

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
		PAGINA: 1 de 7

16-

FECHA martes, 11 de junio de 2019

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Facatativá

UNIDAD REGIONAL	Extensión Facatativá
TIPO DE DOCUMENTO	Tesis
FACULTAD	Ciencias Agropecuarias
NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
PROGRAMA ACADÉMICO	Ingeniería Ambiental

El Autor(Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
ACOSTA RAMIREZ	LIZETH CAMILA	1'070.978.645
BOHORQUEZ ROZO	JUAN CAMILO	1'016.101.101

Calle 14 Avenida 15 Barrio Berlín Facatativá – Cundinamarca
 Teléfono (091) 892 07 07 Línea Gratuita 018000976000
 www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL	VIGENCIA: 2017-11-16
	REPOSITORIO INSTITUCIONAL	PAGINA: 2 de 7

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
MONROY PEÑA	CAMILO ANTONIO

TÍTULO DEL DOCUMENTO
VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL RELLENO SANITARIO DE DOÑA JUANA

SUBTÍTULO (Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Aplica para Tesis/Trabajo de Grado/Pasantía
INGENIERO AMBIENTAL

AÑO DE EDICIÓN DEL DOCUMENTO	NÚMERO DE PÁGINAS
2019	86

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves)	
ESPAÑOL	INGLÉS
1.Residuos Sólidos Urbanos	Municipal Solid Waste
2.Relleno Sanitario	Landfill
3.Gasificación	Gasification
4.Biodigestor	Biodigestion
5.Energía Eléctrica	Electric Energy
6.Abono	Fertilizer

Calle 14 Avenida 15 Barrio Berlín Facatativá – Cundinamarca
Teléfono (091) 892 07 07 Línea Gratuita 018000976000
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2

Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 3 de 7

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS
(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

El documento propone dos soluciones a la problemática de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) en Bogotá. La generación de energía eléctrica a partir de la gasificación de la fracción inorgánica de los RSU generados en la ciudad y la producción del mismo recurso y de abono orgánico por medio de la combustión del biogás formado por los desechos orgánicos en el relleno sanitario de Doña Juana.

Las dos técnicas para el tratamiento de los RSU fueron evaluadas técnicamente mediante el cálculo de la cantidad de energía y abono producidos; y, económicamente a partir del análisis económico del proyecto que incluye variables como el capital total de inversión, costos de diseño, entre otros.

Lo anterior se realizó mediante la simulación en softwares como Super Pro Designer, ASPEN HYSYS V10 y APEA añadiendo condiciones basadas en la literatura y en cálculos manuales.

Se obtuvo una producción energética de 127,91 MWH a partir de la gasificación de 2.274,64 ton/día de residuos inorgánicos y 165,67 MWH a partir de la digestión anaerobia de 3.991,59 ton/día de residuos orgánicos. Esos valores se relacionaron con el consumo de energía eléctrica en hogares colombianos resultando en el abastecimiento de 479.080 y 620.295 hogares por medio de los tratamientos respectivos. La digestión anaerobia también produjo 3991,59 ton/día de abono orgánico como subproducto del tratamiento.

El análisis económico arrojó \$350.575.598 COP como costo total del proyecto, 60,17% como tasa interna de retorno (TIR) y retribución económica de cuatro años a partir del valor presente neto (VPN).

The document proposes two solutions to the problem of the use of Municipal Solid Waste (MSW) in Bogotá. The generation of electrical energy from the gasification of the inorganic part of the MSW generated in the city and the production of the same resource and fertilizer by the combustion of the biogas formed by the organic waste in the sanitary landfill of Doña Juana.

Both of the techniques for the treatment of the MSW were technically evaluated by calculating the amount of energy and fertilizer produced; and, economically, from the economic analysis of the project that includes variables such as the total capital of investment, design costs, among others.

This was done through simulation in software such as Super Pro Designer, ASPEN HYSYS V10 and APEA.

