relleno sanitario [5]

| Eficiencia de recuperación | Estimación del % de eficiencia |
|----------------------------|--------------------------------|
| Baja | 30-50 |
| Media | 60-80 |
| Alta | 80-95 |

La determinación de la energía eléctrica que podría disponer el relleno sanitario de estudio se calcula bajo la ecuación (8), dicha ecuación contempla la transformación del biogás en forma de energía útil, en calor y en electricidad [5].

$$E. disp = Q_{b.r} \cdot m \cdot PCS_{metano} \cdot \eta_e \quad (Ec. 8)$$

En donde:

$E. disp$: Energía eléctrica disponible [kWh/año].

$Q_{b.r}$: Biogás recuperable [$m^3/año$].

m : Fracción de metano en el biogás, [40, 50, 60 % en rellenos sanitario].

PCS_{metano} : Poder calorífico superior del metano, [kWh/m^3].

η_e : Eficiencia eléctrica del grupo electrógeno (%).

El poder calorífico del biogás dependerá del tratamiento previo que se le dé al biogás, en el peor de los casos será de $5 kWh/m^3$ y en el mejor estará entre 8 y $10 kWh/m^3$. La potencia del equipo de generación eléctrica se calcula mediante la ecuación (9).

$$P_{E.G} = \frac{E. disp}{8760 \text{ horas} \cdot f.p} \quad (Ec. 9)$$

En donde:

$P_{E.G}$: Potencia del elemento generador [kWh/año].

$f.p$: Factor de planta, se asume un valor entre el 80 y 90% ocasionado por mantenimiento y paro de maquinaria durante el año.

Existen diferentes equipos para la generación de energía a partir de biogás residual de un relleno sanitario, muchos de estos operan según el tratamiento que se le haya dado al biogás y el potencial nominal disponible, a continuación, se presentan las tecnologías más utilizadas en la recuperación energética del biogás.

1.4.12.1. Motor a combustión interna (MCI)

Los MCI son los más usados en rellenos sanitarios, estos generan energía mecánica a partir de la combustión de un combustible en una reacción química, en los MECH (motores de encendido por chispa) o en los MAE (motores de autoencendido) se puede utilizar un biogás con una pureza media. Los MECH necesitan de otros combustibles para el arranque, pero luego de esto pueden emplear el 100% de biogás y operar sin novedad, los MAE trabajan con un sistema mixto de biogás y diésel, sin embargo, los MCI emiten altas emisiones de NO_x y CO_2 [2], [19].

En rellenos donde la producción de biogás está entre los 800 kW a 3MW se implementan MCI, si la producción es mayor a 3MW se suele fusionar varios MCI, las eficiencias de los MCI va desde los 30 a 40%, si se incorpora un sistema de cogeneración las eficiencias aumentarían, para producir 1 MW de energía eléctrica se requiere un caudal de 500 a 540 m^3/h de biogás con 50% de metano [8], [5], [12].

Tabla 22. Tamaños de MCI para biogás con 50% de CH₄ [8]

| Tamaño del motor | Flujo de gas a 50% de metano |
|-------------------------|-------------------------------------|
| 540 kW | 347 m ³ /h |
| 633 kW | 398 m ³ /h |
| 800 kW | 595 m ³ /h |
| 1.2 MW | 850 m ³ /h |

1.4.12.2. Turbinas de gas

Con un costo más elevado que los MCI, las turbinas de gas poseen propiedades resistentes a la corrosión, además de emitir menores cantidades de NO_x y CO₂ por su mejor rendimiento, obligatoriamente el biogás debe poseer un alto grado de tratamiento y un equipo de compresión para operar este tipo de turbinas [5], [19].

Destinadas a grandes proyectos donde se genere como mínimo 3 MW con un caudal de 2 200 m³/h, en un ciclo simple pueden alcanzar eficiencias del 20 a 28% a plena carga, pero disminuyendo esta eficiencia al operar en cargas parciales, mientras tanto que en un ciclo combinado la eficiencia mejora logrando un 40% [8], [12].

1.4.12.3. Microturbinas

Estas modulares microturbinas son menos ruidosas, emiten bajas tasas de GEI, requieren un nivel medio de tratamiento de biogás y pueden combinarse con varias microturbinas para aumentar su capacidad. La potencia está en el rango de 30 a 200 kW y operan a una eficiencia del 25 a 30%, generalmente vienen en tamaños de 30, 70 y 250 kW, son indicadas para operar con tasas de metano hasta del 35% y en proyectos de pequeño a mediano tamaño [1], [2], [8].

1.4.12.4. Generador eléctrico

Los generadores eléctricos son los encargados de convertir la energía mecánica en energía eléctrica, estos generadores son ensamblados a cualquiera de las tecnologías

anteriormente revisadas, la potencia de salida va a ser menor a la potencia de entrada o suministrada ya que en la transformación en energía útil existen pérdidas relacionadas al rozamiento mecánico o a la disipación de calor entre otras [2], [19].

La implementación de tecnologías en la generación de energía a partir de biogás en proyectos pequeños, medianos y de grande tamaño conllevan costos de adquisición, operación y mantenimiento, en la tabla 23 se proporciona los costos aproximados de algunas tecnologías anteriormente vistas.

Tabla 23. Ejemplos de costos típicos en la implementación de tecnologías de conversión energética [5], [8]

| Tecnología | Flujo necesario | Potencia | Eficiencia eléctrica neta | Costo de capital típico (\$/kW) | Costo típico anual de operación y mantenimiento (\$/kW) |
|-------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------------|--|--|
| MCI | 8-30 m ³ /min | >800 kW-3MW | 30-40% | \$ 1 800 | \$ 250 |
| Pequeños MCI | 8-30 m ³ /min | <800 kW | 30-40% | \$ 2 500 | \$ 270 |
| Turbina de gas | >40m ³ /min | >3MW | 20-40% | \$ 1 500 | \$ 160 |
| Microturbina | < 8m ³ /min | 30kW-200kW | 25-30% | \$ 5 500 | \$ 280 |

1.4.12.5. Calderas, secadores y hornos

El empleo más rentable de biogás de BTU medio se da en procesos industriales, el combustible típicamente utilizado en calderas, secadores y en hornos rotativos de cemento puede ser sustituido por biogás. Los equipos necesariamente deben ser modificados para el manejo de biogás con costos que van desde los \$ 200 000 a \$ 400 000 dependiendo la capacidad y tecnología de la máquina térmica [8].

1.4.12.6. Calentadores infrarrojos

La calefacción por biogás, se la puede implementar en oficinas, departamentos y salas de máquinas dentro del mismo relleno sanitario, la energía de alta intensidad generada por los infrarrojos es segura y ésta es absorbida por las paredes disipando el calor dentro de la habitación. Los calentadores infrarrojos son económicos y de fácil instalación, funcionan con flujos de entre los 0.28 y 4.25 m³/min, el costo aproximado de un calentador está en los 3 000 dólares y de la tubería en 20 000 a 30 000 dólares, la superficie que cubre un calentador está entre los 46 y 74 m² [8].

1.4.12.7. Evaporador de lixiviados

Otra alternativa relevante para el uso de biogás es la evaporación de lixiviados producidos en el relleno sanitario como solución al no disponer de una planta de tratamiento de lixiviados. Los tamaños de los evaporadores están entre los 10 000 a 30 000 galones por día de lixiviado, la inversión varía entre los 300 000 a 500 000 dólares, los costos por operación y mantenimiento están en el rango de \$ 70 000 y \$ 95 000 anuales [8].

Tabla 24. Costos de la evaporación de lixiviados [8]

| Capacidad (galones por día) | Costo |
|-----------------------------|--------------------------|
| 30 000 | \$ 0.05 – 0.06 por galón |
| 20 000 | \$ 0.06 – 0.9 por galón |
| 10 000 | \$ 0.10 – 0.15 por galón |

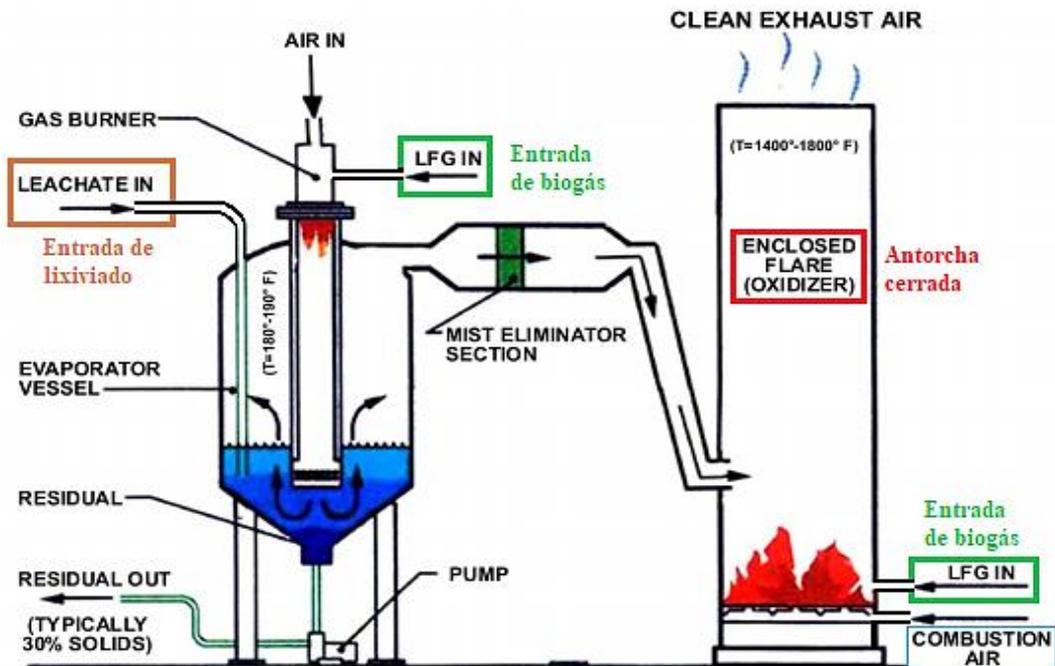


Figura 21. Diagrama de un evaporador de lixiviados

Fuente: [8]

1.4.12.8. Gas natural comprimido

El mejor tratamiento del biogás para procesarlo como gas natural comprimido es el de separación por membranas y tamices moleculares, los costos de operación anuales de la producción de gas natural comprimido operando con varios flujos de gas se cotizan entre 1.64 y 2.82 dólares por el equivalente de galón de gasolina [8].

1.4.12.9. Gas natural licuado

El biogás después de convertirlo en gas natural comprimido pasa a un proceso de licuefacción, los tratamientos anteriores del biogás deben garantizar que los niveles de dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno sean lo más bajos posibles, evitando explosiones y la formación de condensados en el licuado del biogás. El costo de producción estimado por galón de gas natural licuado es de \$ 0.65 para una planta que genera alrededor de 15 000 galones al día, la inversión inicial para dicha planta se acerca a los \$ 20 000 000 [8].

Luego de la descripción de las tecnologías de transformación energética y los usos que se le puede dar al biogás de medio y alto BTU, en la tabla 25 se ejemplifican algunas aplicaciones cotidianas que se le da al biogás, donde el flujo requerido de funcionamiento es bajo y casi no necesitan tratamiento previo.

Tabla 25. Diferentes aplicaciones del biogás [22], [25]

| Equipo | Consumo de biogás | Rendimiento (%) |
|----------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Cocina a biogás de dos hornillas | 0.20 – 0.42 m ³ /h | 50 - 60 |
| Lámpara a mantilla (60W) | 0.12 – 0.17 m ³ /h | 30 - 50 |
| Heladera (100 litros) | 0.03 – 0.075 m ³ /h | 20 - 30 |
| Olla arrocera | 0.14 m ³ /h | |
| Calentador de agua | 2.2 m ³ /h | |
| Motor a gas | 0.5 m ³ /kWh | 25 - 30 |
| Quemador (10 kW) | 2 m ³ /h | 80 - 90 |
| Infrarrojo (200W) | 0.03 m ³ /h | 95 - 99 |
| Co generador | 1 kW eléctrica. 2 kW térmica | Hasta 90 |

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología utilizada en función de los objetivos planteados, considerando aspectos como la caracterización del relleno sanitario de Ambato, determinación de parámetros para la aplicación de los modelos LandGEM y ecuatoriano, la medición *in situ* de la tasa de metano contenida en el landfill gas y el planteamiento de las alternativas de aprovechamiento energético.

2.1. Ubicación del relleno sanitario de Ambato

Tungurahua ubicada geográficamente en la sierra central limita con las provincias de Napo, Pastaza, Morona Santiago, Bolívar, Cotopaxi y Chimborazo. Tungurahua cuenta con una población proyectada al 2020 de 590 600 habitantes y Ambato de 387 309 de habitantes con una expansión notablemente urbana [31].



Figura 22. Provincia de Tungurahua y cantón en donde está ubicado el relleno sanitario de Ambato

Fuente: [31]

2.2. Características climatológicas

Las condiciones climatológicas estadísticamente pronosticadas para el año de estudio en la ciudad de Ambato son: una precipitación de 1402 mm/año y una humedad del 84.6 % [34]. La altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra el relleno sanitario es de 2555 m, con una velocidad del viento de 0.8 m/s y una temperatura de 20.9 °C, datos recolectados al medio día en el sitio de estudio como se muestra en la figura 23.



Figura 23. Medición de temperatura, altura y velocidad del viento en el relleno sanitario de Ambato

Fuente: Autor

2.3. Datos característicos del relleno sanitario de Ambato

El relleno sanitario de Ambato se localiza en el complejo Ambiental Chasinato vía a Píllaro Km. 10, inició sus operaciones en el año 2004 y cuenta con un área de 23.05 hectáreas e ingresan en promedio 290 toneladas diarias de RSU, los residuos domésticos e industriales son sometidos a compactación, mientras que los desechos hospitalarios poseen su propia celda especial [32].

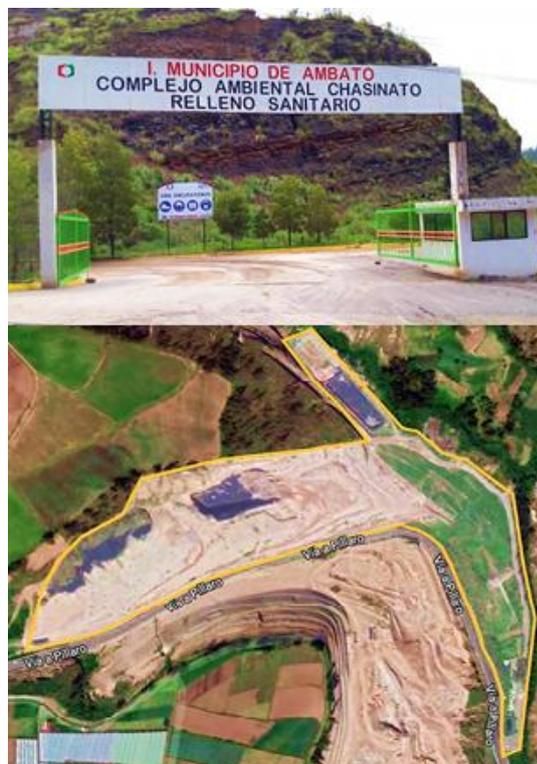


Figura 24. Superior entrada al Complejo Ambiental Chasinato, inferior área del relleno sanitario de Ambato

Fuente: Autor, Google Earth

2.4. Recopilación y control de pesos de RSU en el relleno sanitario de Ambato

Se presentan los procesos de confinamiento de los RSU, una vez que han llegado al relleno sanitario de Ambato para su cuantificación y disposición final.

- Pesaje de camiones recolectores de RSU

La flota vehicular de recolección de residuos sólidos es sometida a un pesaje al ingreso y salida del complejo, cuantificando el material depositado al interior.



Figura 25. Pesaje de camión recolector

Fuente: Autor

- Colocación y compactación de los RSU

Los residuos son depositados, esparcidos y compactados por maquinaria pesada en celdas previamente excavadas para el confinamiento de estos, se cubren con una capa de tierra y finalmente se compacta el suelo o el área operada.



Figura 26. Colocación y compactación de los RSU

Fuente: Autor

2.5. Cálculo de parámetros para modelo LandGEM

El primer parámetro en calcularse para utilizar la herramienta LandGEM es k , por medio de la precipitación anual, en la tabla 9 se identifica que la ciudad de Ambato posee un clima moderadamente húmedo y se seleccionan tres constantes de degradación, según la tabla 8 son: degradación rápida, medianamente rápida y lenta, determinando así el valor promedio de k con la ecuación 2.

$$k_{1402} = \frac{0.26 + 0.12 + 0.048}{3} = 0.142 \text{ año}^{-1}$$

El valor de L_0 se determina mediante la ecuación 3, por lo tanto, se procede a determinar los parámetros que la componen:

- $MCF = 1$, relleno sanitario con gestión de RSU anaeróbica según las tablas 11,12.
- DOC se calcula mediante la ecuación 4 y el porcentaje de la caracterización de los RSU según la tabla 29.

$$DOC = 0.4 \cdot (7.57\%) + 0.17 \cdot (4.48\%) + 0.15 \cdot (36.55\%) + 0.3 \cdot (0\%) = 0.0927$$

- DOC_F se calcula por medio de la ecuación 5 y la temperatura del lugar de estudio.

$$DOC_F = 0.014 \cdot (20.9) + 0.28 = 0.57$$

- $F = 50\%$ de CH_4 , valor por defecto recomendado por LandGEM.

Se procede al cálculo de L_0 .

$$L_0 = 1 \cdot 0.0927 \cdot 0.57 \cdot 0.5 \cdot \frac{1}{0.66} \cdot \frac{16}{12} \cdot 1000 = 53.38 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4 / \text{ ton de RSU}$$

Con los parámetros k , L_0 determinados y la información proporcionada por la Empresa Pública Municipal de Gestión Integral de Desechos sólidos Ambato (EPM-GIDSA), se estima la producción de biogás, CH_4 y CO_2 con el modelo LandGEM.

2.6. Selección de parámetros para modelo ecuatoriano

En el caso del modelo ecuatoriano, los parámetros k y L_0 se seleccionan de la tabla 13. Por medio de la precipitación anual y el contenido medio de residuos alimenticios $\leq 50\%$ según la tabla 30, el valor de $k = 0,08$ y $L_0 = 84$. La eficiencia del sistema de recolección es del 60% como se expone en la tabla 14, debido a que el relleno sanitario de Ambato emplea geomembrana, pero emplea pozos de recolección pasivos.

Al igual que el modelo LandGEM, el modelo ecuatoriano hace uso de un contenido de metano del 50% para su estimación de biogás. Otro dato importante que solicita el modelo ecuatoriano es el de toneladas de masa disponibles, que se refiere a la masa residual disponible que será drenada por los pozos de venteo, en este caso será del 100%, ya que el área de los desechos sólidos, industriales e infecciosos poseen sus propios pozos de gas.

Con los datos anteriormente seleccionados y la cantidad de residuos ingresados al relleno sanitario de Ambato, se procede a la estimación y recuperación del biogás en el modelo ecuatoriano.

2.7. Medición de landfill gas *in-situ*

Los procedimientos empleados para llevar a cabo la medición de la tasa de metano contenida en el biogás producido en el relleno sanitario de Ambato se muestran en el diagrama de flujo de la figura 27, posteriormente se detallarán los procesos seguidos en la medición *in-situ*.

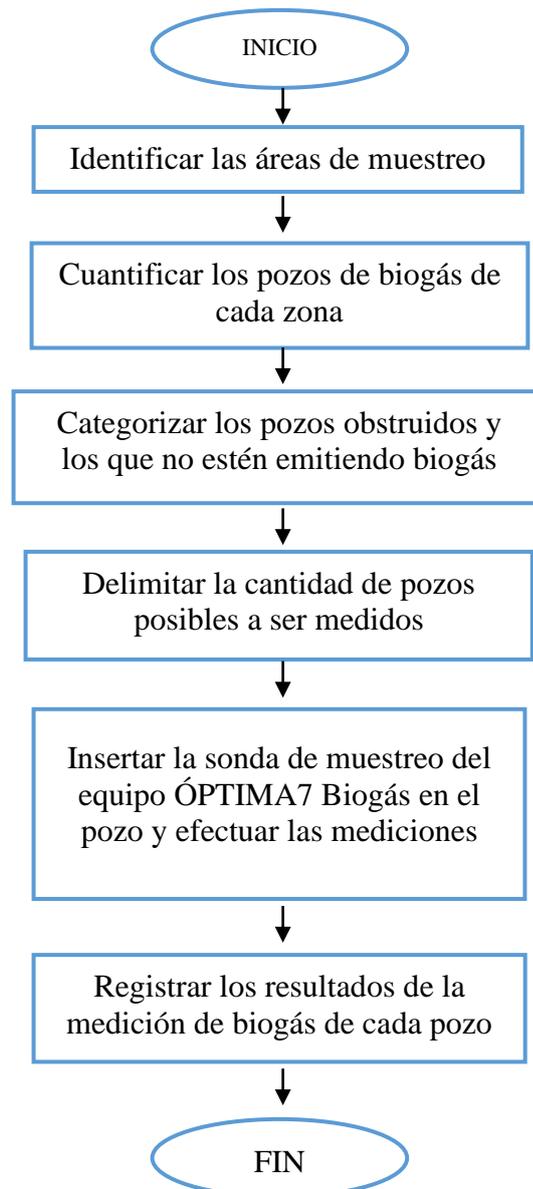


Figura 27. Diagrama de flujo para efectuar la medición de la tasa de metano *in-situ*

Fuente: Autor

2.7.1. Área de muestreo

El área de estudio fue dividida en las zonas 1 y 2 mostradas en la figura 28, las zonas comprenden confinamiento de RSU desde el año 2010, actualmente las operaciones de disposición final de los desechos sólidos se las realizan en la zona 2.

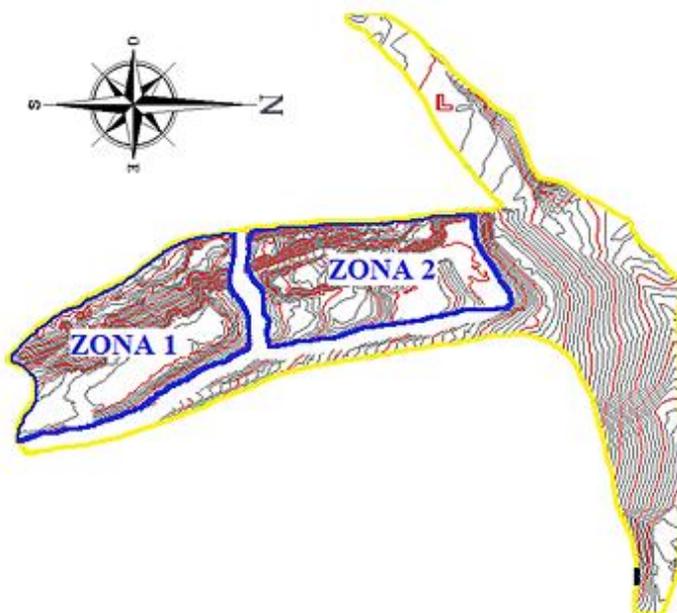


Figura 28. Topografía del relleno sanitario de Ambato

Fuente: Autor

2.7.2. Cuantificación de los pozos de venteo en las zonas de estudio

Mediante una exploración a pie a través de las zonas 1 y 2 se cuantificó el número de pozos, muchos pozos se sitúan en el plano horizontal y otros en la pendiente de cada una de las zonas. La zona 1 posee 33 pozos, mientras que la zona 2 cuenta con 29.

2.7.3. Categorización de los pozos de venteo a ser muestreado

Los pozos que promueven un buen indicio para la medición de biogás son los pozos que están constantemente emitiendo gas, por lo tanto, se identificaron varios pozos obstruidos como se aprecia en la figura 14, que emitían una cantidad pobre de gas o nada. Para constatar que el pozo está emitiendo un flujo de biogás considerable, se optó por la técnica de envolver el pozo con una funda plástica y tomar el tiempo que

se demora el biogás en llenar la funda, dicha técnica se la aplicó a varios pozos luego de retirar el quemador tal como se muestran en la figura 29.



Figura 29. Técnica de sellado con funda plástica a pozo de venteo

Fuente: Autor

2.7.4. Delimitación de los pozos a ser medidos

La categorización permitió identificar los pozos deformados, obstruidos y que no están emitiendo subproductos gaseosos, la delimitación se muestra en la tabla 28.

Tabla 26. Delimitación de los pozos a ser medidos

| Categorización de pozos | Zona 1 | Zona 2 |
|--|--------|--------|
| Cuantificados total | 33 | 29 |
| Obstruidos, sin emisión de gas y combustionando biogás con fuente de llama en el interior del pozo por debajo del nivel de la superficie del terreno | 13 | 12 |
| Óptimos para medición <i>in-situ</i> | 20 | 17 |

Fuente: Autor

2.7.5. Medición de landfill gas y sus compuestos

La medición comienza insertando la sonda en alguno de los agujeros de la tubería, cabe mencionar que en los pozos donde se encuentra combustingando el biogás, la sonda se insertó en la parte inferior debido a que la fuente de llama se encontraba en el extremo superior del quemador tal como se muestra en las figuras 30 y 31.



Figura 30. Medición del biogás producido en el relleno sanitario de Ambato

Fuente: Autor



Figura 31. Lectura de los compuestos del biogás con un alto contenido de metano

Fuente: Autor

Tan rápido se inserte la sonda, el equipo empieza a analizar los compuestos del biogás, dentro de aproximadamente 30 segundos los valores llegan a una estabilización y no incrementan más, indicando que ese es el valor fijo para dicho pozo. Las zonas de muestreo se pueden apreciar de mejor manera en el plano topográfico del relleno sanitario de ambato del anexo 2.

2.8. Determinación de alternativas de aprovechamiento energético

Según la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), la planta de generación de energía eléctrica a partir de biogás del relleno sanitario el Inga I y II tiene una potencia de 5 MW, a este sitio ingresaron un promedio de 2 100 toneladas de RSU diarios, de acuerdo al informe de rendición de cuentas del 2020 [35], emitido por la Empresa Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS-EP), mientras que en relleno sanitario de Ambato ingresaron un promedio de 290 toneladas diarias reflejado en el informe de rendición de cuentas 2020 [36].

Contrastando la capacidad del relleno sanitario de Ambato con el Inga, el relleno sanitario de Ambato podría generar una potencia menor a 1MW, delimitando la posibilidad de emplear turbinas de gas y microturbinas, al igual que un evaporador de lixiviados, la producción de lixiviado para el año 2020 fue de 7 200 gal/día [36] y según [8] existen evaporadores disponibles con capacidades que van desde los 10 000 gal de lixiviado en adelante. En vista de lo anterior, se consideran las siguientes posibles alternativas de aprovechamiento energético para el mismo sitio de estudio.

Tabla 27. Alternativas de aprovechamiento energético con landfill gas

| Equipo | Aprovechamiento | Capacidad | Eficiencia |
|--------------------|-----------------------------------|-----------|------------|
| Motogenerador | Energía eléctrica | < 800 kW | 85% |
| Cogeneración | Energía eléctrica y agua caliente | < 900 kW | 83.2% |
| Sistemas radiantes | Calentamiento de aire | < 25 kW | 90% |

Fuente: Autor

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estimación de producción de biogás en el relleno sanitario de Ambato mediante los modelos matemáticos LandGEM y ecuatoriano se exponen en este capítulo, al igual que la tasa de metano contenida en el biogás por medio de medición *in-situ*, además, los resultados del modelo ecuatoriano modificado con la tasa de metano adquirida *in-situ*, el potencial energético aprovechable del biogás y las propuestas técnicas de aprovechamiento energético en base al flujo del biogás producido en el sitio.

3.1. Análisis del crecimiento de RSU confinados en el relleno sanitario de Ambato

El relleno sanitario de Ambato empezó sus operaciones por el año 2004, pero para la estimación de la tasa de producción de biogás se tomará como punto de inicio el año 2010, el área de confinamiento del periodo 2004 al 2010 los desechos sólidos ya no generan algún tipo de subproducto y las celdas ya han sido cerradas, según la tabla 28.

Tabla 28. Cantidad de RSU ingresados anualmente al relleno sanitario de Ambato

| Años actuales | RSU [ton] | Años proyectados | RSU [ton] |
|----------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| 2010 | 85 348 | 2021 | 104 292 |
| 2011 | 87 070 | 2022 | 106 014 |
| 2012 | 88 792 | 2023 | 107 737 |
| 2013 | 90 514 | 2024 | 109 459 |
| 2014 | 92 243 | 2025 | 111 181 |
| 2015 | 97 087 | 2026 | 112 903 |
| 2016 | 92 444 | 2027 | 114 626 |
| 2017 | 92 976 | 2028 | 116 218 |
| 2018 | 103 638 | | |
| 2019 | 102 372 | | |
| 2020 | 101 062 | | |

Fuente: Autor

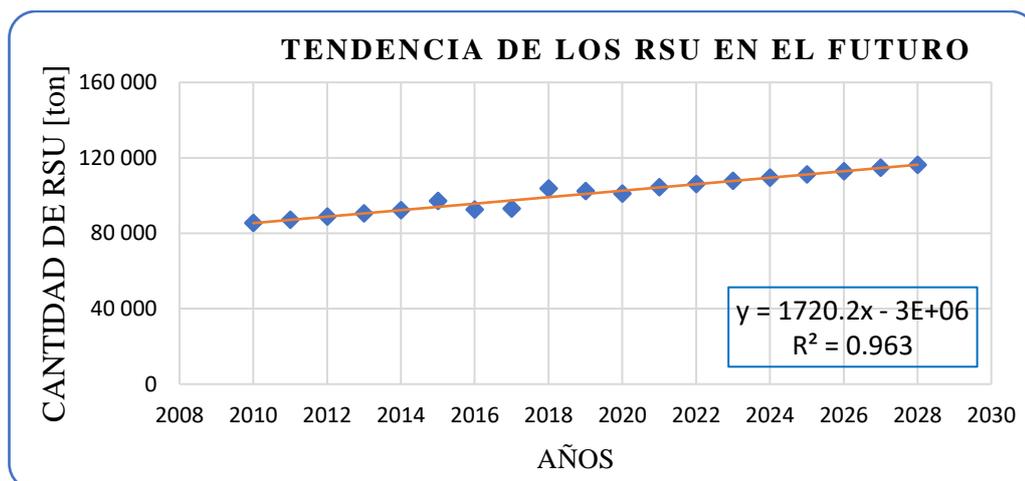


Figura 32. Tendencia de los RSU en el futuro

Fuente: Autor

Análisis. La cantidad de los RSU generados en la ciudad de Ambato continuará con una tendencia lineal, incrementado la cantidad de RSU en un 2% anualmente.

3.2. Caracterización de los residuos sólidos del cantón Ambato

En el estudio de caracterización y producción per cápita de los residuos sólidos municipales del cantón Ambato, se muestra la caracterización y cuantificación de los residuos sólidos generados en zonas residenciales, comerciales, de barrido, de mercados, industriales y hospitalarios de la ciudad de Ambato [33].

Tabla 29. Composición de los residuos sólidos generados en el cantón Ambato [33]

| Categoría | Porcentaje % |
|-------------------------------------|--------------|
| Orgánicos de cocina | 36.55 |
| No identificados | 11.52 |
| Textiles | 10.98 |
| Rechazo (papel higiénico, pañales) | 10.08 |
| Otros con porcentajes menores al 3% | 9.94 |
| Papel | 5.96 |
| Fundas plásticas | 4.69 |
| Orgánicos de jardín | 4.48 |
| Cartón | 3.26 |

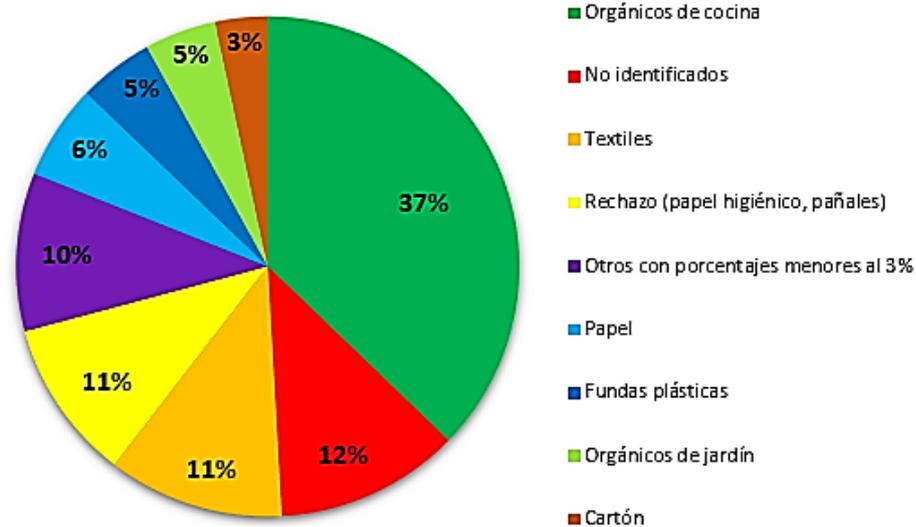


Figura 33. Caracterización de los residuos sólidos del cantón Ambato

Fuente: Autor

3.3. Estimación de producción de biogás modelo LandGEM

Como se aprecia en la figura 34, el flujo estimado de producción de biogás va incrementando su valor desde su inicio en el año de estudio con 934.24 m³/h, hasta llegar a su punto máximo de producción en el año 2029 con 1 229.52 m³/h, posteriormente comienza un descenso, disminuyendo la producción de biogás debido a que el cierre estimado del relleno sanitario de Ambato se prevé para el año 2028.

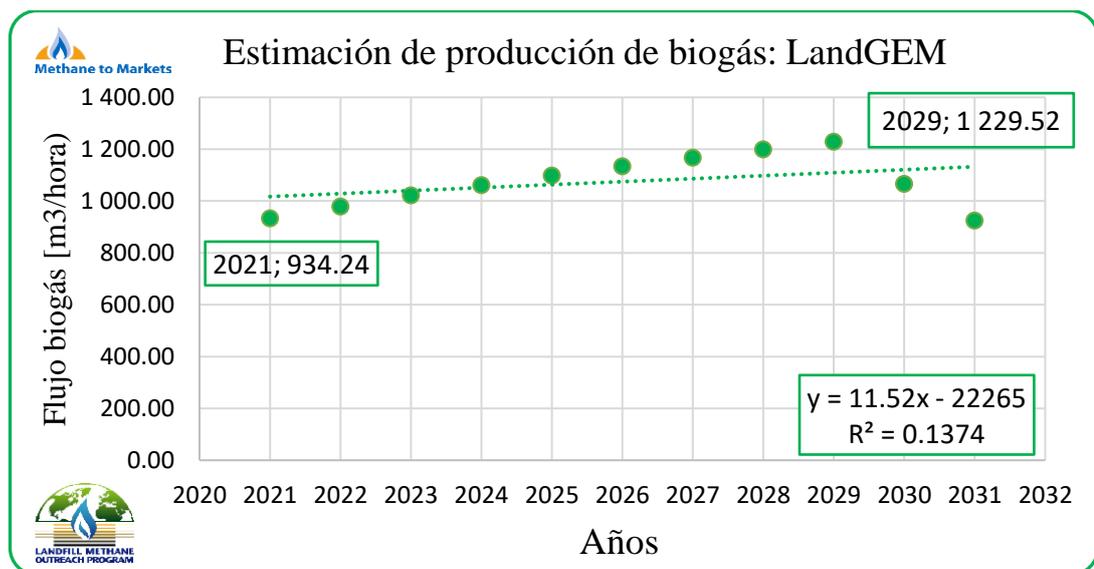


Figura 34. Estimación de producción de biogás: LandGEM

Fuente: Autor

Tabla 30. Resultados de la estimación de producción de gas de vertedero modelo LandGEM

| ESTIMATED LANDFILL GAS PRODUCTION: LANDGEM MODEL | | | | | | | | | | |
|--|----------------|----------------|--------------------|---------------|-----------|-----------|--------------|-----------|----------------|--------------|
| COMPLEJO AMBIENTAL CHASINATO RELLENO SANITARIO DE AMBATO | | | | | | | | | | |
| Year | Waste Accepted | Waste-In-Place | Total landfill gas | | | Methane | | | Carbon dioxide | |
| | (ton/año) | (ton) | (ton/año) | (m3/año) | (m3/hora) | (ton/año) | (m3/año) | (m3/hora) | (ton/año) | (m3/año) |
| 2021 | 104 293 | 1 033 551 | 10 220.32 | 8 183 955.27 | 934.24 | 2 729.96 | 4 091 977.64 | 467.12 | 7 490.36 | 4 091 977.64 |
| 2022 | 106 015 | 1 137 844 | 10 721.16 | 8 585 005.32 | 980.02 | 2 863.74 | 4 292 502.66 | 490.01 | 7 857.42 | 4 292 502.66 |
| 2023 | 107 737 | 1 243 859 | 11 186.31 | 8 957 478.09 | 1 022.54 | 2 987.98 | 4 478 739.04 | 511.27 | 8 198.33 | 4 478 739.04 |
| 2024 | 109 459 | 1 351 596 | 11 620.50 | 9 305 156.60 | 1 062.23 | 3 103.96 | 4 652 578.30 | 531.12 | 8 516.54 | 4 652 578.30 |
| 2025 | 111 182 | 1 461 055 | 12 027.82 | 9 631 322.94 | 1 099.47 | 3 212.76 | 4 815 661.47 | 549.73 | 8 815.06 | 4 815 661.47 |
| 2026 | 112 904 | 1 572 237 | 12 411.84 | 9 938 825.01 | 1 134.57 | 3 315.34 | 4 969 412.50 | 567.28 | 9 096.50 | 4 969 412.50 |
| 2027 | 114 626 | 1 685 141 | 12 775.63 | 10 230 133.41 | 1 167.82 | 3 412.51 | 5 115 066.71 | 583.91 | 9 363.12 | 5 115 066.71 |
| 2028 | 116 219 | 1 799 767 | 13 121.88 | 10 507 392.00 | 1 199.47 | 3 504.99 | 5 253 696.00 | 599.74 | 9 616.88 | 5 253 696.00 |
| 2029 | 0 | 1 915 986 | 13 450.60 | 10 770 619.72 | 1 229.52 | 3 592.80 | 5 385 309.86 | 614.76 | 9 857.80 | 5 385 309.86 |
| 2030 | 0 | 1 915 986 | 11 670.03 | 9 344 818.61 | 1 066.76 | 3 117.19 | 4 672 409.31 | 533.38 | 8 552.84 | 4 672 409.31 |
| 2031 | 0 | 1 915 986 | 10 125.17 | 8 107 763.27 | 925.54 | 2 704.54 | 4 053 881.63 | 462.77 | 7 420.63 | 4 053 881.63 |
| 2032 | 0 | 1 915 986 | 8 784.81 | 7 034 467.75 | 803.02 | 2 346.52 | 3 517 233.88 | 401.51 | 6 438.29 | 3 517 233.88 |
| 2033 | 0 | 1 915 986 | 7 621.89 | 6 103 253.75 | 696.72 | 2 035.89 | 3 051 626.88 | 348.36 | 5 586.00 | 3 051 626.88 |
| 2034 | 0 | 1 915 986 | 6 612.91 | 5 295 312.69 | 604.49 | 1 766.38 | 2 647 656.34 | 302.24 | 4 846.53 | 2 647 656.34 |
| 2035 | 0 | 1 915 986 | 5 737.50 | 4 594 325.85 | 524.47 | 1 532.55 | 2 297 162.92 | 262.23 | 4 204.95 | 2 297 162.92 |
| 2036 | 0 | 1 915 986 | 4 977.98 | 3 986 134.76 | 455.04 | 1 329.67 | 1 993 067.38 | 227.52 | 3 648.31 | 1 993 067.38 |
| 2037 | 0 | 1 915 986 | 4 319.00 | 3 458 455.25 | 394.80 | 1 153.65 | 1 729 227.63 | 197.40 | 3 165.35 | 1 729 227.63 |
| 2038 | 0 | 1 915 986 | 3 747.26 | 3 000 629.29 | 342.54 | 1 000.93 | 1 500 314.65 | 171.27 | 2 746.32 | 1 500 314.65 |
| 2039 | 0 | 1 915 986 | 3 251.20 | 2 603 409.76 | 297.19 | 868.43 | 1 301 704.88 | 148.60 | 2 382.77 | 1 301 704.88 |
| 2040 | 0 | 1 915 986 | 2 820.81 | 2 258 773.64 | 257.85 | 753.47 | 1 129 386.82 | 128.93 | 2 067.34 | 1 129 386.82 |

Fuente: Autor

3.4. Estimación de producción de biogás modelo ecuatoriano

Los resultados del modelo ecuatoriano son más alentadores que el modelo LandGEM, según la figura 35, en el año de estudio se tiene una producción estimada de biogás de 1 112.73 m³/h, mientras que para el año 2029 su valor máximo será de 1 633.54 m³/h.