An energy production of 127.91 MWH was obtained from the gasification of 2,274.64 tons/day of inorganic waste and 165.67 MWH from the anaerobic digestion of 3,991.59 tons/day of organic waste. These values were related to the consumption of electricity in Colombian homes resulting in the supply of 479,080 and 620,295 homes through the corresponding treatments. Anaerobic digestion also produced 3991.59 tons/day of organic fertilizer as a byproduct of the treatment.

Calle 14 Avenida 15 Barrio Berlín Facatativá – Cundinamarca
Teléfono (091) 892 07 07 Línea Gratuita 018000976000
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*



The economic analysis yielded \$ 350.575.598 USD as the total cost of the project, 60.17% as Internal Rate of Return (IRR) and economic compensation of four years from the Net Present Value (NPV).

AUTORIZACION DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son: Marque con una "X":

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	X	
2. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet.	X	
3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional.	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi(nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es)



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 5 de 7

exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. **SI** ___ **NO** **x**.
En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

Calle 14 Avenida 15 Barrio Berlín Facatativá – Cundinamarca
Teléfono (091) 892 07 07 Línea Gratuita 018000976000
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 6 de 7

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).

b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.

c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.

d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión, es producto de mi (nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto(manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí(nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.

f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el "Manual del Repositorio Institucional AAAM003"



i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.



j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.



Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional, está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. PerezJuan2017.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL RELLENO SANITARIO DE DOÑA JUANA.PDF	TEXTO
2. ANEXO 3_COSTOS_APEA.PDF	TEXTO
3. ANEXO 4_CORRIENTES_ASPEN_HYSYS.PDF	TEXTO
4.	

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafa)
ACOSTA RAMIREZ LIZETH CAMILA	<i>Camila Acosta</i>
BOHORQUEZ ROZO JUAN CAMILO	<i>Juan Camilo Bohorquez</i>

21.1-40



VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS SOLIDOS EN EL RELLENO

SANITARIO DE DOÑA JUANA

Acosta Ramírez Lizeth Camila

Bohórquez Rozo Juan Camilo

Universidad de Cundinamarca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Facatativá, Colombia

2019

**VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS SOLIDOS EN EL RELLENO
SANITARIO DOÑA JUANA**

Acosta Ramírez Lizeth Camila

Bohórquez Rozo Juan Camilo

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Director:

Msc, Camilo Antonio Monroy Peña

Línea de Investigación: Gestión Ambiental

Grupo de Investigación: Cundinamarca Agroambiental

Universidad de Cundinamarca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Facatativá, Colombia

2019

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
2. JUSTIFICACIÓN.....	16
3. OBJETIVOS.....	20
3.1 Objetivos Generales.....	20
3.2 Objetivos Específicos	20
4. MARCO TEÓRICO	21
4.1 Residuos sólidos en Bogotá.....	21
4.2 Sistema de manejo de residuos sólidos y de prestación del servicio.....	23
4.3 Tratamientos de los RSU.....	24
4.4 Rellenos sanitarios.....	24
4.5 Métodos de construcción de un relleno sanitario	25
4.6 Descripción general de un relleno sanitario	27
4.7 Valorización energética	29
Incineración.....	29
Pirolisis.....	29
Gasificación.....	30
4.8 Ventajas y desventajas de la gasificación.....	32
4.9 Digestión anaerobia para producción de biogás	32
4.10 Antecedentes del RSDJ	33
4.11 Aplicaciones internacionales	36
4.12 Políticas nacionales.....	40
4.13 Simulación.....	40
Ventajas y desventajas	41
4.14 Software de simulación ASPEN HYSYS.....	42
5. METODOLOGÍA DEL DISEÑO CONCEPTUAL DEL TRATAMIENTO DE RSU	43
5.1 Diseño conceptual para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos inorgánicos.....	43
5.2 Diseño conceptual para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos orgánicos.....	47

5.3 Unión de los diseños conceptuales para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos.....	53
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL DISEÑO CONCEPTUAL DEL TRATAMIENTO DE RSU.....	56
6.1 Energía generada en la planta de residuos sólidos urbanos inorgánicos ..	58
6.2 Energía generada en la planta de residuos sólidos urbanos orgánicos	59
7. METODOLOGÍA EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL TRATAMIENTO DE RSU.....	61
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL TRATAMIENTO DE RSU.....	66
8.1 Viabilidad económica del proyecto	68
9. CONCLUSIONES.....	70
10. RECOMENDACIONES	71
11. REFERENCIAS	73
12. ANEXOS	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones a nivel mundial para la disposición final de los residuos sólidos.....	38
Tabla 2. Porcentaje y cantidad de toneladas diarias correspondientes a la clasificación de los RSU para el tratamiento inorgánico.	45
Tabla 3. Condiciones iniciales para simulación del tratamiento de RSU inorgánicos.	46
Tabla 4. Equipos utilizados en la simulación del tratamiento de residuos inorgánicos.	47
Tabla 5. Porcentajes de concentración de gases producidos en el proceso.	49
Tabla 6. Condiciones iniciales para simulación del tratamiento de RSU orgánicos.	52
Tabla 7. Equipos utilizados en la simulación del tratamiento de residuos inorgánicos.	53
Tabla 8. Componentes y porcentajes contenidos por corriente.....	54
Tabla 9. Resultados por corriente obtenidos de la simulación para el tratamiento de RSU inorgánicos y orgánicos.....	56
Tabla 10. Condiciones de las corrientes de salida para cada equipo.....	57
Tabla 11. Factor de corrección del largo del tubo de un intercambiador de calor.	62
Tabla 12. Costos capitales para los intercambiadores de calor E-102 y E-103. ...	62
Tabla 13. Costos capitales del equipo gasificador.	63
Tabla 14. Costos capitales del equipo biodigestor.	63
Tabla 15. Costos de operación.	64
Tabla 16. Factores adicionales requeridos por el simulador	64
Tabla 17. Costos de equipos.....	66
Tabla 18. Resumen costos capitales del proyecto.	67
Tabla 19. Resumen económico del proyecto.	67
Tabla 20. Valor Presente Neto – Tasa Interna de Retorno.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evaluación mórbida realizada en Ciudad Bolívar y Usme.	13
Figura 2. Relación porcentual de reciclaje, recuperación energética y disposición en rellenos para países europeos en el año 2016.....	17
Figura 3. Disposición de residuos sólidos en el RSDJ en toneladas al año.	22
Figura 4. Método de trinchera y zanja para la construcción de un relleno sanitario.	25
Figura 5. Método de área para la construcción de un relleno sanitario.....	26
Figura 6. Método de rampa para la construcción de un relleno sanitario.	26
Figura 7. Proceso general del tratamiento de RSU por gasificación.....	31
Figura 8. Proceso de biodigestión.	33
Figura 9. Generación de desechos a nivel regional por año.....	37
Figura 10. Esquema general del proceso propuesto para el tratamiento de RSU inorgánicos.	44
Figura 11. Simulación de la gasificación en Super Pro Designer.	46
Figura 12. Simulación final en el software Aspen HYSYS.	47
Figura 13. Esquema general del proceso propuesto para el tratamiento de RSU orgánicos.	48
Figura 14. Simulación de la gasificación en Super Pro Designer.	52
Figura 15. Simulación final en el software Aspen HYSYS.	53
Figura 16. Simulación conjunta de los procesos orgánico e inorgánico	54
Figura 17. Valor Presente Neto para 10 años del proyecto.	69

RESUMEN

En la presente monografía se proponen dos soluciones a la problemática de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) en Bogotá. La primera es la generación de energía eléctrica a partir de la gasificación de la fracción inorgánica de los RSU generados en la ciudad y la segunda, la producción de energía eléctrica y de abono orgánico por medio de la combustión del biogás formado por los desechos orgánicos al momento de su descomposición en el relleno sanitario Doña Juana (RSDJ).

Las dos técnicas para el tratamiento de los RSU, fueron evaluadas técnica y económicamente mediante el cálculo de la cantidad de energía y abono producidos, el dimensionamiento de la capacidad de los equipos y posteriormente un análisis económico que incluye variables como el capital total de inversión, costos de diseño, equipos, tubería, instrumentación, obra civil, instalación eléctrica, entre otros.