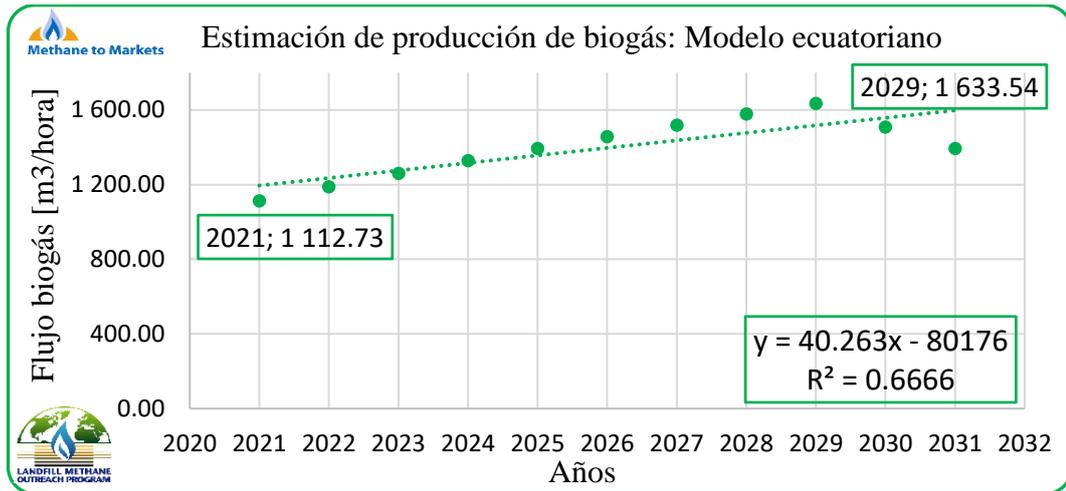


Figura 35. Estimación de producción de biogás: Modelo ecuatoriano

Fuente: Autor

El modelo ecuatoriano también proporciona la estimación de la recuperación de biogás según la eficiencia del sistema seleccionada, en la figura 36, la recuperación con pozos de venteo pasivos tendrá su valor máximo en el año 2028 con 946 m³/h, luego decae súbitamente a cero debido a que las operaciones del relleno sanitario han sido cerradas.

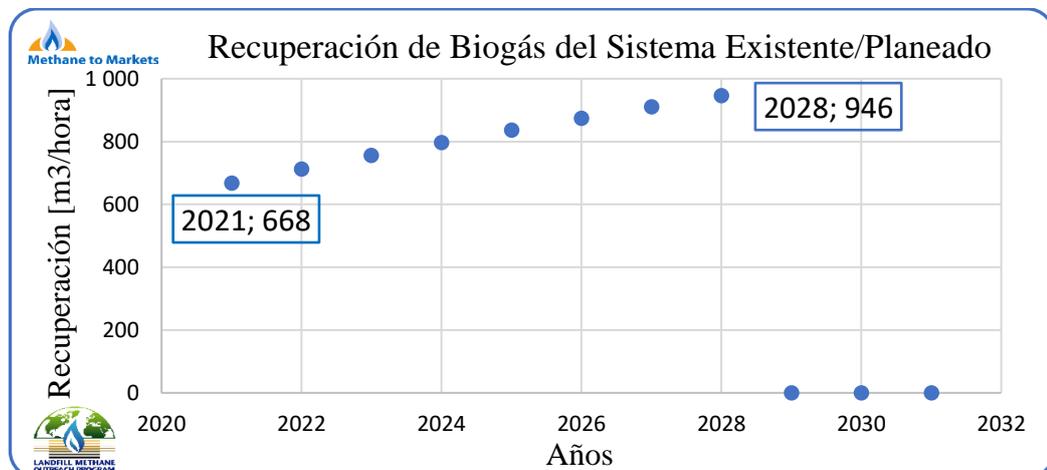


Figura 36. Estimación de la recuperación de biogás del sistema existente

Fuente: Autor

Tabla 31. Resultados de la estimación de producción de gas de vertedero modelo ecuatoriano

| PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS: MODELO ECUATORIANO | | | | | | | | |
|---|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|---|-----------|
| COMPLEJO AMBIENTAL CHASINATO RELLENO SANITARIO DE AMBATO | | | | | | | | |
| Año | Índice de disposición | Toneladas acumuladas | Generación de biogás | | Generación de metano | | Recuperación de Biogás del Sistema Existente/Planeado | |
| | (ton/año) | (ton) | (m3/año) | (m3/hora) | (m3/año) | (m3/hora) | (m3/min) | (m3/hora) |
| 2021 | 104 293 | 1 137 844 | 9 747 502.48 | 1 112.73 | 4 873 751.24 | 556.36 | 11.1 | 668 |
| 2022 | 106 015 | 1 243 859 | 10 399 197.76 | 1 187.12 | 5 199 598.88 | 593.56 | 11.9 | 712 |
| 2023 | 107 737 | 1 351 596 | 11 023 925.74 | 1 258.44 | 5 511 962.87 | 629.22 | 12.6 | 755 |
| 2024 | 109 459 | 1 461 055 | 11 623 759.79 | 1 326.91 | 5 811 879.89 | 663.46 | 13.3 | 796 |
| 2025 | 111 182 | 1 572 237 | 12 200 613.70 | 1 392.76 | 6 100 306.85 | 696.38 | 13.9 | 836 |
| 2026 | 112 904 | 1 685 141 | 12 756 254.39 | 1 456.19 | 6 378 127.20 | 728.10 | 14.6 | 874 |
| 2027 | 114 626 | 1 799 767 | 13 292 312.70 | 1 517.39 | 6 646 156.35 | 758.69 | 15.2 | 910 |
| 2028 | 116 219 | 1 915 986 | 13 810 294.31 | 1 576.52 | 6 905 147.15 | 788.26 | 15.8 | 946 |
| 2029 | 0 | 1 915 986 | 14 309 851.41 | 1 633.54 | 7 154 925.71 | 816.77 | 0 | 0 |
| 2030 | 0 | 1 915 986 | 13 209 657.75 | 1 507.95 | 6 604 828.88 | 753.98 | 0 | 0 |
| 2031 | 0 | 1 915 986 | 12 194 051.00 | 1 392.01 | 6 097 025.50 | 696.01 | 0 | 0 |
| 2032 | 0 | 1 915 986 | 11 256 527.81 | 1 284.99 | 5 628 263.90 | 642.50 | 0 | 0 |
| 2033 | 0 | 1 915 986 | 10 391 084.82 | 1 186.20 | 5 195 542.41 | 593.10 | 0 | 0 |
| 2034 | 0 | 1 915 986 | 9 592 180.26 | 1 095.00 | 4 796 090.13 | 547.50 | 0 | 0 |
| 2035 | 0 | 1 915 986 | 8 854 698.39 | 1 010.81 | 4 427 349.20 | 505.41 | 0 | 0 |
| 2036 | 0 | 1 915 986 | 8 173 916.83 | 933.10 | 4 086 958.41 | 466.55 | 0 | 0 |
| 2037 | 0 | 1 915 986 | 7 545 476.24 | 861.36 | 3 772 738.12 | 430.68 | 0 | 0 |
| 2038 | 0 | 1 915 986 | 6 965 352.46 | 795.13 | 3 482 676.23 | 397.57 | 0 | 0 |
| 2039 | 0 | 1 915 986 | 6 429 830.71 | 734.00 | 3 214 915.36 | 367.00 | 0 | 0 |
| 2040 | 0 | 1 915 986 | 5935481.83 | 677.57 | 2 967 740.92 | 338.78 | 0 | 0 |

Fuente: Autor

3.5. Tasa de metano contenida en el landfill gas por medición *in-situ*

Las tasas de metano que están emitiendo los pozos de las zonas 1 y 2 fueron obtenidas por medio de una medición *in-situ*, las tasas volumétricas y los compuestos del biogás que identificó el equipo ÓPTIMA7 Biogás se muestran en la tabla 32.

Tabla 32. Resultados de medición *in-situ*

| Zona 1 | | | | | Zona 2 | | | | |
|-------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Pozo | CH ₄ [%vol] | CO ₂ [%vol] | O ₂ [%vol] | PCS [MJ/m ³] | Pozo | CH ₄ [%vol] | CO ₂ [%vol] | O ₂ [%vol] | PCS [MJ/m ³] |
| 1 | 17.28 | 11.64 | 14.41 | 6.9 | 1 | 39.73 | 27.03 | 5.77 | 15.8 |
| 2 | 16.47 | 11.42 | 14.44 | 6.6 | 2 | 26.45 | 21.46 | 11.27 | 10.5 |
| 3 | 0.20 | 0 | 20.36 | 0.1 | 3 | 25.96 | 20.91 | 11.41 | 10.3 |
| 4 | 20.53 | 13.87 | 12.77 | 8.2 | 4 | 25.58 | 20.55 | 11.18 | 10.2 |
| 5 | 20.77 | 14.13 | 12.35 | 8.3 | 5 | 45.80 | 30.11 | 3.94 | 18.2 |
| 6 | 21.14 | 14.29 | 12.82 | 8.4 | 6 | 29.32 | 25.30 | 8.57 | 11.7 |
| 7 | 20.50 | 13.78 | 13.59 | 8.2 | 7 | 25.02 | 20.31 | 10.50 | 10 |
| 8 | 4.01 | 3.63 | 18.25 | 1.6 | 8 | 34.93 | 24.93 | 7.15 | 13.9 |
| 9 | 0.61 | 0.14 | 20.26 | 0.2 | 9 | 39.13 | 26.78 | 5.93 | 15.6 |
| 10 | 39.82 | 27.15 | 5.89 | 15.7 | 10 | 32.41 | 27.22 | 8.69 | 12.9 |
| 11 | 11.81 | 8.20 | 16.06 | 4.4 | 11 | 38.69 | 26.31 | 6.97 | 15.5 |
| 12 | 10.93 | 6.79 | 17.05 | 4.3 | 12 | 35.60 | 25.91 | 7.43 | 14.2 |
| 13 | 2.07 | 1.00 | 19.77 | 0.8 | 13 | 38.24 | 26.50 | 8.74 | 15.4 |
| 14 | 17.41 | 11.83 | 14.49 | 6.9 | 14 | 34.20 | 29.29 | 11.98 | 13.8 |
| 15 | 0.15 | 0 | 20.36 | 0.1 | 15 | 30.58 | 26.17 | 9.14 | 12.1 |
| 16 | 17.98 | 11.76 | 14.24 | 7 | 16 | 41.86 | 28.56 | 4.25 | 16.2 |
| 17 | 10.94 | 6.68 | 17.20 | 4.2 | 17 | 45.03 | 29.76 | 4.41 | 18 |
| 18 | 40.24 | 28.01 | 5.66 | 16.1 | | | | | |
| 19 | 36.88 | 25.08 | 7.98 | 14.8 | | | | | |
| 20 | 38.53 | 26.23 | 8.40 | 15.4 | | | | | |
| Prom | 17.41 | 11.78 | 14.32 | 6.91 | Prom | 34.62 | 25.71 | 8.08 | 13.8 |

Fuente: Autor

Los resultados de la tabla 32 evidencian una mayor tasa de metano en la zona 2 que en la zona 1, debido a que en la zona 1 ya han sido consumidos los sustratos de alto contenido energético por biodegradación, mientras que en la zona 2 se están ejecutando las operaciones de disposición final de los RSU actualmente.

3.6. Estimación de producción de biogás modelo ecuatoriano modificado

Con la tasa promedio de metano de 34.62% de la zona 2 se le modificó al modelo ecuatoriano obteniendo los siguientes resultados, en el año de estudio se tiene una producción estimada de biogás de 1 607 m³/h, mientras que para el año 2029 su valor máximo será de 2 359 m³/h.

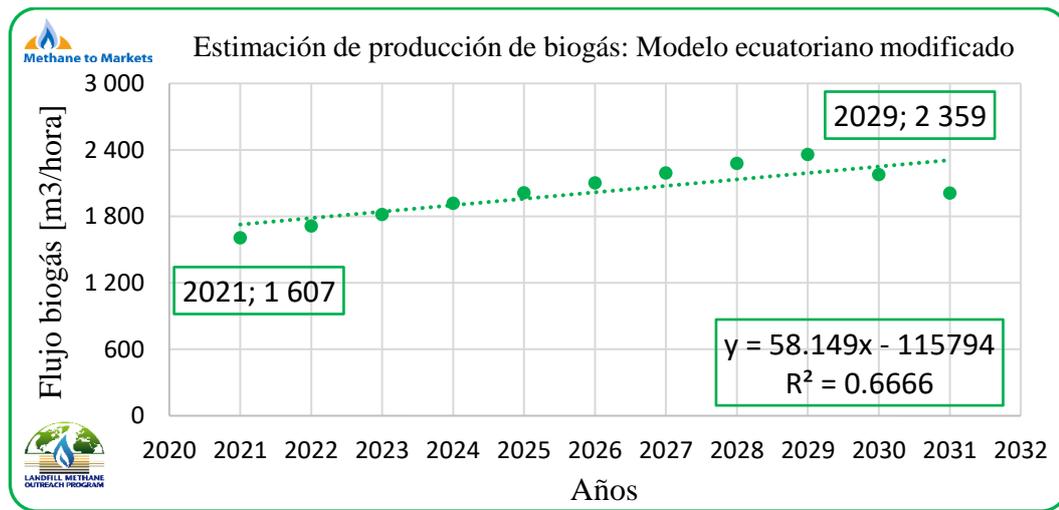


Figura 37. Estimación de producción de biogás: Modelo ecuatoriano modificado

Fuente: Autor

La recuperación de biogás según la eficiencia del sistema de recuperación de pozos de venteo pasivos, el sistema actual que posee el relleno sanitario de Ambato, refleja un valor máximo para el año 2028 de 1 366 m³/h que se podría recuperar de biogás.

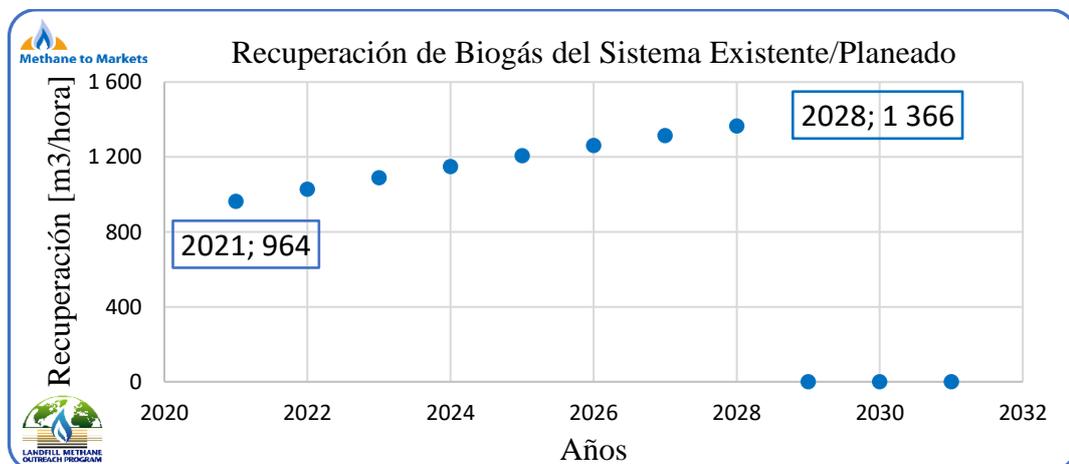


Figura 38. Estimación de la recuperación de biogás del sistema existente

Fuente: Autor

Tabla 33. Resultados de la estimación de producción de gas de vertedero modelo ecuatoriano modificado

| PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS: MODELO ECUATORIANO CON TASA DE METANO MEDIDA <i>in-situ</i> | | | | | | | | |
|---|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|---|------------------------|
| COMPLEJO AMBIENTAL CHASINATO RELLENO SANITARIO DE AMBATO | | | | | | | | |
| Año | Índice de disposición | Toneladas acumuladas | Generación de biogás | | Generación de metano | | Recuperación de Biogás del Sistema Existente/Planeado | |
| | (ton/año) | (ton) | (m ³ /año) | (m ³ /hora) | (m ³ /año) | (m ³ /hora) | (m ³ /min) | (m ³ /hora) |
| 2021 | 104 293 | 1 137 844 | 14 077 848.76 | 1 607 | 4 873 751.24 | 556.36 | 16.1 | 964 |
| 2022 | 106 015 | 1 243 859 | 15 019 060.89 | 1 715 | 5 199 598.88 | 593.56 | 17.1 | 1 029 |
| 2023 | 107 737 | 1 351 596 | 15 921 325.45 | 1 818 | 5 511 962.87 | 629.22 | 18.2 | 1 091 |
| 2024 | 109 459 | 1 461 055 | 16 787 636.90 | 1 916 | 5 811 879.89 | 663.46 | 19.2 | 1 150 |
| 2025 | 111 182 | 1 572 237 | 17 620 759.24 | 2 012 | 6 100 306.85 | 696.38 | 20.1 | 1 207 |
| 2026 | 112 904 | 1 685 141 | 18 423 244.36 | 2 103 | 6 378 127.20 | 728.10 | 21.0 | 1 262 |
| 2027 | 114 626 | 1 799 767 | 19 197 447.57 | 2 191 | 6 646 156.35 | 758.69 | 21.9 | 1 315 |
| 2028 | 116 219 | 1 915 986 | 19 945 543.48 | 2 277 | 6 905 147.15 | 788.26 | 22.8 | 1 366 |
| 2029 | 0 | 1 915 986 | 20 667 029.77 | 2 359 | 7 154 925.71 | 816.77 | 0.0 | 0 |
| 2030 | 0 | 1 915 986 | 19 078 073.01 | 2 178 | 6 604 828.88 | 753.98 | 0.0 | 0 |
| 2031 | 0 | 1 915 986 | 17 611 281.05 | 2 010 | 6 097 025.50 | 696.01 | 0.0 | 0 |
| 2032 | 0 | 1 915 986 | 16 257 261.42 | 1 856 | 5 628 263.90 | 642.50 | 0.0 | 0 |
| 2033 | 0 | 1 915 986 | 15 007 343.77 | 1 713 | 5 195 542.41 | 593.10 | 0.0 | 0 |
| 2034 | 0 | 1 915 986 | 13 853 524.35 | 1 581 | 4 796 090.13 | 547.50 | 0.0 | 0 |
| 2035 | 0 | 1 915 986 | 12 788 414.78 | 1 460 | 4 427 349.20 | 505.41 | 0.0 | 0 |
| 2036 | 0 | 1 915 986 | 11 805 194.73 | 1 348 | 4 086 958.41 | 466.55 | 0.0 | 0 |
| 2037 | 0 | 1 915 986 | 10 897 568.22 | 1 244 | 3 772 738.12 | 430.68 | 0.0 | 0 |
| 2038 | 0 | 1 915 986 | 10 059 723.36 | 1 148 | 3 482 676.23 | 397.57 | 0.0 | 0 |
| 2039 | 0 | 1 915 986 | 9 286 295.08 | 1 060 | 3 214 915.36 | 367.00 | 0.0 | 0 |
| 2040 | 0 | 1 915 986 | 8 572 330.78 | 979 | 2 967 740.92 | 338.78 | 0.0 | 0 |

Fuente: Autor

3.7. Comparación de los resultados de los modelos LandGEM, ecuatoriano y ecuatoriano modificado

Los modelos aplicados presentan variaciones en la estimación de producción de biogás, la figura 39 expone el comportamiento del flujo de biogás de los tres modelos.