El cálculo de la energía eléctrica y el abono producido se realizó a partir de simulaciones en los softwares Super Pro Designer y ASPEN HYSYS V10 y el análisis económico fue simulado en el software Aspen Process Economic Analyzer V10 añadiendo condiciones como el aumento anual en el precio de la energía eléctrica, el precio de venta del abono orgánico, el impuesto a la renta, entre otros. Las condiciones iniciales de los procesos fueron ajustadas basadas en la literatura y en algunos cálculos manuales realizados.

Se obtuvo una producción energética de 127,91 MWH a partir de la gasificación de 2.274,64 ton/día de residuos inorgánicos y 165,67 MWH a partir de la digestión anaerobia de 3.991,59 ton/día, correspondientes a la fracción orgánica de los residuos. Esos valores se

relacionaron con el consumo de energía eléctrica en hogares colombianos resultando en el abastecimiento de 479.080 y 620.295 hogares por medio de los tratamientos inorgánico y orgánico de residuos respectivamente. El tratamiento de digestión anaerobia también permitió la generación de 3.991,59 ton/día de abono orgánico como subproducto del tratamiento.

El análisis económico arrojó \$350.575.597 USD como costo total del proyecto, 60,17% como tasa interna de retorno (TIR) y retribución económica de cuatro años a partir del valor presente neto (VPN).

PALABRAS CLAVE

Residuos Sólidos Urbanos, Residuos Orgánicos, Residuos Inorgánicos, Relleno Sanitario, Gasificación, Biodigestor, Gases, Simulación, Energía Eléctrica, Abono.

ABSTRACT

The monograph to be presented proposes two solutions to the problem of the use of municipal solid waste (MSW) in Bogotá. The generation of electrical energy from the gasification of the inorganic fraction of the MSW generated in the city and the production of the same resource and organic fertilizer by means of the combustion of the biogas formed by the organic waste at the moment of its decomposition in the Doña Juana Sanitary Landfill (DJSL).

The two techniques for the treatment of MSW, were evaluated technically and economically by calculating the amount of energy and fertilizer produced, the capacity dimensioning of the equipment and then an economic analysis that includes variables such as the total capital of investment, design costs, equipment, pipeline, instrumentation, civil works, electrical installation, among others.

The calculation of the electric energy and the produced fertilizer was made from simulations in the Super Pro Designer and ASPEN HYSYS V10 software and the economic analysis was simulated in the Aspen Process Economic Analyzer V10 software adding conditions such as the annual increase in the price of the electric power, the sale price of the organic fertilizer, the income tax, among others. The initial conditions of the processes were adjusted based on the literature and some manual calculations performed.

An energy production of 127,918 MWH was obtained from the gasification of 2.274,64 ton/day inorganic waste and 165,67 MWH from the anaerobic digestion of 3.991,59 ton/day, corresponding to the organic fraction of the waste. These values were related to the consumption of electricity in Colombian households, resulting in the supply of 479.080 and

620.295 homes through the inorganic and organic waste treatments, respectively. The treatment of anaerobic digestion also allowed the generation of 3.991,59 ton/day of organic fertilizer as a by-product of the treatment.

The economic analysis yielded \$ 1.136.636.203.511 COP as the total cost of the project, 60,17% as Internal Rate of Return (IRR) and economic compensation of four years from the Net Present Value (NPV).

KEYBOARDS

Municipal Solid Waste, Organic Waste, Inorganic Waste, Landfill, Gasification, Biodigestion, Gas, Simulation, Electric Energy, Fertilizer.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto evalúa la factibilidad técnico económica de implementar la tecnología de gasificación del material inorgánico combustible; y la combustión del biogás generado a partir del material orgánico de los residuos sólidos urbanos (RSU) que actualmente son depositados en el relleno sanitario de Doña Juana (RSDJ) de la ciudad de Bogotá. Los productos de la combustión son enviados a procesos de transformación de energía eléctrica.