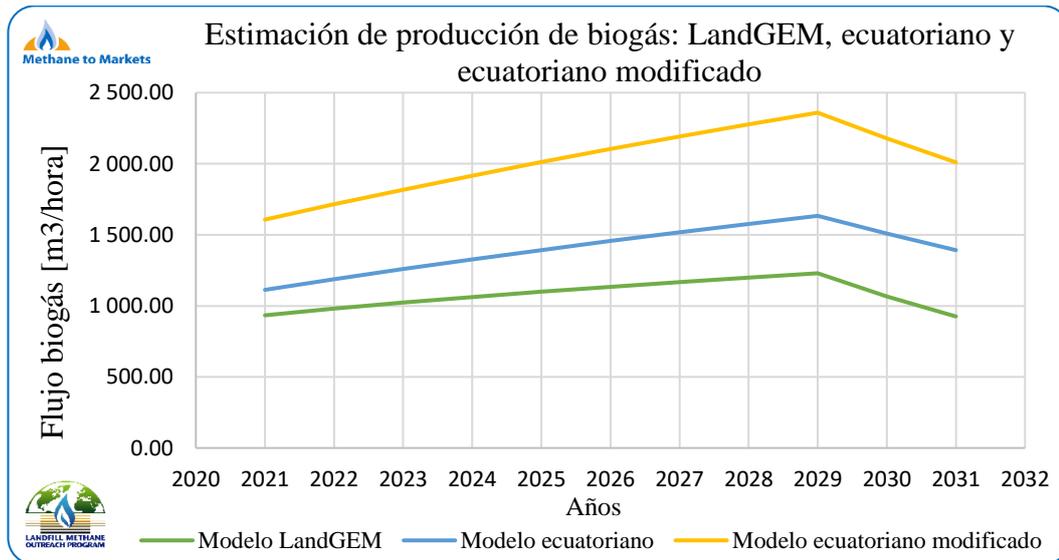


Figura 39. Generación de biogás respecto al modelo LandGEM, ecuatoriano y ecuatoriano modificado

Fuente: Autor

Análisis. El modelo ecuatoriano modificado presenta una mayor cantidad de flujo de biogás estimada, mientras que el de menor flujo es el modelo LandGEM, para determinar el flujo de biogás con el que se trabajará se realiza un promedio de los tres modelos por posibles márgenes de errores, entonces para el año de estudio se tiene un promedio de producción de biogás de:

$$Q_{prom} = \left(\frac{934.24 + 1112.73 + 1607}{3} \right) = 1218 \frac{m^3}{h}$$

3.8. Determinación del caudal de biogás recuperable

La recuperación de biogás se calcula mediante la ecuación 7. De la tabla 21 se selecciona una eficiencia del 30% como un escenario menos favorable, el caudal recuperable para el año 2021 queda establecido así:

$$Q_{b.r} = 1\,218 \frac{m^3}{h} \cdot 8\,760 h \cdot 0.30 = 3\,200\,904 \frac{m^3}{año}$$

De igual manera se considera un promedio de la tasa de metano utilizada en los tres modelos, para seleccionar un poder calorífico superior de la tabla 32 en base a la tasa promedio de metano calculada.

$$Tasa CH_4 = \left(\frac{0.50 + 0.50 + 0.3462}{3} \right) = 44.9 \%CH_4 \rightarrow PCS = 18 MJ/m^3$$

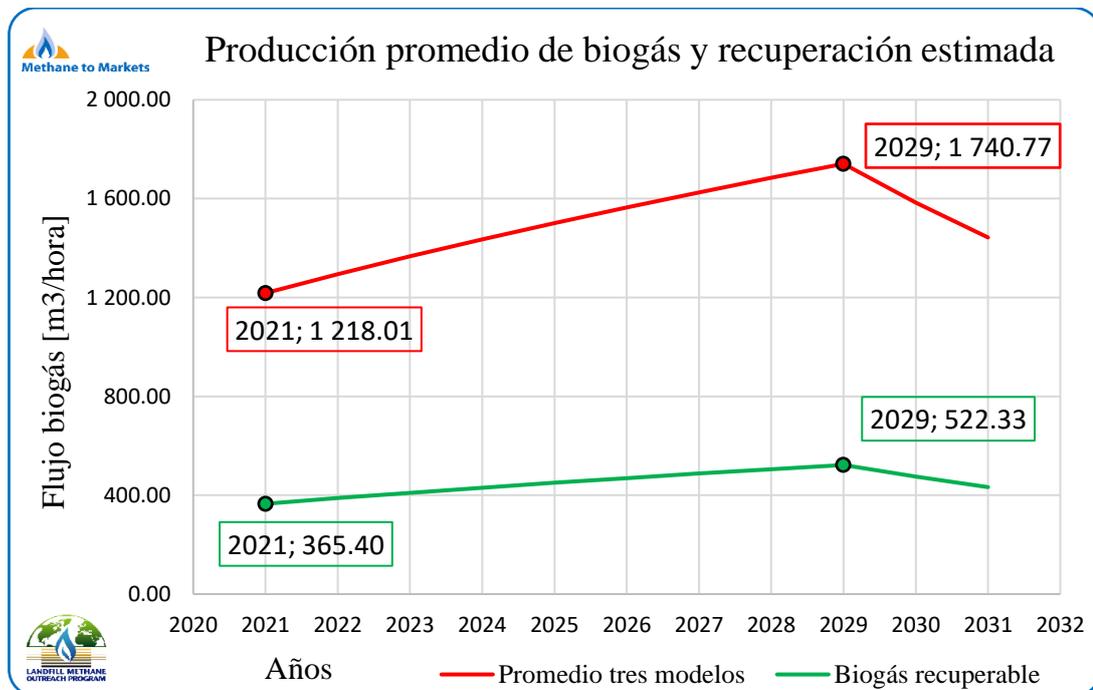


Figura 40. Producción promedio de biogás y recuperación estimada

Fuente: Autor

Análisis. Se muestra el promedio de producción de biogás de los modelos LandGEM, ecuatoriano y ecuatoriano modificado. Para el año 2021 se tiene una producción promedio de biogás de 1 218.01 m³/h, con un valor máximo en el año 2029 de 1 740.77 m³/h. La recuperación de biogás estimada con una baja eficiencia del 30% para el año de estudio es de 365.40 m³/h y para el año 2029 se podría recuperar 522.33 m³/h de biogás en el relleno sanitario de Ambato.

Tabla 34. Estimación de producción y recuperación promedio de gas de vertedero modelo LandGEM, ecuatoriano y ecuatoriano modificado

| Producción promedio de biogás y recuperación estimada | | | | | | | | |
|--|-----------------------|----------------------------------|---|------------------------------|--|---------------------------|------------------|---|
| Año | Biogás LandGEM | Biogás modelo ecuatoriano | Biogás modelo ecuatoriano modificado | Promedio tres modelos | Metano contenido en el promedio de biogás | Biogás recuperable | | Metano contenido en el biogás recuperado |
| | <i>(m3/hora)</i> | <i>(m3/hora)</i> | <i>(m3/hora)</i> | <i>(m3/hora)</i> | <i>(m3/hora)</i> | <i>(m3/año)</i> | <i>(m3/hora)</i> | <i>(m3/hora)</i> |
| 2021 | 934.24 | 1 112.73 | 1 607.06 | 1 218.01 | 546.89 | 3 200 930.65 | 365.40 | 164.07 |
| 2022 | 980.02 | 1 187.12 | 1 714.50 | 1 293.88 | 580.95 | 3 400 326.40 | 388.17 | 174.29 |
| 2023 | 1 022.54 | 1 258.44 | 1 817.50 | 1 366.16 | 613.41 | 3 590 272.93 | 409.85 | 184.02 |
| 2024 | 1 062.23 | 1 326.91 | 1 916.40 | 1 435.18 | 644.40 | 3 771 655.33 | 430.55 | 193.32 |
| 2025 | 1 099.47 | 1 392.76 | 2 011.50 | 1 501.24 | 674.06 | 3 945 269.59 | 450.37 | 202.22 |
| 2026 | 1 134.57 | 1 456.19 | 2 103.11 | 1 564.62 | 702.52 | 4 111 832.38 | 469.39 | 210.75 |
| 2027 | 1 167.82 | 1 517.39 | 2 191.49 | 1 625.57 | 729.88 | 4 271 989.37 | 487.67 | 218.96 |
| 2028 | 1 199.47 | 1 576.52 | 2 276.89 | 1 684.29 | 756.25 | 4 426 322.98 | 505.29 | 226.87 |
| 2029 | 1 229.52 | 1 633.54 | 2 359.25 | 1 740.77 | 781.61 | 4 574 750.09 | 522.23 | 234.48 |
| 2030 | 1 066.76 | 1 507.95 | 2 177.86 | 1 584.19 | 711.30 | 4 163 254.94 | 475.26 | 213.39 |
| 2031 | 925.54 | 1 392.01 | 2 010.42 | 1 442.66 | 647.75 | 3 791 309.53 | 432.80 | 194.33 |
| 2032 | 803.02 | 1 284.99 | 1 855.85 | 1 314.62 | 590.27 | 3 454 825.70 | 394.39 | 177.08 |
| 2033 | 696.72 | 1 186.20 | 1 713.17 | 1 198.69 | 538.21 | 3 150 168.23 | 359.61 | 161.46 |
| 2034 | 604.49 | 1 095.00 | 1 581.45 | 1 093.65 | 491.05 | 2 874 101.73 | 328.09 | 147.31 |
| 2035 | 524.47 | 1 010.81 | 1 459.86 | 998.38 | 448.27 | 2 623 743.90 | 299.51 | 134.48 |
| 2036 | 455.04 | 933.10 | 1 347.62 | 911.92 | 409.45 | 2 396 524.63 | 273.58 | 122.84 |
| 2037 | 394.80 | 861.36 | 1 244.01 | 833.39 | 374.19 | 2 190 149.97 | 250.02 | 112.26 |
| 2038 | 342.54 | 795.13 | 1 148.37 | 762.01 | 342.14 | 2 002 570.51 | 228.60 | 102.64 |
| 2039 | 297.19 | 734.00 | 1 060.08 | 697.09 | 312.99 | 1 831 953.55 | 209.13 | 93.90 |
| 2040 | 257.85 | 677.57 | 978.58 | 638.00 | 286.46 | 1 676 658.63 | 191.40 | 85.94 |

Fuente: Autor

3.9. Determinación del potencial de energía eléctrica anual

De las alternativas de aprovechamiento planteadas en la tabla 27 se obtiene una eficiencia del 83.2%, la energía eléctrica disponible anual que podría tener el relleno sanitario de Ambato para el año 2021 se calcula con la ecuación 8.

$$E. disp = 3\,200\,904 \frac{m^3}{año} \cdot 0.449 \cdot 18 \frac{MJ}{m^3} \cdot \frac{0.28 kWh}{1 MJ} \cdot 0.832 = 6\,026.60 \frac{MWh}{año}$$

3.10. Determinación de caudales y potenciales energéticos aprovechables

La implementación de cualquier equipo para el aprovechamiento energético por biogás queda determinada por el caudal recuperado de biogás y la tasa de metano contenida en el biogás recuperado, en la tabla 35 se muestra los caudales y potenciales aprovechables para el año 2021 según los resultados de la tabla 34.

Tabla 35. Caudal y energía aprovechable de biogás para el año 2021

| Biogás del relleno sanitario de Ambato | Caudal [m ³ /h] | Consideraciones | PCS | | Energía [kW] |
|---|----------------------------|---|----------------------|-------------------------|--------------|
| | | | [MJ/m ³] | [kWh / m ³] | |
| Landfill gas generado | 1 218.01 | Promedio de producción de biogás tres modelos | | | |
| Metano generado | 546.89 | 44.9% del landfill gas generado | | | |
| Landfill gas recuperado | 365.40 | 30% del promedio de landfill gas generado | 8.08 | 2.24 | 820 |
| Metano obtenido del landfill gas recuperado | 164.07 | 44.9% del landfill gas recuperado | 18 | 5 | 820 |

Fuente: Autor

La potencia disponible del landfill gas recuperado del relleno sanitario de Ambato es de 820 kW, esta es la potencia que se podrá suministrar al grupo electrógeno y así poder generar energía térmica o eléctrica.

3.11. Equipos para transformación energética

3.11.1. Motogenerador G3406 de CATERPILLAR

Tabla 36. Resumen de las características del motogenerador G3406 [37]

| Alimentación | Biogás, gas natural |
|---------------------------|---------------------|
| Potencia eléctrica [kW] | 235 |
| Potencia introducida [kW] | 630 |
| Rendimiento eléctrico % | 37.3 |
| Frecuencia | 60 Hz |

3.11.2. Cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS de AB ENERGY

Tabla 37. Resumen de las características del cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS [38]

| Alimentación | Landfill gas |
|--|--------------|
| Potencia eléctrica [kW] | 499 |
| Potencia introducida [kW] | 1 344 |
| Recuperación total en H ₂ O caliente [kW] | 610 |
| Rendimiento eléctrico % | 37.1 |
| Rendimiento térmico % | 46 |
| Rendimiento total % | 83.1 |

3.11.3. Sistema radiante SRII 21 de INDELCASA

Tabla 38. Resumen de las características del sistema radiante SRII 21 [39]

| Alimentación | Gas natural |
|---|-------------|
| Potencia nominal PCI [kW] | 6.20 |
| Consumo gas natural [m ³ /h] | 0.66 |
| Potencia de entrada [kW] | 6.68 |
| Presión de alimentación [mbar] | 20 |
| Rendimiento % | 93 |

3.11.4. Datos técnicos adicionales de alternativas de equipos para aprovechamiento energético de landfill gas

Tabla 39. Equipos para transformación energética [37], [38], [39]

| Marca | Modelo | Imagen | Tipo de combustible | Aplicación | Potencia Eléctrica [kW] | Niveles de emisiones | Eficiencia total % | Procedencia |
|----------------------------|----------------|---|---------------------|---|-------------------------|---|--------------------|-------------|
| Motogenerador CATERPILLAR | G3406 |  | Biogás, gas natural | Energía eléctrica | 235 | 21.44 g/bhp-h | 83.5 | U.S.A. |
| Cogenerador AB ENERGY | ECOMAX5 BIOGÁS |  | Landfill gas | Energía eléctrica + Calentamiento de agua | 499 | 500 mg/m ³ NO _x referidos al 5% de O ₂ | 83.1 | México |
| Sistema radiante INDELCASA | SRII 21 |  | Gas natural | Calefacción de espacios interiores | 6.20 | No | 93 | España |

Fuente: Autor

3.12. Parámetros para selección de alternativas

Los parámetros de selección se relacionan con características técnicas de funcionamiento y son: efecto ambiental y mantenimiento.

Tabla 40. Parámetro de selección de equipos para transformación energética

| Alternativa | Marca | Modelo | Imagen | Nivel de tratamiento del gas combustible | Nivel de emisiones NOx | Eficiencia total | Mantenimiento requerido | Potencia útil |
|-------------|----------------------------|----------------|--|--|--------------------------------|------------------|-------------------------|---------------|
| 1 | Motogenerador CATERPILLAR | G3406 |  | Tratamiento parcial | Alto | 83.5 | Media frecuencia | Alta |
| 2 | Cogenerador AB ENERGY | ECOMAX5 BIOGÁS |  | No requiere | Medio | 83.1 | Baja frecuencia | Alta |
| 3 | Sistema radiante INDELCASA | SRII 21 |  | Elevado tratamiento | No genera emisiones relevantes | 93 | Alta frecuencia | Baja |

Fuente: Autor

3.13. Ponderación de parámetros para selección de alternativas de aprovechamiento energético

Tabla 41. Ponderación de alternativas de aprovechamiento energético

| Alternativa | Marca | Modelo | Imagen | Nivel de tratamiento del gas combustible | Nivel de emisiones NOx | Eficiencia total | Mantenimiento requerido | Potencia útil | Resultados |
|-------------|----------------------------|----------------|---|--|------------------------|------------------|-------------------------|---------------|------------|
| 1 | Motogenerador CATERPILLAR | G3406 |  | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 9 |
| 2 | Cogenerador AB ENERGY | ECOMAX5 BIOGÁS |  | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 12 |
| 3 | Sistema radiante INDELCASA | SRII 21 |  | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 9 |

Fuente: Autor

Resultado. Al evaluar los parámetros de selección con características técnicas, se cuantificó que la alternativa 2, el equipo de AB ENERGY ECOMAX5 BIOGÁS de cogeneración, es el más versátil al proporcionar energía eléctrica y térmica, además, opera con una alimentación de combustible de bajo nivel de tratamiento, produce un nivel medio de emisión de gases por combustión y su mantenimiento es de baja frecuencia.