La implementación de esta propuesta permitiría reducir los problemas que presentan las instalaciones y los procesos llevados a cabo para el tratamiento de los RSU en el relleno como el manejo de lixiviados, el control de vectores (proliferación de ratas y moscas), la contaminación de las fuentes hídricas, la degradación del paisaje y los malos olores. Las tecnologías propuestas se basan en el poder calorífico de los residuos e implementadas de forma correcta mejorarían la calidad de vida de los habitantes aledaños a la zona y minimizarían el impacto ambiental causado por los productos de la degradación no controlada de los RSU, así como la generación de dos productos que dan valor agregado al proceso: Abono y energía eléctrica.

La evaluación de la viabilidad técnica tiene en cuenta la venta de la producción energética y el abono producido, así como los costos de producción y capital que pueden llegar a requerir cada uno de los sistemas. También se tiene en cuenta la cantidad de RSU que ingresan al relleno sanitario y la caracterización física de los mismos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la creciente cantidad de RSU que se generan en las ciudades como resultado de las actividades humanas las autoridades sanitarias deben tratar o disponer adecuadamente dichos residuos. Tradicionalmente, la disposición de estos residuos se efectúa en rellenos sanitarios, como en el caso de Bogotá, que utiliza el RSDJ y 78 municipios de Cundinamarca que disponen sus residuos en el relleno sanitario de Nuevo Mondoñedo ubicado en el municipio de Mosquera. Estos y otros rellenos sanitarios, a causa de manejos inadecuados generan niveles de contaminación y costos de remediación elevados.

Actualmente en Bogotá se producen 6.500 toneladas de RSU al día (Observatorio, 2015). La ciudad tiene un crecimiento poblacional con tasas cercanas al 2% anual y tasas de crecimiento económico del 4% (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2012). Lo cual tiene como consecuencia un aumento en la producción de RSU y la disposición de estos en el relleno sanitario.

La presencia de lixiviados, consecuencia de la degradación de los residuos sólidos depositados en el RSDJ es una de las principales causas de contaminación en la cuenca hídrica de los ríos Tunjuelo, Bogotá y Magdalena (Mendoza, 2013). De igual forma, el suelo se ve afectado por los mismos contaminantes anteriormente mencionados y es compactado por el frecuente uso de maquinaria pesada. Además, la descomposición de estos residuos orgánicos produce gas metano (CH_4), el mayor contribuyente al calentamiento global entre los gases de efecto invernadero.

El manejo inadecuado de este gas en los rellenos sanitarios puede ocasionar desastres, uno de los más significativos para la capital del país se presentó el día 27 de septiembre

de 1997, cuando una explosión de gases acumulados dejó al descubierto varias toneladas de residuos que se esparcieron rápidamente represando el cauce del Río Tunjuelito. (Pérez, 2016)

Sumado a toda la problemática ambiental en el relleno sanitario anteriormente mencionada, también se presentan impactos en la salud pública; debido al inadecuado manejo y tratamiento de los RSU. La comunidad aledaña al relleno sanitario, residentes de las localidades de Usme y Ciudad Bolívar, han presentado varios síntomas de enfermedades que se atribuyen a la problemática, como se muestra en la Figura 1 extraída de un estudio de la Secretaria Distrital de Salud (SDS) del año 2015, donde se encuestaron diferentes residentes del sector con el fin de conocer las afectaciones de las actividades del relleno sanitario en las comunidades de las localidades más cercanas.