3.14. Evaluación técnica de la aplicación de la alternativa seleccionada de aprovechamiento energético

Tabla 42. Análisis energético del cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS

| Alimentación | Landfill gas |
|--|--------------|
| Potencia eléctrica máxima [kW] | 499 |
| Potencia introducida [kW] | 1 344 |
| Recuperación total en H ₂ O caliente [kW] | 610 |
| Rendimiento eléctrico % | 37.1 |
| Rendimiento térmico % | 46 |
| Rendimiento total % | 83.1 |
| Disponibilidad energética para el año 2021 | |
| Caudal disponible del landfill gas [m ³ /h] | 320.65 |
| Potencia disponible del landfill gas [kW] | 820 |
| Capacidad de carga % | 61 |
| Potencia eléctrica producida [kW], al 61% | 304 |
| Recuperación total en H ₂ O caliente [kW], al 61% | 372 |
| Disponibilidad energética para el año 2029 | |
| Caudal disponible del landfill gas [m ³ /h] | 522.23 |
| Potencia disponible del landfill gas [kW] | 1180.23 |
| Capacidad de carga % | 88 |
| Potencia eléctrica producida [kW], al 88% | 438 |
| Recuperación total en H ₂ O caliente [kW], al 88% | 536.8 |

Fuente: Autor

Análisis. Para el año 2021 el equipo ECOMAX5 BIOGÁS podrá producir 304 kW de potencia eléctrica y 372 kW de energía térmica para calentamiento de agua con el 61% de su capacidad, mientras que para el año 2029 podría generar 438 kW de potencia eléctrica y 536.8 kW de potencia térmica para calentamiento de agua para usos en procesos industriales todo esto al 88% de capacidad.

3.15. Diagrama de Sankey para aprovechamiento energético en cogeneración, año 2021

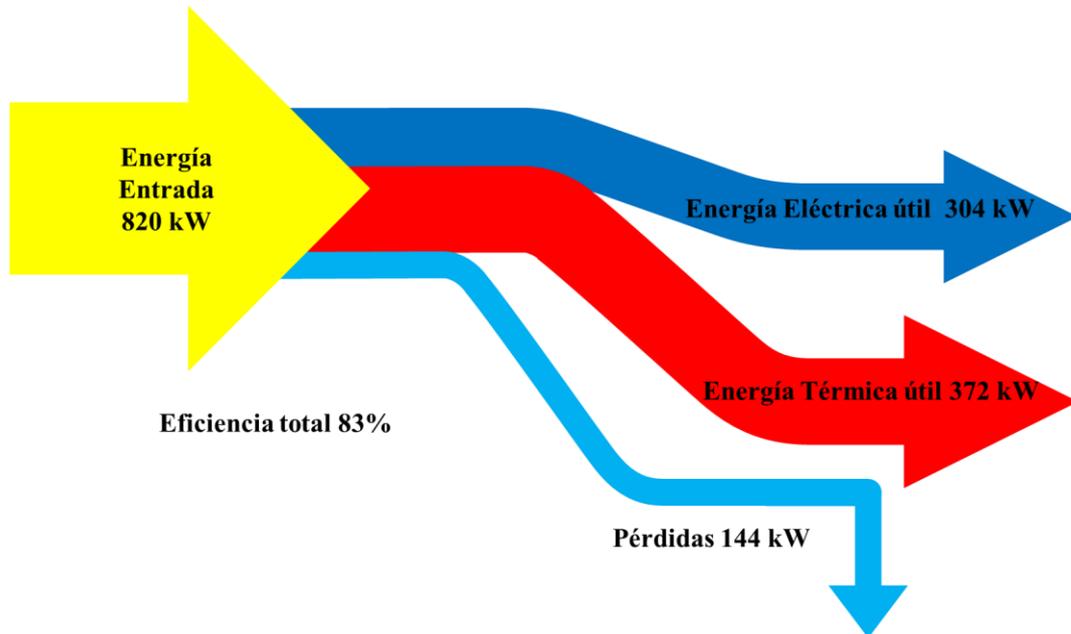


Figura 41. Diagrama de Sankey de energía útil y pérdidas del cogenerador ECOMAX5

Fuente: Autor

3.16. Diagrama de Sankey para aprovechamiento energético en cogeneración, año 2029

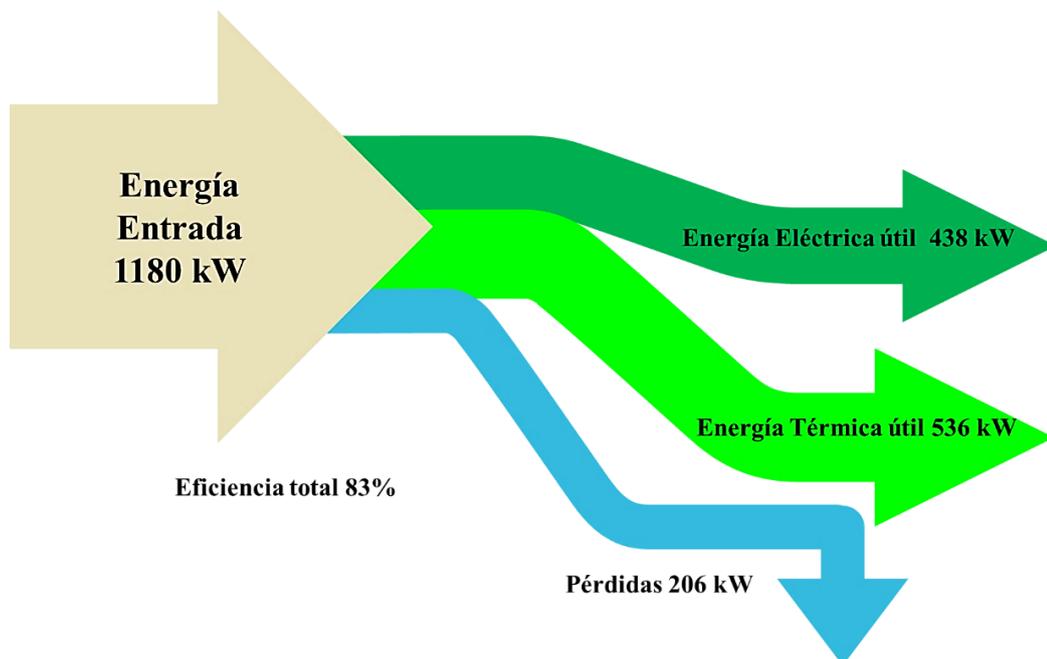


Figura 42. Diagrama de Sankey de energía útil y pérdidas del cogenerador ECOMAX5

Fuente: Autor

3.17. Análisis de producción de energía eléctrica

Tabla 43. Análisis de producción de energía eléctrica ECOMAX5 BIOGÁS

| Año 2021 | |
|---|------------|
| Potencia eléctrica producida [kW], al 61% | 304 |
| Horas de operación diarias | 12 |
| Producción de energía diaria [kWh] | 3 648 |
| Producción de energía mes [kWh] | 109 440 |
| Producción de energía año [MWh] | 1 313 |
| Precio de venta del MWh | \$ 85 |
| Ingresos por producción de energía al año | \$ 111 605 |
| Año 2029 | |
| Potencia eléctrica producida [kW], al 84% | 438 |
| Horas de operación diarias | 12 |
| Producción de energía diaria [kWh] | 5 256 |
| Producción de energía mes [kWh] | 157 680 |
| Producción de energía año [MWh] | 1 892 |
| Precio de venta del MWh | \$ 85 |
| Ingresos por producción de energía al año | \$ 160 833 |

Fuente: Autor

Análisis. Con una posible operación de 12 horas diarias en el año 2021 el equipo ECOMAX5 BIOGÁS produciría energía eléctrica de 109 440 kWh al mes y esto al año produciría 1 313 MWh, generando beneficios económicos de \$ 111 605 dólares anual con un precio del kWh comercial en Ecuador de \$ 0.085 por kWh.

Para el año 2029 la producción eléctrica al mes sería de 157 680 kWh con 12 horas de operación, mientras que la energía eléctrica anual sería de 1 892 MWh y generaría \$ 160 833 dólares anuales.

3.18. Análisis de producción de agua caliente para procesos industriales

Tabla 44. Análisis de producción de agua caliente para procesos industriales ECOMAX5 BIOGÁS

| Año 2021 | |
|--|---------|
| Recuperación total en H ₂ O caliente [kW], al 61% | 372 |
| Variación de temperatura del agua, [°C] | 20 |
| Calor específico a presión constante [kJ/kg. °C] | 4.18 |
| Flujo másico de agua al calentarse, [kg/s] | 4.78 |
| Densidad del agua [kg/m ³] | 1000 |
| Caudal del agua a calentarse [m ³ /s] | 0.00478 |
| Caudal del agua a calentarse [m ³ /h] | 17.20 |
| Año 2029 | |
| Recuperación total en H ₂ O caliente [kW], al 88% | 536.8 |
| Variación de temperatura del agua, °C | 20 |
| Calor específico a presión constante [kJ/kg. °C] | 4.18 |
| Flujo másico de agua al calentarse, [kg/s] | 4.78 |
| Densidad del agua [kg/m ³] | 1000 |
| Caudal del agua a calentarse [m ³ /s] | 0.00478 |
| Caudal del agua a calentarse [m ³ /h] | 17.20 |

Fuente: Autor

La recuperación total en H₂O caliente de 372 kW que proporciona el equipo ECOMAX5 BIOGÁS garantiza que el flujo de masa del agua ingresado alcance una temperatura de 40 °C, esto para el período del 2021 y 2029. La energía térmica recuperada permitirá calentar menos masa en más temperatura y viceversa.

3.19. Aplicación de la energía eléctrica en iluminación de las zonas viales y en las zonas de disposición final de RSU en el relleno sanitario de Ambato

Tabla 45. Aplicación de la energía eléctrica producida en iluminación

| Año 2021 | |
|--|--------|
| Potencia eléctrica producida [kW], al 61% | 304 |
| Potencia eléctrica para iluminación [kW] | 100 |
| Potencia eléctrica para otros usos [kW] | 204 |
| Horas de operación diarias | 12 |
| Iluminación para zonas de disposición final | |
| Potencia eléctrica para iluminación [kW] | 50 |
| Potencia por reflector LED para exteriores [W] | 400 |
| Flujo luminoso [lm] | 48 000 |
| Ángulo de apertura | 30° |
| Nivel de iluminación requerido para exteriores [lx] | 50 |
| Área de iluminación por cada reflector LED [m ²] | 960 |
| Número total de reflectores LED para exteriores | 125 |
| Área exterior a iluminar zona 1 [ha] | 7.2 |
| Área exterior a iluminar zona 2 [ha] | 4.8 |
| Iluminación para trayectos viales | |
| Potencia eléctrica para iluminación [kW] | 50 |
| Potencia por iluminaria LED, [W] | 103 |
| Flujo luminoso [lm] | 12 406 |
| Nivel de iluminación requerido para exteriores [lx] | 100 |
| Área de iluminación por iluminaria LED [m ²] | 124 |
| Número total de iluminarias LED | 485 |

Fuente: Autor

Análisis. Se dispone de 100 kW de energía eléctrica para iluminación, 50 kW para reflectores exteriores LED de 400W que podrán iluminar 4.8 hectáreas de la zona 1 y 7.2 hectáreas de la zona 2, mientras que para iluminar las zonas viales se considera 50 kW usados en iluminarias LED de 103 W que podrán iluminar 124m² cada una. La disposición de las iluminarias exteriores se muestran en el anexo 2.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se estimó la producción promedio del biogás del relleno sanitario de Ambato, obteniendo que: para el modelo landGEM una producción estimada para el año 2021 de 934.24 m³/h, mientras que su máxima producción fue de 1 229.52 m³/h, para el modelo ecuatoriano se estimó un promedio de 1 112.73 m³/h llegando a un valor máximo de 1 633.54 m³/h y para el modelo ecuatoriano modificado se obtuvo 1 607 m³/h, con un valor máximo de 2 359 m³/h. Todos los modelos de estimación de producción de biogás utilizados reflejaron que se alcanzará una producción máxima estimada de biogás en el año 2029 y luego decaerá paulatinamente.
- Se cuantificó la tasa de metano del landfill gas del complejo Ambiental Chasinato por medio de una medición *in-situ* con analizador portátil de gases ÓPTIMA7 BIOGÁS en zonas que comprenden disposición final de RSU desde el año 2010 hasta la actualidad, en la zona 1 se analizaron los compuestos del landfill gas en 20 pozos, mientras que en la zona 2 fue de 17 pozos de venteo. Los resultados de la zona 1 no fueron alentadores por lo que se tomaron en cuenta como referencia a los de la zona 2 obteniendo así un promedio de 34.62% de CH₄, 25.71% de CO₂, 8.08% de O₂ y 13.8 MJ/m³ de poder calorífico superior.
- Se determinó el potencial de aprovechamiento energético del landfill gas en el complejo Ambiental Chasinato en base al promedio estimado del caudal recuperado de los tres modelos de estimación de biogás al no presentar resultados semejantes, teniendo así que el potencial que es capaz de generar el landfill gas es de 820 kW para el año 2021, alcanzando su potencial máximo en el año 2029 con una producción de 1 180 kW de energía. El biogás producido en el relleno sanitario de Ambato está compuesto principalmente de un promedio estimado de 44.9% de CH₄, 42% de CO₂ y el resto lo componen gases como el H₂S, O₂ e impurezas.

- Se planteó varias propuestas técnicas de aprovechamiento energético para equipos capaces de producir energía eléctrica y térmica con combustible de alimentación de landfill gas, biogás y gas natural, estos fueron motogeneradores, cogeneradores y sistemas radiantes para calefacción, la alternativa más versátil fue el cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS de AB ENERGY que funciona a landfill gas y es capaz de entregar una potencia eléctrica útil de 499 kW que podrían usarse en iluminación exterior vial y en zonas de disposición final, además recupera 610 kW en energía térmica para calentar agua y utilizarla en procesos industriales.
- Se analizó la producción de energía eléctrica que tendría la implementación del cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS en base al potencial de aprovechamiento energético que tiene el landfill gas, obteniendo que para el año 2021 se generaría 304 kW de potencia operando al 61% de carga, llegando a su producción máxima en el año 2029 con 438 kW al 84% de capacidad de carga. De igual manera los ingresos económicos que se tendrían por operar 12 horas diarias y con un precio comercial del kWh en Ecuador de \$ 0.085 es de: \$ 111 605 dólares para el año 2021 y para el año 2029 de \$ 160 833.
- La generación y calidad del biogás residual producido en el relleno sanitario de Ambato se da principalmente por las toneladas de RSU depositadas ahí y que para el año 2021 serán de 104 292 toneladas según lo proyectado, también otro punto relevante es el contenido de residuos orgánicos, que basados en la caracterización de los RSU que se producen en Ambato estos fueron del 36.55% un valor bajo al ser considerada Tungurahua zona agrícola.

4.2. Recomendaciones

- Es importante aplicar más de un modelo de estimación de producción de biogás en rellenos sanitarios, pues los resultados varían debido a que en la mayoría de casos, los ajustes que se les hace a los modelos en base al país de origen para el cual fue diseñado son distintos, la composición de los RSU cambia según su procedencia, habrá lugares donde el contenido de residuos orgánicos sea mayor y lugares donde

los productos sean industrializados encareciendo su potencial de biodegradación y de generación de biogás.

- Durante una medición de campo de los compuestos gaseosos que componen al biogás de un relleno sanitario es imprescindible utilizar un equipo que esté totalmente calibrado, promoviendo una buena lectura y análisis del gas medido, de igual manera es importante efectuar la medición en condiciones de cámara cerrada evitando así que el aire se incorpore al biogás y altere su composición en niveles altos de CO₂. Además el uso de máscara de vapores y de elementos de protección personal protegerán al individuo de los posibles riesgos de exposición al biogás y de quemaduras.
- No todos los pozos emitieron una tasa de metano significativa, pues el biogás pudo haber quedado atrapado en el interior del relleno sanitario por obstrucciones en la tubería o por deformaciones de la misma, esto causa filtraciones hacia el exterior, generando contaminación ambiental y mal olor. En una futura instalación de una planta de aprovechamiento energético del landfill gas, se aconseja perforar nuevos pozos de recolección de biogás aumentando la eficiencia de recuperación existente que tienen los pozos de venteo pasivos que es del 30% y reduciendo las emisiones de GEI emitidos a la atmósfera.
- La situación del relleno sanitario de Ambato refleja un buen trabajo de disposición final de los desechos sólidos que llegan ahí desde las zonas rurales y urbanas de todo el cantón Ambato. Dado al incremento de la cantidad de los residuos sólidos urbanos, la Empresa Pública Municipal GIDSA deberá seguir motivando e incentivando la integración de barrios, unidades educativas, locales comerciales y personas a un reciclaje inclusivo, promoviendo la reducción, reutilización y al reciclaje de los desechos sólidos. Esto aumentará la capacidad de confinamiento que tiene el relleno sanitario al controlar y evitar el incremento de RSU anuales.
- Sería fundamental continuar este proyecto desarrollando la factibilidad técnica necesaria para el cálculo y diseño de los sistemas para extracción, captación y tratamiento del biogás producido en el relleno sanitario de Ambato.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. S. Flechas, “Estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento y/o destrucción térmica del biogás del relleno sanitario Doña Juana en Bogotá D.C, aplicando el mecanismo de desarrollo limpio del protocolo de Kyoto”, de *Tesis de pregrado*, Bogotá, Colombia, 2006.
- [2] L. A. Crisanto, “Estudio de prefactibilidad para implementar una central eléctrica aprovechando el biogás generado por el relleno sanitario el Inga”, de *Tesis de pregrado*, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2013.
- [3] E. D. Albán Castellanos, “Evaluación del potencial energético de la producción de biogás en el relleno sanitario del cantón Salcedo durante el año 2015, propuesta para un aprovechamiento sostenible”, de *Tesis de maestría*, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, 2016.
- [4] Glen Madrigal Pérez, Juan José Quispe Saavedra y Yoel Vargas Huamán, “Cálculo de la generación de biogás para el relleno sanitario de la ciudad de Juliaca, utilizando el modelo LandGEM Versión 3.02 de la USEPA y estimación del potencial de producción eléctrica”, *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, vol. 4, no. 2, pp. 42-55, 2018.
- [5] J. Olmedo y J. Curillo, “Valoración de la producción de energía eléctrica a partir del biogás que se genera en el relleno sanitario Ceibales de la ciudad de Machala”, de *Tesis de pregrado*, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2019.
- [6] Pablo Emilio García Escamilla, “Eficiencia y confiabilidad de modelos de estimación de biogás en rellenos sanitarios”, *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 29, no. 1, pp. 32-44, 2019.
- [7] Bertha Ibarra López, Mariana Narváez Castro y Andrés de la Rosa, “Análisis de la disposición y generación de biogás en el relleno sanitario de Ambato, Ecuador”, *AIDIS: Revista de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, vol. 13, no. 3, pp. 988-1006, dic. 2020.
- [8] Landfill Methane Outreach Program, *LFG Energy Project Development Handbook*. Washington, USA: U.S. EPA LMOP, 2020.

- [9] Constitución de la República del Ecuador, Asamblea Constituyente. Montecristi, Ecuador, 2008.
- [10] Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Toda una Vida. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo – Senplades. Quito, Ecuador, 2017.
- [11] Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA). Título y artículo agregados por Decreto Ejecutivo No. 1589. Quito, Ecuador, 2003.
- [12] J. García Alcalde, “Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica a partir de biogás producido en rellenos sanitarios en Chile”, de *Tesis de pregrado*, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile, 2019.
- [13] E. Röben, “Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales”, Deutscher Entwicklungsdienst/Ilustre Municipalidad de Loja, Ecuador, 2002.
- [14] Guía para la Implementación, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios. Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 1ra versión, La Paz, Bolivia, 2010.
- [15] J. García, A. Amell y H. Burbano, “Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano-hidrógeno con respecto al metano”, *Redalyc: Ingeniería y Desarrollo*, vol. 1, no. 20, pp. 19-34, 2006.
- [16] S. Castro, “Diseño de una planta de producción de biogás para el GAD de Salcedo”, de *Tesis de pregrado*, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2020.
- [17] G. Asensio *et al.*, “Instalación de una planta de producción de energía eléctrica a partir de biogás de relleno sanitario”, de *Tesis de pregrado*, Instituto Tecnológico de Buenos Aires – ITBA, Buenos Aires, Argentina. 2019.
- [18] D. Chérrez, “Los desechos sólidos y su incidencia en el medio ambiente del cantón Cevallos provincia de Tungurahua”, de *Tesis de pregrado*, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2011.
- [19] E. Suquillo y J. Tercero, “Estudio de prefactibilidad para cubrir la demanda de energía eléctrica que requiere la población de Itulcachi (parque industrial) a partir de generación eléctrica mediante energía renovable”, de *Tesis de pregrado*, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2016.

- [20] G. Nicola, “Diseño del sistema de recogida, tratamiento y eliminación de residuos sólidos para poblaciones de la zona alta del cantón Ambato, República del Ecuador”, de *Tesis de maestría*, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2017.
- [21] S. González, “Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: Análisis de variables y modelización”, de *Tesis doctoral*, Universidad de Oviedo, Gijón, España, 1997.
- [22] V. Vásquez, “Sistema de tratamiento de desechos biodegradables para generación de biogás en la finca “San José” del cantón Shushufindi”, de *Tesis de pregrado*, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2011.
- [23] V. León y A. Plaza, “Análisis de la gestión de los residuos sólidos en el cantón Balzar - Provincia del Guayas”, de *Tesis de pregrado*, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [24] S. Miranda, “Producción de metano a partir de biomasa residual pecuaria enriquecida con desecho de cultivo de fresa (*Fragaria ananassa*) en la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencias Agropecuarias”, de *Tesis de maestría*, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2020.
- [25] M. Varnero Moreno, “Manual de biogás”, [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>. [Accedido: 01-may-2021]
- [26] T. Carbone, L. Martínez y O. Sangermano, “Diseño de una planta de producción de biogás”, de *Tesis de pregrado*, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina, 2017.
- [27] U.S EPA. LandGEM, “Landfill gas emissions model version 3.02,” [Online]. Available: <https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302.xls>. [Accessed: Apr 02, 2021].
- [28] A. Alexander, C. Burklin y A. Singleton, “Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user’s guide,” U.S. EPA. Office of Research and Development, Washington, 2005.

- [29] C. Siliezar y R. Urquizo, “Ecuador landfill gas model version 1.0 user’s manual,” U.S. EPA. Carbon Trade Ltd Latin-American on behalf of Eastern Research Group, Washington, 2009.
- [30] Dräger. Tecnología para la vida, “Introducción a los sistemas de detección de gases”, [En línea]. Disponible en: https://www.draeger.com/Library/Content/9046703_infoflip_gds_es_13.pdf. [Accedido: 02-abr-2021]
- [31] Honorable Gobierno Provincial de Tungurahua, “Agenda Tungurahua 2019-2021”, [En línea]. Disponible en: http://www.tungurahua.gob.ec/images/archivos/transparencia/2020/Agenda_Tungurahua2019-2021.pdf. [Accedido: 01-jun-2021]
- [32] E. López, “Diseño de la planta de tratamiento para desechos sólidos de la ciudad de Ambato”, de *Tesis de maestría*, Universidad Internacional SEK Quito, 2016.
- [33] R. Vilches, “Caracterización y determinación de la producción per cápita de residuos sólidos generados en la ciudad de Ambato”, SOTAM, Quito, mar. 2016.
- [34] Climate-Data.ORG, “Ambato tabla climática”, [En línea]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-de-tungurahua/ambato-2957/>. [Accedido: 23-jun-2021]
- [35] Empresa Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos EMGIRS-EP, “Informe de rendición de cuentas 2020”, [En línea]. Disponible en: <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/component/phocadownload/category/113-rendicion-cuentas-2020.pdf>. [Accedido: 02-jul-2021]
- [36] Empresa Pública Municipal de Gestión Integral de Desechos Sólidos Ambato GIDSA-EPM, “Informe rendición de cuentas 2020”, [En línea]. Disponible en: <https://www.epmgidsa.gob.ec/inicio/wp-content/uploads/2021/05/INFORME-PRELIMINAR-FIRMADO-signed.pdf>. [Accedido: 02-jul-2021]
- [37] CATERPILLAR, “Grupos electrógenos de gas”, [En línea]. Disponible en: https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/electric-power/gas-generator-sets/18487651.html# [Accedido: 18-jul-2021]

[38] AB ENERGY, “Gama ECOMAX landfill gas”, [En línea]. Disponible en: <https://www.gruppoab.com/es/biogas/soluciones/ecomax/ecomax-landfill-gas/>
[Accedido: 18-jul-2021]

[39] Indelcasa, “Climatización industrial”, [En línea]. Disponible en: <https://www.indelcasa.es/informacion-tecnica/#307-393-panel-radiante-a-gas-srii>
[Accedido: 19-jul-2021]

ANEXOS

Anexo 1. Fotografías de medición de los compuestos del landfill gas *in-situ*.

Anexo 2. Plano topográfico del relleno sanitario de Ambato Complejo Ambiental Chasinato.

Anexo 3. Catálogo de analizador portátil de gases ÓPTIMA7 BIOGÁS.

Anexo 4. Catálogo del motogenerador CATERPILLAR G3604.

Anexo 5. Catálogo del Cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS de AB ENERGY.

Anexo 6. Catálogo del Sistema radiante SR11 21 de INDELCASA.

Anexo 7. Catálogo del proyector LED SYLVANIA 400W.

Anexo 8. Catálogo de iluminaria de calle LED SYLVANIA 103W.

Anexo 1.

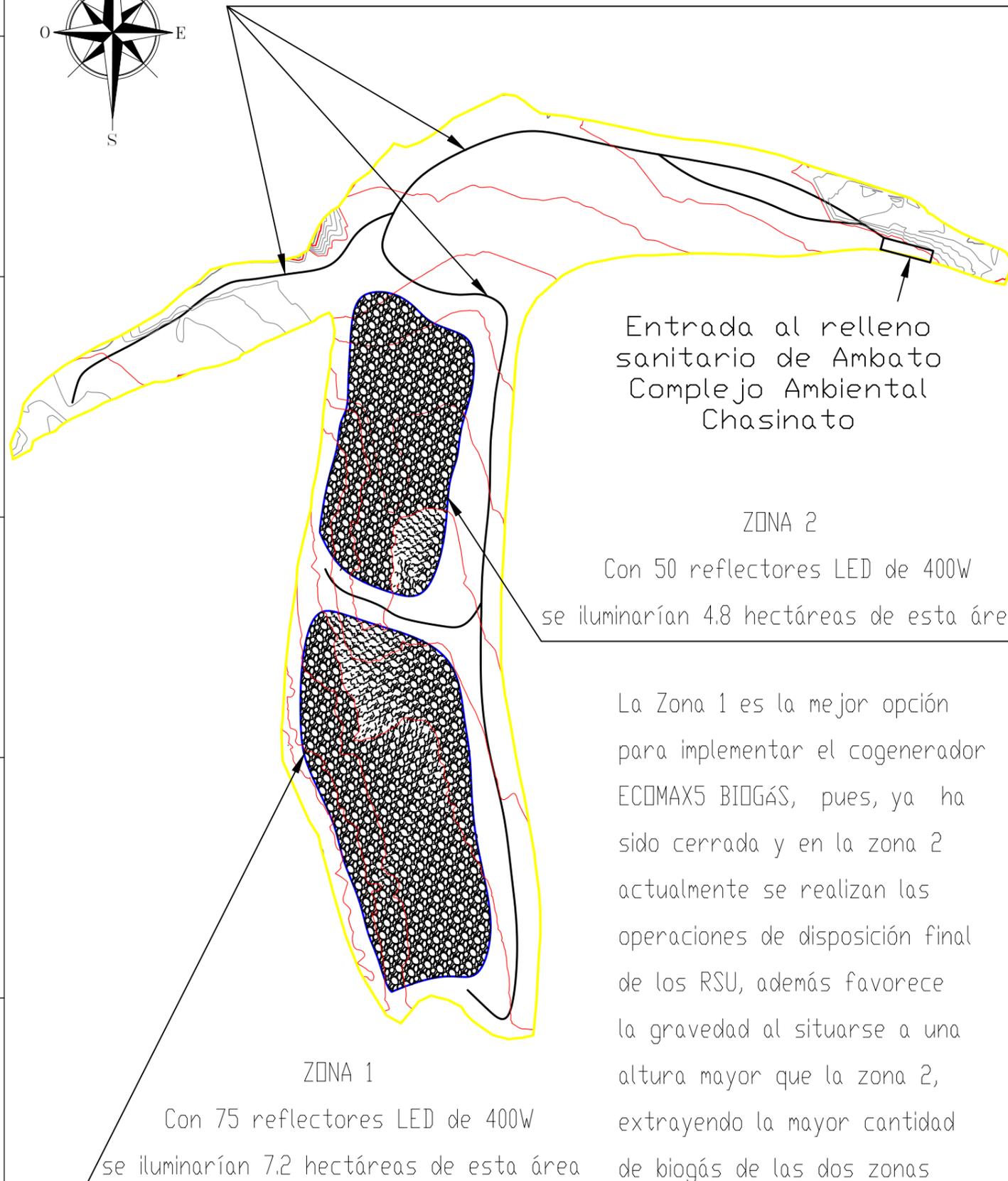
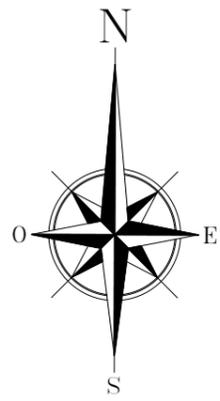
**Fotografías de
medición de la
composición del
landfill gas *in-situ***





**Anexo 2. Plano
topográfico del
relleno sanitario de
Ambato Complejo
Ambiental
Chasinato**

La iluminaria LED de 103W está destina a iluminar todos los trayectos viales de acceso a todo el relleno sanitario, se dispone de 485 iluminarias para iluminación vial, cada una abarca un área de 124 metros cuadrados y se estima cubrir todas las carreteras de tránsito del relleno sanitario



La Zona 1 es la mejor opción para implementar el cogenerador ECOMAX5 BIOGÁS, pues, ya ha sido cerrada y en la zona 2 actualmente se realizan las operaciones de disposición final de los RSU, además favorece la gravedad al situarse a una altura mayor que la zona 2, extrayendo la mayor cantidad de biogás de las dos zonas

| Iluminación para zonas de disposición final Zona 1 y Zona 2 | | Iluminación para trayectos viales | |
|--|--------|--|--------|
| Potencia eléctrica para iluminación [kW] | 50 | Potencia eléctrica para iluminación [kW] | 50 |
| Potencia por reflector para exteriores LED, [W] | 400 | Potencia por iluminaria LED, [W] | 103 |
| Flujo luminoso [lm] | 48 000 | Flujo luminoso [lm] | 12 406 |
| Ángulo de apertura | 30° | Nivel de iluminación requerido para exteriores [lx] | 100 |
| Nivel de iluminación requerido para exteriores [lx] | 50 | Área de iluminación por iluminaria LED [m ²] | 124 |
| Área de iluminación por cada reflector LED [m ²] | 960 | Número total de iluminarias LED | 485 |
| Número total de reflectores para exteriores LED | 125 | | |
| Área exterior a iluminar zona 1 [ha] | 7.2 | | |
| Área exterior a iluminar zona 2 [ha] | 4.8 | | |

| | | | |
|-------------------------------|-----------------------|---|-----------|
| TOLERANCIA: | PESO: | MATERIAL: | |
| FECHA: | NOMBRE: | TÍTULO: | ESCALA: |
| DIBUJÓ: 26/07/2021 | ANDRÉS GUEVARA TORRES | Disposición de iluminaria exterior en Relleno sanitario de Ambato | 1:2000 |
| REVISÓ: 27/07/2021 | ING. SANTIAGO CABRERA | | |
| APROBÓ: 27/07/2021 | ING. SANTIAGO CABRERA | | |
| U.T.A. INGENIERIA MECANICA | | N.º DE LÁMINA HOJA 1 DE 1 | REGISTRO: |
| EDICION: | MODIFICACION: | FECHA: | NOMBRE: |

**Anexo 3. Catálogo
de analizador
portátil de gases
ÓPTIMA7
BIOGÁS**



CH₄ | CO₂ | H₂S | O₂ | H₂ | N₂ | CO | NO | NO₂ | NO_x

OPTIMA7 Biogás

Profesional analizador portátil de biogás



Para medidas de control en plantas de biogás / biometano y vertederos.



OPTIMA7 Biogás

Dispositivo multifunción para mediciones rápidas de control

Con OPTIMA7 Biogás se puede realizar, además, la medición de la presión y temperatura del biogás, y la velocidad del flujo de gas con cálculo de caudal normalizado.

OPTIMA7 Biogás puede, con la configuración de sensor adecuada, medir también los gases de escape del motor CHP.

Ventajas especiales:

- Medición de biogás: CH₄, CO₂, O₂, H₂S
- Medición de gases de escape: O₂, CO₂, CO, NO, NO₂
- Medición del aire ambiente: CH₄ (LEL), H₂S
- Diferentes unidades de medida configurables por el usuario
- Navegación intuitiva del menú con teclas de función
- Carcasa reforzada con fibra de vidrio con imanes de sujeción
- Gran memoria de datos con interfaz a la App y software-PC
- Potente batería de Li-Ion para al menos 15 h de funcionamiento



OPTIMA7 Biogás

Datos técnicos



| Biogás/Biometano | Método de medición | Rango de medición mín./máx. | Resolución | Repetibilidad |
|---|--------------------|-----------------------------|-----------------------|---|
| Metano (CH ₄) | NDIR | 0 ... 100 % | 0,01 % | ± 0,3 % o 3 % de lectura* |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | NDIR | 0 ... 100 % | 0,01 % | ± 0,3 % o 3 % de lectura* |
| Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) | Electroquímico | 0 ... 2.000/5.000 ppm | 1 ppm | ± 5 ppm o 5 % (0 ... 500 ppm), 10 % (> 500 ppm) de lectura* |
| Oxígeno (O ₂) | Electroquímico | 0 ... 25 % | 0,01 % | ± 0,2 % absolute |
| Hidrógeno (H ₂) | Electroquímico | 0 ... 1.000/2.000 ppm | 1 ppm | ± 5 ppm o 5 % (0 ... 500 ppm), 10 % (> 500 ppm) de lectura* |
| Nitrógeno (N ₂) | Calculado | 0 ... 80 % | 1 % | |
| Valor calorífico (Hu) | Calculado | 0 ... 50 MJ/m ³ | 0,1 MJ/m ³ | |

| Gas de escape del motor (CHP) | Método de medición | Rango de medición mín./máx. | Resolución | Repetibilidad |
|--|--------------------|-----------------------------|------------|--|
| Oxígeno (O ₂) | Electroquímico | 0 ... 25 % | 0,01 % | ± 0,2 % abs. |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | NDIR | 0 ... 100 % | 0,01 % | ± 0,3 % o 3 % de lectura* |
| Monóxido de carbono (CO) | Electroquímico | 0 ... 4.000/10.000 ppm | 1 ppm | ± 10 ppm o 5 % (0 ... 4.000 ppm), 10 % (> 4.000 ppm) de lectura* |
| Monóxido nítrico (NO) | Electroquímico | 0 ... 1.000/5.000 ppm | 1 ppm | ± 5 ppm o 5 % (0 ... 1.000 ppm), 10 % (> 1.000 ppm) de lectura* |
| Dióxido nítrico (NO ₂) | Electroquímico | 0 ... 200/1.000 ppm | 1 ppm | ± 5 ppm o 5 % (0 ... 200 ppm), 10 % (> 200 ppm) de lectura* |
| Óxidos de nitrógeno (NO _x) | Calculado | 0 ... 5.000 ppm | 1 ppm | ± 5 ppm o 5 % (0 ... 1.000 ppm), 10 % (> 1.000 ppm) de lectura* |

| Gas de vertedero | Método de medición | Rango de medición mín./máx. | Resolución | Repetibilidad |
|---|--------------------|---------------------------------|-----------------------|---|
| Metano (CH ₄) | NDIR | 0 ... 100 % LEL | 0,01 % | ± 0,3 % o 3 % de lectura* |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | NDIR | 0 ... 100 % | 0,01 % | ± 0,3 % o 3 % de lectura* |
| Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) | Electroquímico | 0 ... 2.000/5.000 ppm | 1 ppm | ± 5 ppm o 5 % (0 ... 500 ppm), 10 % (> 500 ppm) de lectura* |
| Oxígeno (O ₂) | Electroquímico | 0 ... 25 % | 0,01 % | ± 0,2 % abs. |
| Hidrógeno (H ₂) | Electroquímico | 0 ... 1.000/2.000 ppm | 1 ppm | ± 5 ppm o 5 % (0 ... 500 ppm), 10 % (> 500 ppm) de lectura* |
| Nitrógeno (N ₂) | Calculado | 0 ... 80 % | 1 % | |
| Valor calorífico (Hu) | Calculado | 0 ... 50 MJ/m ³ | 0,1 MJ/m ³ | |
| Velocidad de flujo de gas | Sonda de tipo-S | 1 ... 200 m/s | 0,1 m/s | ± 0,2 m/s (2 ... 10 m/s), ± 0,5 % (> 10 m/s) |
| Flujo volumétrico | Calculado | 0,1 ... 6.000 m ³ /s | 0,1 m ³ /s | área de la sección transversal ajustable por el usuario |
| Temperatura diferencial | NiCrNi | -40 ... +1.200 °C | 1 °C | ± 2 °C, 0,5 % de lectura* |
| Presión diferencial | | ± 300 hPa | 0,01 hPa | 0,03 hPa, 1 % de lectura* |

| Datos técnicos generales | |
|--------------------------------|--|
| Condiciones de operación | +5 ... +45 °C; RH hasta 95% sin condensación |
| Temperatura de almacenamiento | -20 ... +50 °C |
| Almacenamiento de datos | 16.000 conjuntos de datos |
| Interfaz | Mini-USB, SD, IRDA, Bluetooth (transferencia de datos a Smartphone, Tablet o PC) |
| Fuente de alimentación interna | Batería Li-Ion |
| Fuente de alimentación externa | Unidad de enchufe de pared: 100 ... 240 Vac, 50 ... 60 Hz, 5 V DC, 1,2 A |
| Clase de protección | IP40 |
| Dimensiones (WxHxD) | 110 x 225 x 52 mm |
| Peso | aprox. 750 g |

MRU: Más de 35 años de Innovación en Análisis de Gases



MRU INSTRUMENTS S.L.