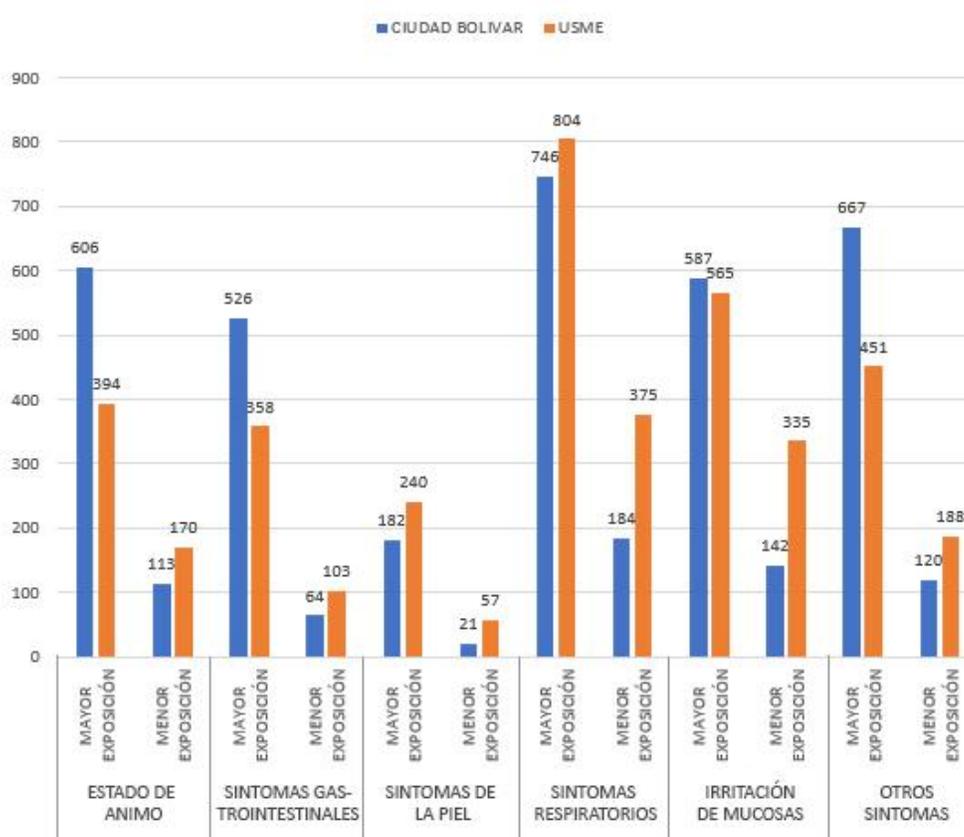


Figura 1. Evaluación mórbida realizada en Ciudad Bolívar y Usme. (SDS, 2015).

Para ambas localidades las mayores afectaciones son la presencia de síntomas de enfermedades respiratorias y la irritación de las mucosas como resultado de la exposición a los olores y gases generados por la descomposición de los residuos en el relleno sanitario. Entre las enfermedades más comunes que presentan los habitantes de este sector están el asma y la bronquitis; además, de reacciones alérgicas como la rinitis y la sinusitis.

Adicional a las problemáticas en la salud de los residentes, el mismo informe de la SDS describe las fallas técnicas, operacionales y de infraestructura que tienen las instalaciones del relleno. Las más importantes son la inadecuada disposición de los residuos, el no cumplimiento de las condiciones técnicas y el almacenamiento de lixiviados en áreas no definidas, entre otros.

El actual operador del relleno sanitario, Consorcio CGR fue multado recientemente por un tribunal de arbitramento con la suma de \$2.172 millones debido a incumplimientos del contrato: no solucionaron el tratamiento de lixiviados, no mejoraron las condiciones en la que se encuentran las vías y no automatizaron el relleno sanitario (Carreño y Rivera, 2018). Por tal razón la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) y la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) autorizaron un aumento en la tarifa de aseo para el año 2018 entre el 14 y 30 por ciento dependiendo del estrato, aduciendo que este incremento en la tarifa se usará para el tratamiento de lixiviados en el relleno; lo cual beneficiaría la calidad del agua del Río Tunjuelo, disminuyendo el impacto generado por los líquidos resultantes de la degradación de los residuos. No obstante, la Contraloría General de la Nación estableció que el incremento va en contra de la normativa nacional; debido a que el relleno sanitario no cuenta con un permiso de vertimientos ni con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que permita tratar todo el caudal de los lixiviados, por lo tanto, se estaría cobrando por un servicio no eficiente.

Uno de los retos más grandes que actualmente tiene no solo la ciudad si no todo el país es el aprovechamiento de sus RSU, dado que actualmente solo se aprovecha el 17% de los 11,6 millones de toneladas de residuos generados anualmente en Colombia (Benítez, 2019) y por lo tanto se está perdiendo todo el potencial que tienen los RSU para la producción de energía eléctrica y reducción de su carga contaminante. Por tal razón, se hace necesario generar estrategias para que las comunidades del país aprendan a separar sus residuos desde la fuente, y, se implementen tecnologías innovadoras y eficientes que permitan una explotación de los desechos como recurso para otras actividades.