C/ Trinidad 32

Collado Villalba 28400 - Madrid

Tel 91 325 00 57 - 647 67 80 22

info@mruiberica.es · www.mruiberica.es

Representante de MRU:

**Anexo 4. Catálogo
del motogenerador
CATERPILLAR
G3604**

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO PARA G3406

ESPECIFICACIONES DEL GRUPO ELECTRÓGENO

| | |
|---------------------------------------|--|
| Clasificación máxima continua | 235 ekW |
| Tipo de combustible | Gas Natural, Biogás, Gas de Campo, Propano |
| Máxima eficiencia eléctrica | 37.30% |
| Clasificación máxima de espera | 260 |
| frecuencia | 50 o 60 Hz |
| Rpm | 1500 o 1800 rpm |

ESPECIFICACIONES DEL MOTOR

| | |
|------------------------|---------------------|
| aspiración | NA, TA |
| perforar | 5,4 pulgadas |
| Golpe | 6,5 pulgadas |
| desplazamiento | 891 in ³ |
| Modelo de motor | G3406 |

DIMENSIONES DEL GRUPO ELECTRÓGENO

| | |
|--------------------------------------|--------------|
| largura | 165 pulgadas |
| Ancho | 51 pulgadas |
| altura | 84 pulgadas |
| Peso seco - Grupo electrógeno | 9000 libras |

| | | | |
|----------------------------------|-----------|------------------------------|----------------------|
| ENGINE SPEED: | 1800 | FUEL: | NAT GAS |
| COMPRESSION RATIO: | 10.3:1 | FUEL SYSTEM: | LPG IMPCO |
| AFTERCOOLER - MAX. INLET (°F): | 130 | | |
| JACKET WATER - MAX. OUTLET (°F): | 210 | FUEL PRESS. RANGE (PSIG): | 1.5 - 5.0 |
| ASPIRATION: | TA | MIN. METHANE NUMBER: | 80 |
| COOLING SYSTEM: | JW+OC, AC | RATED ALTITUDE (FT): | 5000 |
| IGNITION SYSTEM: | CDIS | AT AIR TO TURBO. TEMP. (°F): | 77 |
| EXHAUST MANIFOLD: | WC | EXHAUST O2 EMISSION LEVEL: | 4.0 %O2 |
| COMBUSTION: | STANDARD | FUEL LHV (BTU/SCF): | 905 |
| | | APPLICATION: | STANDBY 60 Hz GENSET |

| RATING AND EFFICIENCY | | NOTES | LOAD | 100% | 75% | 50% |
|--------------------------|---------------------|------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| ENGINE POWER | (WITHOUT FAN) | (1) | BHP | 367 | 276 | 184 |
| GENERATOR POWER | (WITHOUT FAN) | (2) | EKW | 260 | 195 | 130 |
| ENGINE EFFICIENCY | (ISO 3046/1) | (3) | % | 35.1 | 33.2 | 30.3 |
| ENGINE EFFICIENCY | (NOMINAL) | (3) | % | 35.1 | 33.2 | 30.3 |
| THERMAL EFFICIENCY | (NOMINAL) | (4) | % | 48.4 | 50.9 | 55.7 |
| TOTAL EFFICIENCY | (NOMINAL) | (5) | % | 83.5 | 84.1 | 86.0 |

| ENGINE DATA | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| FUEL CONSUMPTION | (ISO 3046/1) | (6) | BTU/bhp-hr | 7252 | 7662 | 8411 |
| FUEL CONSUMPTION | (NOMINAL) | (6) | BTU/bhp-hr | 7252 | 7662 | 8411 |
| AIR FLOW (77 °F, 14.7 psi) | | (7) | SCFM | 593 | 459 | 320 |
| AIR FLOW | | (7) | lb/hr | 2628 | 2037 | 1418.00 |
| COMPRESSOR OUT PRESSURE | | | in. HG (abs) | 54.7 | 52.6 | 43.5 |
| COMPRESSOR OUT TEMPERATURE | | | °F | 253 | 228 | 181 |
| AFTERCOOLER AIR OUT TEMPERATURE | | | °F | 136 | 133 | 130 |
| INLET MAN. PRESSURE | | (8) | in. HG (abs) | 51.2 | 39.9 | 28.4 |
| INLET MAN. TEMPERATURE | (MEASURED IN PLENUM) | (9) | °F | 137 | 135 | 133 |
| TIMING | | (10) | °BTDC | 18 | 18 | 18 |
| EXHAUST STACK TEMPERATURE | | (11) | °F | 997 | 977 | 970 |
| EXHAUST GAS FLOW (@ stack temp.) | | (12) | CFM | 1773 | 1358 | 944 |
| EXHAUST MASS FLOW | | (12) | lb/hr | 2762 | 2143 | 1495 |

| EMISSIONS DATA | | | | | | |
|----------------------------------|--|------|----------|-------|-------|-------|
| NOx (as NO2) | | (13) | g/bhp-hr | 21.44 | 21.06 | 19.89 |
| CO | | (14) | g/bhp-hr | 1.14 | 1.13 | 2.1 |
| THC (molecular weight of 15.84) | | (14) | g/bhp-hr | 3.9 | 4.6 | 4.2 |
| NMHC (molecular weight of 15.84) | | (14) | g/bhp-hr | 0.59 | 0.69 | 0.63 |
| EXHAUST O2 | | (15) | % DRY | 4.0 | 3.7 | 2.8 |
| LAMBDA | | | | 1.23 | 1.20 | 1.14 |

| HEAT BALANCE DATA | | | | | | |
|--|--|-----------|---------|-------|-------|-------|
| LHV INPUT | | (16) | BTU/min | 44412 | 35192 | 25755 |
| HEAT REJECTION TO JACKET (JW) | | (17) (22) | BTU/min | 11479 | 10118 | 8700 |
| HEAT REJECTION TO ATMOSPHERE | | (18) | BTU/min | 1776 | 1408 | 1030 |
| HEAT REJECTION TO LUBE OIL (OC) | | (19) (22) | BTU/min | 1815 | 1600 | 1376 |
| HEAT REJECTION TO EXHAUST (LHV to 77°F) | | (20) | BTU/min | 12373 | 9506 | 6538 |
| HEAT REJECTION TO EXHAUST (LHV to 350°F) | | (20) | BTU/min | 8210 | 6179 | 4276 |
| HEAT REJECTION TO A/C (AC) | | (21) (23) | BTU/min | 1385 | 875 | 320 |

CONDITIONS AND DEFINITIONS

ENGINE RATING OBTAINED AND PRESENTED IN ACCORDANCE WITH ISO 3046/1STD. REF. CONDITIONS OF 77°F, 29.6 IN HG BAROMETRIC PRESSURE, 500 FT ALTITUDE). NO OVERLOAD PERMITTED AT RATING SHOWN. CONSULT ALTITUDE CHARTS FOR APPLICATIONS ABOVE MAXIMUM RATED ALTITUDE AND/OR TEMPERATURE.

EMISSION LEVELS ARE BASED ON THE ENGINE OPERATING AT STEADY STATE CONDITIONS. EMISSION TOLERANCES SPECIFIED ARE DEPENDANT UPON FUEL QUALITY. METHANE NUMBER CANNOT VARY MORE THAN ± 3. PUBLISHED PART LOAD DATA MAY REQUIRE ENGINE ADJUSTMENT.

ENGINE RATING IS WITH 2 ENGINE DRIVEN WATER PUMPS.

FOR NOTES INFORMATION CONSULT PAGE THREE.

| FUEL USAGE GUIDE | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|------|------|------|--------|
| CAT METHANE NUMBER | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85-100 |
| IGNITION TIMING | - | - | - | - | - | - | - | - | 15 | 16 | 18 | 18 |
| DERATION FACTOR | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

| ALTITUDE DERATION FACTORS | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| AIR TO TURBO (°F) | 130 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 0.95 | 0.91 | 0.88 | 0.84 | 0.81 | 0.78 | 0.75 | 0.72 | 0.69 |
| | 120 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.96 | 0.93 | 0.89 | 0.86 | 0.82 | 0.79 | 0.76 | 0.73 | 0.70 |
| | 110 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 0.94 | 0.91 | 0.87 | 0.84 | 0.80 | 0.77 | 0.74 | 0.71 |
| | 100 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.96 | 0.92 | 0.89 | 0.85 | 0.82 | 0.79 | 0.75 | 0.72 |
| | 90 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 0.94 | 0.90 | 0.87 | 0.83 | 0.80 | 0.77 | 0.74 |
| | 80 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 0.96 | 0.92 | 0.88 | 0.85 | 0.81 | 0.78 | 0.75 |
| | 70 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.97 | 0.94 | 0.90 | 0.86 | 0.83 | 0.80 | 0.76 |
| | 60 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 0.95 | 0.92 | 0.88 | 0.85 | 0.81 | 0.78 |
| | 50 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.97 | 0.94 | 0.90 | 0.86 | 0.83 | 0.79 |
| | | | 0 | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 7000 | 8000 | 9000 | 10000 | 11000 |

ALTITUDE (FEET ABOVE SEA LEVEL)

| AFTERCOOLER HEAT REJECTION FACTORS (ACHRF) | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| AIR TO TURBO (°F) | 130 | 1.54 | 1.64 | 1.75 | 1.86 | 1.97 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.08 |
| | 120 | 1.43 | 1.53 | 1.63 | 1.74 | 1.85 | 1.96 | 1.96 | 1.96 | 1.96 | 1.96 | 1.96 | 1.96 | 1.96 |
| | 110 | 1.32 | 1.42 | 1.52 | 1.62 | 1.73 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 |
| | 100 | 1.21 | 1.31 | 1.41 | 1.51 | 1.61 | 1.72 | 1.72 | 1.72 | 1.72 | 1.72 | 1.72 | 1.72 | 1.72 |
| | 90 | 1.10 | 1.19 | 1.29 | 1.39 | 1.49 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.60 | 1.60 |
| | 80 | 1.00 | 1.08 | 1.18 | 1.28 | 1.38 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 | 1.48 |
| | 70 | 1.00 | 1.00 | 1.06 | 1.16 | 1.26 | 1.36 | 1.36 | 1.36 | 1.36 | 1.36 | 1.36 | 1.36 | 1.36 |
| | 60 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.04 | 1.14 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.24 |
| | 50 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.02 | 1.12 | 1.12 | 1.12 | 1.12 | 1.12 | 1.12 | 1.12 | 1.12 |
| | | | 0 | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 7000 | 8000 | 9000 | 10000 | 11000 |

ALTITUDE (FEET ABOVE SEA LEVEL)

| FREE FIELD MECHANICAL & EXHAUST NOISE | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|
| 100% Load Data | | | dB(A) | | | | (dB) | | | | |
| Free Field Mechanical | DISTANCE FROM THE ENGINE (FEET) | 3.2 | 94.0 | 73.8 | 79.3 | 82.8 | 88.8 | 89.8 | 87.3 | 84.3 | 81.3 |
| | | 22.9 | 84.0 | 68.5 | 72.5 | 76.5 | 77.5 | 80.5 | 77.5 | 73.5 | 68.9 |
| | | 49.2 | 78.0 | 66.4 | 77.4 | 71.4 | 66.9 | 74.4 | 71.9 | 67.9 | 62.4 |
| Free Field Exhaust | DISTANCE FROM THE ENGINE (FEET) | 4.9 | 109.4 | 106.5 | 108.5 | 105.8 | 107.8 | 102.5 | 102.8 | 97.8 | 87.5 |
| | | 22.9 | 96.0 | 91.7 | 94.1 | 89.4 | 96.1 | 88.1 | 88.4 | 82.7 | 75.4 |
| | | 49.2 | 89.4 | 85.1 | 87.5 | 82.8 | 89.5 | 81.5 | 81.8 | 76.1 | 68.8 |
| Overall SPL | | | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1 kHz | 2 kHz | 4 kHz | 8 kHz | |

Octave Band Center Frequency (OBCF)

FUEL USAGE GUIDE:

This table shows the derate factor required for a given fuel. Note that deration occurs as the methane number decreases. Methane number is a scale to measure detonation characteristics of various fuels. The methane number of a fuel is determined by using the Caterpillar Methane Number Calculation program.

ALTITUDE DERATION FACTORS:

This table shows the deration required for various air inlet temperatures and altitudes. Use this information along with the fuel usage guide chart to help determine actual engine power for your site.

ACTUAL ENGINE RATING:

It is important to note that the Altitude/Temperature deration and the Fuel Usage Guide deration are not cumulative. They are not to be added together. The same is true for the Low Energy Fuel deration (reference the Caterpillar Methane Number Program) and the Fuel Usage Guide deration. However, the Altitude/Temperature deration and Low Energy Fuel deration are cumulative; and they must be added together in the method shown below. To determine the actual power available, take the lowest rating between 1) and 2).

- 1) (Altitude/Temperature Deration) + (Low Energy Fuel Deration)
- 2) Fuel Usage Guide Deration

Note: For NA's always add the Low Energy Fuel deration to the Altitude/Temperature deration. For TA engines only add the Low Energy Fuel deration to the Altitude/Temperature deration whenever the Altitude/Temperature deration is less than 1.0 (100%). This will give the actual rating for the engine at the conditions specified.

AFTERCOOLER HEAT REJECTION FACTORS (ACHRF):

Aftercooler heat rejection is given for standard conditions of 77°F and 500 ft altitude. To maintain a constant air inlet manifold temperature, as the air to turbo temperature goes up, so must the heat rejection. As altitude increases, the turbocharger must work harder to overcome the lower atmospheric pressure. This increases the amount of heat that must be removed from the inlet air by the aftercooler. Use the aftercooler heat rejection factor (ACHRF) to adjust for ambient and altitude conditions. Multiply this factor by the standard aftercooler heat rejection. Failure to properly account for these factors could result in detonation and cause the engine to shutdown or fail.

SOUND DATA:

Data determined by methods similar to ISO Standard DIS-8528-10. Accuracy Grade 3. SPL = Sound Pressure Level.

**Anexo 5. Catálogo
del Cogenerador
ECOMAX5
BIOGÁS de AB
ENERGY**

ECOMAX®

La solución modular contenerizada más apreciada en el mundo

Cogeneración: una elección estratégica

- COGENERACIÓN CON GAS NATURAL
- COGENERACIÓN CON BIOGÁS
- COGENERACIÓN PARA INVERNADEROS
- COGENERACIÓN CON GASES RESIDUALES
- COGENERACIÓN CON GASES ESPECIALES



El diseño exterior

CHIMENEA CON SILENCIADOR INTEGRADO

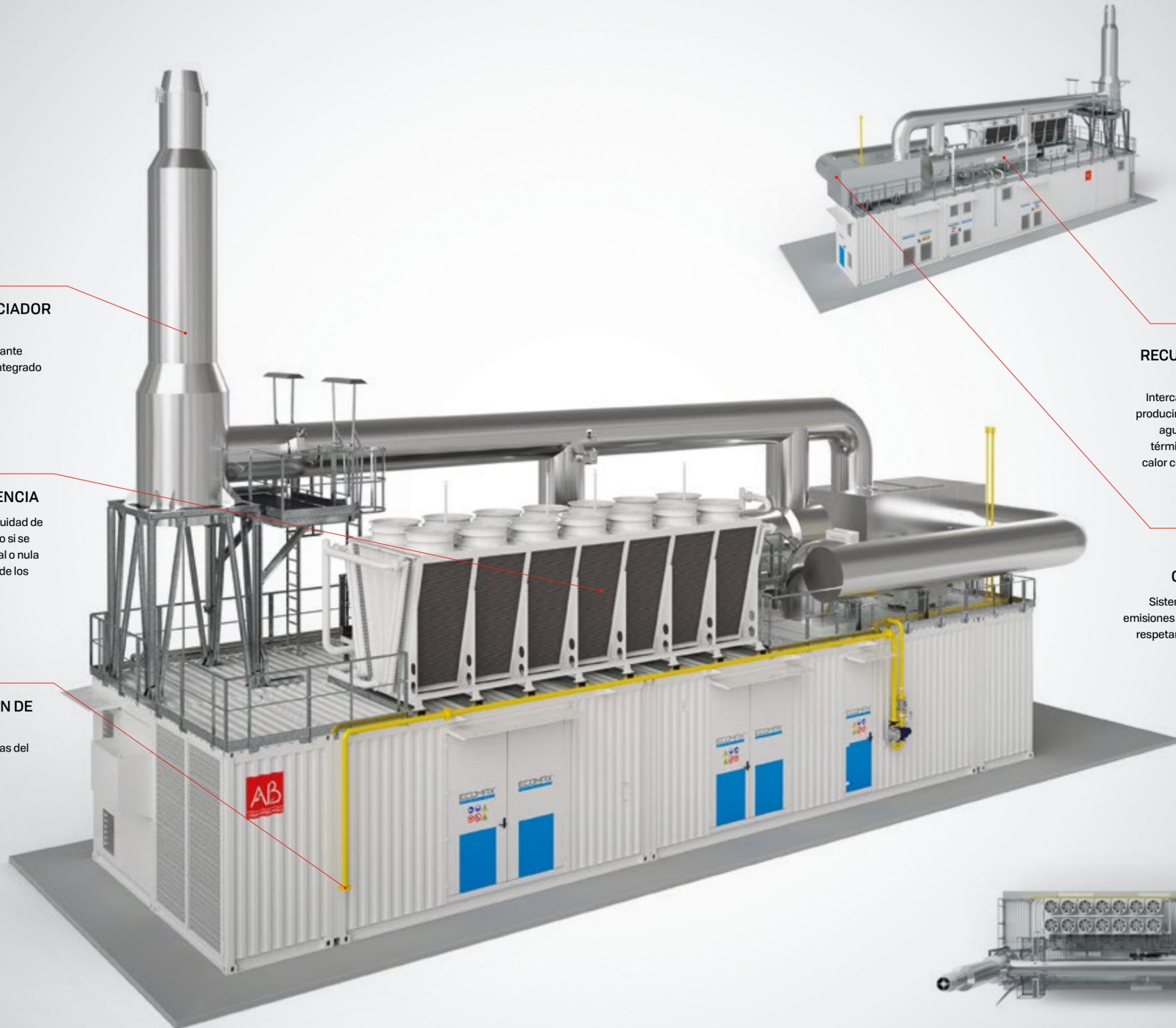
Chimenea de descarga autoportante con silenciador de doble etapa integrado (resonador y absorbente).

DISIPADOR DE EMERGENCIA

Dispositivo que permite la continuidad de funcionamiento del motor incluso si se produce una recuperación parcial o nula de la potencia térmica por parte de los requerimientos del cliente.

BRIDA DE ALIMENTACIÓN DE GAS

Punto de conexión a la línea de gas del cliente.



RECUPERADOR DE CALOR DE LOS GASES DE ESCAPE

Intercambiador de calor diseñado para producir potencia térmica (agua caliente, agua sobrecalentada, vapor y aceite térmico) mediante la recuperación del calor contenido en los gases de escape.

CATALIZADOR SCR + CATALIZADOR OXIDANTE

Sistema de doble etapa para abatir las emisiones de NOx y de CO con el objetivo de respetar los límites de la regulación local.

El diseño interior

MOTOR

Motor alternativo de ciclo otto diseñado para el uso de una gran variedad de combustibles gaseosos (gas natural, biogás, gas asociado de petróleo, gas de mina, syngas) y que se caracteriza por una gran flexibilidad de uso.

SILENCIADOR DE ASPIRACIÓN DE AIRE

Serie de bloques acústicos con gran capacidad de atenuación del ruido generado por el módulo de cogeneración y un óptimo flujo del aire de combustión/refrigeración de la sala del motor.

GENERADOR

Alternador acoplado al árbol motor para convertir la potencia mecánica en potencia eléctrica.

CUADROS ELÉCTRICOS MEDIA TENSIÓN

Cuadros eléctricos de conexión del alternador a la red eléctrica.