La mayoría de RSU se degrada en cientos y hasta miles de años, sin embargo, su alto poder calorífico los convierte en combustibles potenciales, lo cual brinda la oportunidad de generar beneficios ambientales y sociales mediante el correcto tratamiento de los residuos.

2. JUSTIFICACIÓN

A nivel mundial, las ciudades disponen parte de sus RSU en lugares controlados, también conocidos como rellenos sanitarios. Los desechos depositados allí comienzan un proceso de degradación que genera gases contaminantes y líquidos (lixiviados), los cuales, al no ser controlados pueden terminar afectando tanto el ambiente como la salud de los habitantes aledaños al relleno.

Actualmente muchas de estas ciudades han optado por implementar tecnologías que les permitan un manejo más íntegro de sus residuos, casos en los que no solamente se les da una disposición adecuada, sino que además se obtiene de ellos un beneficio ambiental, social y económico. Desde una perspectiva del desarrollo sostenible, estas tecnologías brindan una eficacia respecto al manejo de muchos materiales. Por ejemplo, los plásticos, cuyo periodo de degradación puede llegar a ser hasta de 300 años y que, además tienden a acumularse (Sosa, 2003), se pueden aprovechar para obtener energía en vez de ser depositados en un relleno sanitario.

Tal es el caso de varios países europeos, que realizan procesos de reciclaje y conversión energética con el fin de disminuir la cantidad de residuos que son enviados a rellenos sanitarios, reduciendo su disposición en estos sitios. En la Figura 2 se presenta una relación porcentual de los plásticos que son reciclados, recuperados para transformación energética y dispuestos en rellenos (Landfill) en Europa. Países como Suiza, Australia, Alemania, Holanda, Suecia, Dinamarca, Luxemburgo, Bélgica, Noruega y Finlandia son pioneros en reciclaje y aprovechamiento energético; ayudados por las restricciones que tienen de disposición de estos productos en rellenos.