DEPÓSITO DE UREA

Depósito para almacenar la urea utilizada por el sistema SCR, con recipiente de contención.

DEPÓSITO DE ACEITE

Dos depósitos para almacenar el aceite lubricante (nuevo y usado), con recipiente de contención.

CIRCUITO HIDRÁULICO DE RECUPERACIÓN TÉRMICA Y DISIPACIÓN

CUADRO SUPRESOR DE SOBRETENSIONES

Cuadro eléctrico para proteger el alternador de las sobretensiones.

SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL

Sistema de supervisión y control de todos los subsistemas de ECOMAX®.

Desarrollado por AB para una gestión óptima y eficiente del sistema de cogeneración, así como de su diagnóstico y mantenimiento.

Conectado a la sala de control AB a través de internet.

CUADROS ELÉCTRICOS BAJA TENSIÓN

Cuadros eléctricos de alimentación y control de los componentes auxiliares del sistema de cogeneración.

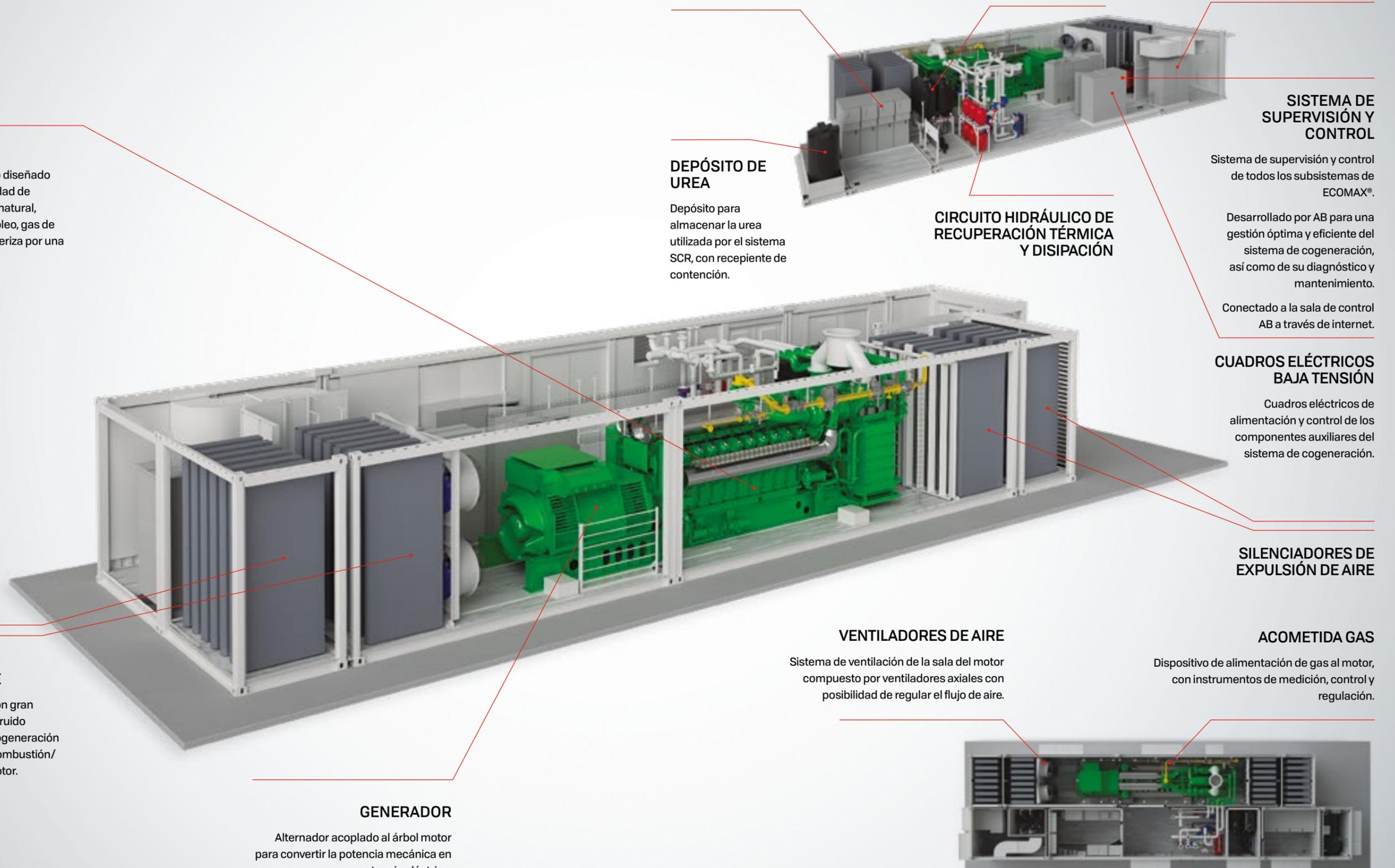
SILENCIADORES DE EXPULSIÓN DE AIRE

VENTILADORES DE AIRE

Sistema de ventilación de la sala del motor compuesto por ventiladores axiales con posibilidad de regular el flujo de aire.

ACOMETIDA GAS

Dispositivo de alimentación de gas al motor, con instrumentos de medición, control y regulación.





ECOMAX® 5 LANDFILL - FICHA TÉCNICA



| | | |
|---|--------------------|-------|
| Potencia introducida | kW | 1,344 |
| Potencia eléctrica | kW | 499 |
| Potencias térmicas disponibles | | |
| Bloque motor - H ₂ O caliente | kW | 312 |
| Gases de escape - H ₂ O caliente | kW | 298 |
| Total de recuperación en H₂O caliente | kW | 610 |
| | | |
| Rendimiento eléctrico | % | 37.1% |
| Rendimiento térmico | % | 46.0% |
| Rendimiento TOTAL | % | 83.1% |
| | | |
| Nox referidos al 5% de O ₂ | mg/Nm ³ | 500 |

AB HOLDING SPA

Via Caduti del Lavoro, 13
 25034 Orzinuovi (BS)
 T. +39 030 99 42 411
 info@gruppoab.com

**Anexo 6. Catálogo
del Sistema
radiante SRII 21 de
INDEL CASA**

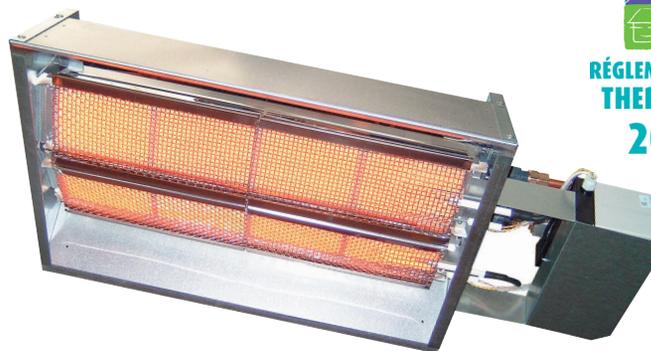
SRII PANEL RADIANTE A GAS



**RÉGLEMENTATION
THERMIQUE
2012**

LA SOLUCIÓN PERFECTA PARA EDIFICIOS:

- * Industriales
- * Mal aislados
- * De gran altura
- * Con renovaciones de aire importantes



Datos técnicos disponibles en www.edibatec.com



SO SRII CANT 060 117 100

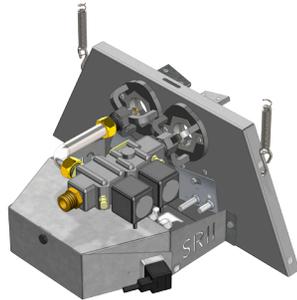
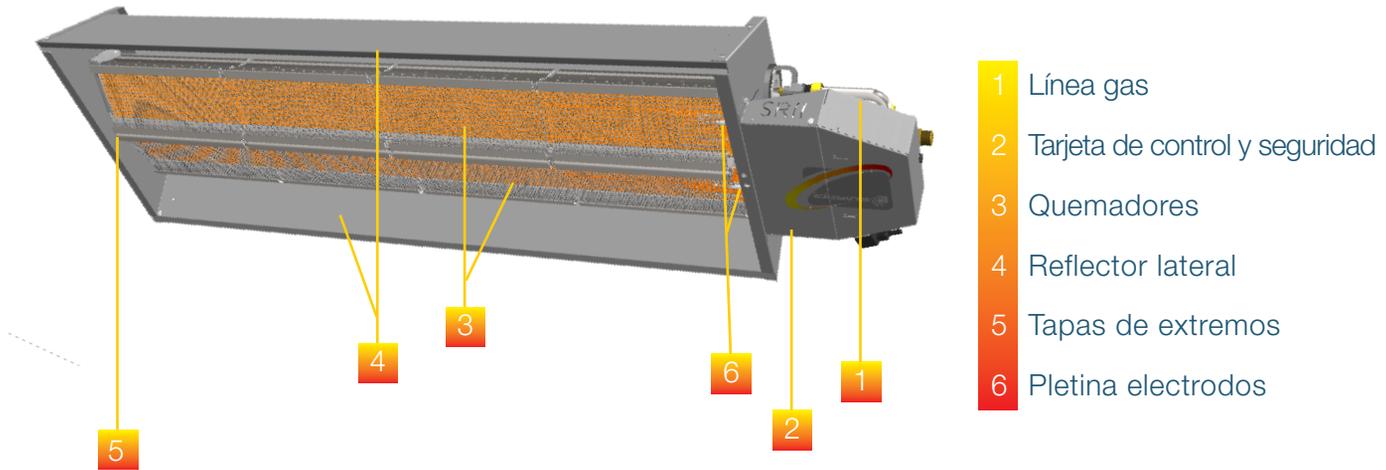
980°C
temperatura
superficial

5
modelos de 1 etapa

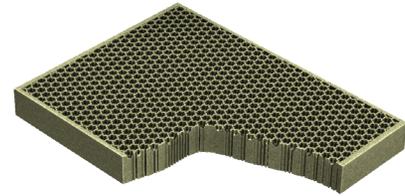
+150 000
equipos vendidos
en todo el mundo

3
modelos de 2 etapas

COMPONENTES PRINCIPALES



Detalle de quemador



Detalle de la placa cerámica

ESQUEMA DE INSTALACIÓN

Para evacuar los gases de la combustión al interior del local prever un aporte de 10 m³/h por cada Kw instalado (ver UNE-EN 13410)



PUENTE GRÚA

En caso de instalarse sobre un puente grúa a menos de 1 metro, es necesario aislar térmicamente el motor del puente grúa.

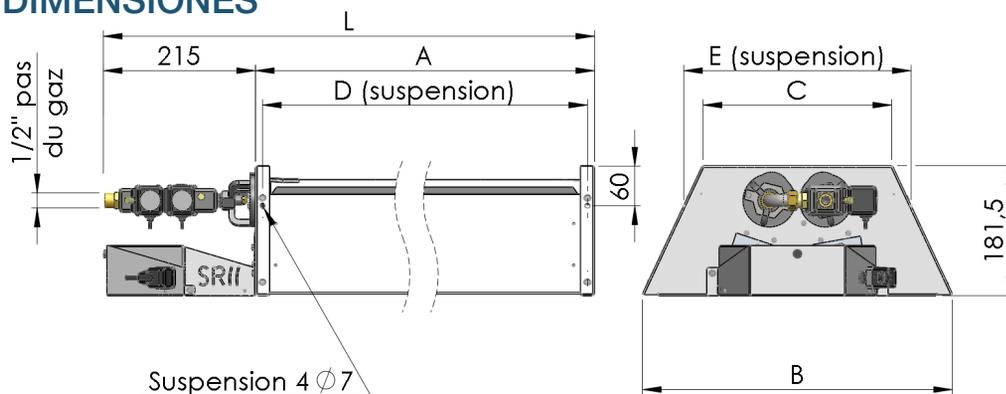
Los equipos se entregan con 4 muelles antivibración, 4 ganchos de fijación y 1 conector eléctrico.

Cuando el sistema eléctrico tiene un neutro impedante (N≠0V) prever un transformador de aislamiento.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

| | | 1 ETAPA | | | | | 2 ETAPAS | | |
|------------------------|-------------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| | | SR11 21 | SR11 31 | SR11 41 | SR11 61 | SR11 81 | SR11 42 | SR11 62 | SR11 82 |
| Potencia nominal PCI | kW | 6,20 | 9,75 | 12,80 | 19,50 | 25,70 | 12,40 | 19,50 | 25,70 |
| Consumo gas G20 | m ³ /h | 0,66 | 1,03 | 1,36 | 2,06 | 2,72 | 1,31 | 2,06 | 2,72 |
| Consumo gas G31 | kg/h | 0,48 | 0,76 | 1,00 | 1,52 | 2,00 | 0,97 | 1,52 | 2,00 |
| Alimentación eléctrica | | 1 x 230 V + N - 50 Hz | | | | | | | |
| Potencia eléctrica | VA | 15 | | | | | 30 | | |

DIMENSIONES



| | | SR11 21 | SR11 31 | SR11 41 | SR11 61 | SR11 81 | SR11 42 | SR11 62 | SR11 82 |
|---------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Longitud total (L) | mm | 813 | 1 082 | 1 349 | 1 082 | 1 349 | 813 | 1 082 | 1 349 |
| Longitud cuerpo quemador (A) | mm | 598 | 867 | 1 134 | 867 | 1 134 | 598 | 867 | 1 134 |
| Anchura inferior (B) | mm | 315 | 315 | 315 | 435 | 435 | 435 | 435 | 435 |
| Anchura superior (C) | mm | 150 | 150 | 150 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 |
| Distancia punto soportación (D) | mm | 578 | 847 | 1 114 | 847 | 1 114 | 578 | 847 | 1 114 |
| Distancia punto soportación (E) | mm | 200 | 200 | 200 | 320 | 320 | 320 | 320 | 320 |
| Peso | kg | 11 | 13 | 15 | 18,5 | 22 | 15 | 18,5 | 22 |

ALTURA DE INSTALACIÓN RECOMENDADA

| | | SR11 21 | SR11 31 | SR11 41 | SR11 61 | SR11 81 | SR11 42 | SR11 62 | SR11 82 |
|---------------------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Altura mínima recomendada | m | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 | 5 | 6 | 7 |
| Altura máxima recomendada | m | 5 | 5 | 6 | 7 | 9 | 6 | 7 | 9 |

La potencia, el número de equipos, la altura de instalación y la situación de los mismos



Para más información del panel radiante SRI. escanea el código QR o visita nuestra pagina de internet

**Anexo 7. Catálogo
del proyector LED
SYLVANIA 400W**

Proyector LED

LED PROYECTOR SYLVEO PRO 400W

P23581



El nuevo **Sylveo LED PRO** es una completa gama de reflector de exterior para reemplazar los tradicionales reflectores de HID, diseño delgado y robusto con driver integrado en la luminaria. Proyección uniforme de la luz, reduce los costos de consumo de energía y de mantenimiento.

CARACTERÍSTICAS

- Diseño delgado, moderno y robusto, resistente a la humedad
- Chasis en aluminio
- Tension de alimentacion 100-277V (opcional 480V sobre pedido)

APLICACIONES

- Perfecto para iluminación de áreas deportivas
- Estadios y coliseos



Ultra Robusta



DATOS ÓPTICOS

| | |
|-----------------------------|--------------------|
| Temperatura de color | 5000K (CW) |
| Flujo luminoso | 48000 lm |
| Ángulo de apertura | 30° |
| Tipo de distribución | Directa asimétrica |
| Reproducción de color (IRC) | ≥70 |
| Vida útil | 100000h * |
| Eficacia | 120 lm/W |
| Número de chips LED | 428 pcs |

*Vida útil LED L70 LM80 TM21

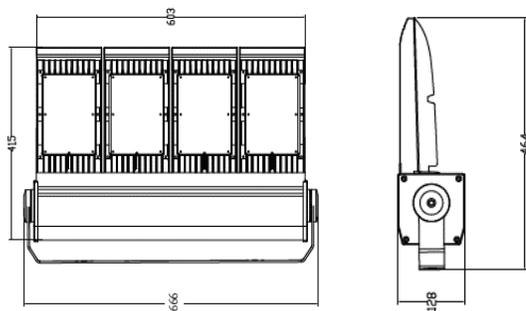
DATOS FÍSICOS

| | |
|-----------------------------|--------------------|
| Acabado | Gris |
| Grado de protección IP IK | IP66 IK08 |
| Dimensiones (LxWxH) | 666x415x128mm |
| Tipo de montaje | Soporte orientable |
| Chasis | Aluminio inyectado |
| Material óptica | Lente PMMA |
| Temperatura de operación Ta | -45°C ~ +45°C |

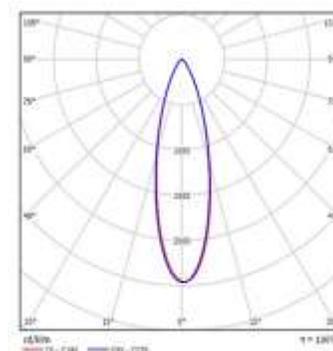
DATOS ELÉCTRICOS

| | |
|---------------------------|---------------------|
| Potencia de entrada | 400 W |
| Tensión de operación | 100-277V 50/60Hz |
| Corriente de entrada | 1.91 A @ 220 V |
| Factor de potencia | 0.95 |
| Distorsión Armónica (THD) | <20% |
| Tipo de driver | Corriente constante |
| Atenuable | No |

DIMENSIONES



FOTOMETRIA



**Anexo 8. Catálogo
de iluminaria de
calle LED
SYLVANIA 103W**

Skyline Street - Medium

Skyline Street M 5-12klm NW MR15 I 9022

0066603



Características del producto

- The Skyline Street family is dedicated for road lighting applications. Light distribution: MR15 - Medium Road, color temperature: 4000K , total system power: 103W, total fixture output: 12406lm, luminaire efficacy: 120lm/W, LOR: 100%, colour rendering index: 70, LED Chromaticity: 5 step MacAdam ellipse tolerance, lifetime: 100000 hours at L90B50 @ 50°C, energy class: A++, A+, A, operating voltage: 220-240V / 50-60Hz, electronic driver, Without Controls, power factor: min. 0.9, electrical protection: Class I, Ingress protection rating: IP66, Impact resistance: IK08, dimensions: 625x290x105mm, weight: 7 kg, for 42-60mm side entry or post top installation with +/-15° adjustability, the housing is made of Die Cast Aluminium in RAL9022 color combined with tempered flat glass cover.



DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

| | |
|-------------------------------|---|
| Nombre del producto | Skyline Street M 5-12klm NW MR15 I 9022 |
| Tecnología | LED |
| Housing | Aluminium |
| Montaje | Post top |
| General application | Office, Hospitality, Retail, Logistics & Industry, Educación, |
| ETIM Class | EC000062 |
| FI del número electrónico | 4579419 |
| Warranty | 5 years |
| Fixture luminous flux (lm) | 12406 |
| Luminaire efficacy (lm/W) | 120 |
| LOR (%) | 100 |
| Temperatura de color (K) | 4000 |
| Color de la luz | Neutral White |
| IRC (Ra) | 70 |
| Grupo de riesgo fotobiológico | RG1 |
| Consumo total de energía (W) | 103 |
| Electrical protection | Class I |
| Tipo de sistema de control | Electronic ballast |
| Dimmable | No |
| Color carcasa luminaria | RAL 9022 - Pearl light grey |
| IP rating | IP66 |
| IK rating | IK08 |
| Product EAN number | 5410288666037 |
| Lámpara incluida | SAX0000A_0000 |