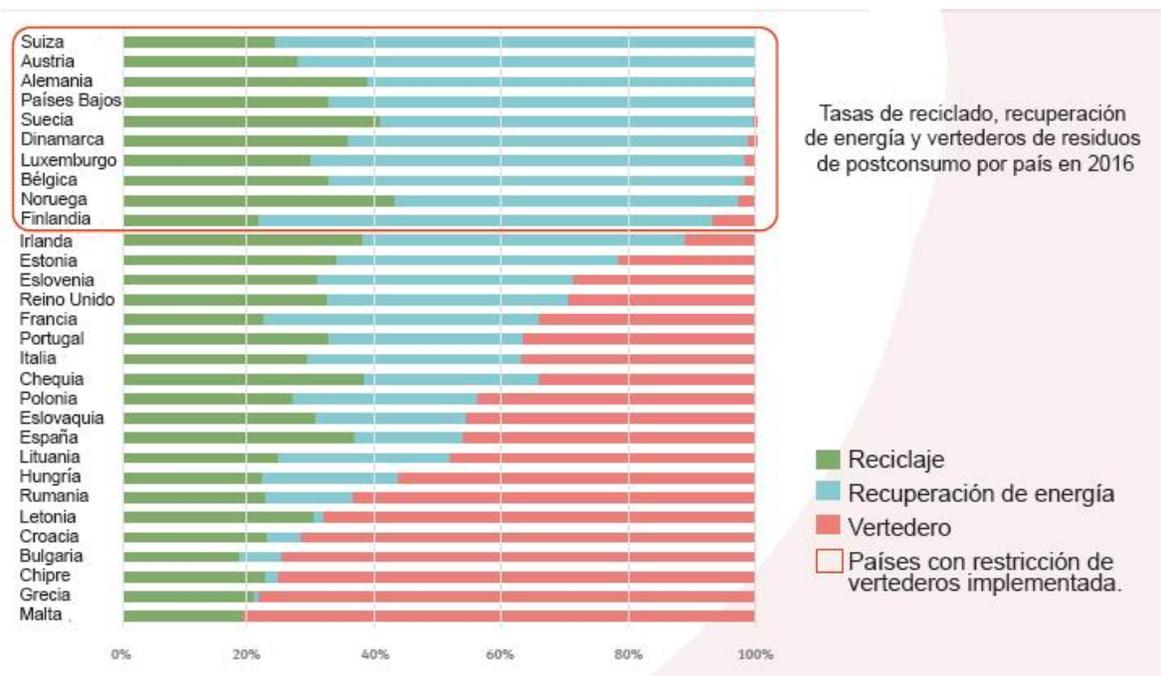


Figura 2. Relación porcentual de reciclaje, recuperación energética y disposición en rellenos para países europeos en el año 2016 (Plastics Europe, 2017)

Según la Confederación de Plantas *Waste-to-Energy* europeas, para el año 2016 Europa ya contaba con 488 plantas en funcionamiento que convertían los desechos en energía que era utilizada como electricidad y calefacción.

En Colombia, los sistemas de disposición final de RSU autorizados son los rellenos sanitarios, las plantas de tratamiento y celdas de contingencia; sin embargo, en muchos lugares del país se usan celdas transitorias, botaderos a cielo abierto, enterramiento, vertimiento a cuerpos de agua y quema de estos residuos, los cuales son sistemas que no están autorizados. La baja calidad en sus procesos y deficiente infraestructura genera que los RSU no posean el adecuado tratamiento y terminen generando un impacto negativo en la comunidad y en el ambiente. Tal es el caso del RSDJ, ubicado en la localidad de Ciudad Bolívar – Bogotá que almacena los RSU de la capital del país y de algunos municipios aledaños; donde la comunidad vive en constantes protestas y quejas

debido a los malos olores y a la proliferación de vectores que se da debido al mal tratamiento de los RSU.

Genera preocupación, el inadecuado manejo del relleno sanitario el cual está perjudicando la salud de los residentes de las localidades de Usme y Ciudad Bolívar. Esta afirmación se soporta con varios estudios que demuestran las afectaciones directas en la salud que han presentado las comunidades aledañas al relleno sanitario.

Por otro lado, el grupo de Epidemiología y Salud Poblacional de la Universidad del Valle (2006), a través de una evaluación de impactos en la salud, expone que los niños evaluados entre 1 y 5 años presentaron el 40% enrojecimiento en la piel, el 28% irritación en los ojos y el 39% disfonía, síntomas atribuidos a la exposición al RSDJ. De la misma forma, la población mayor a 50 años que fue analizada en el estudio presentó sintomatología de problemas respiratorios que también se relacionaron con su nivel económico, entre los cuales destacan todos los grados de severidad de síntomas bronquíticos y asmáticos.

De la misma manera, la Defensoría del Pueblo en su informe N° 38 reportó un recuento de los análisis realizados en el año 2004, los cuales hacen referencia a los problemas de manejo que tiene el RSDJ. El estudio fue ejecutado desde el mes de enero hasta el mes de agosto. A continuación, se resumen los principales inconvenientes:

- La maquinaria no es suficiente para cubrir las labores del relleno sanitario; por lo tanto, además de verse afectado el proceso de disposición de residuos no se logran completar varias de las obras que permitirán mejorar los procesos.
- Deficiencias en las coberturas utilizadas, esto se hizo notorio debido a la ineficiencia en la reducción de vectores y malos olores.

- Manejo inadecuado de biosólidos que al descomponerse aporta a la producción de malos olores
- Manejo inadecuado de lixiviados, lo cual afecta de forma directa fuentes hídricas subterráneas y superficiales.

Actualmente se buscan estrategias que puedan mejorar la calidad del RSDJ dado que su vida útil está calculada hasta el año 2022; sin embargo, la ciudad no cuenta con otra área para construir un nuevo relleno sanitario; en consecuencia, se hace necesaria la implementación de nuevas tecnologías que solucionen estos problemas.

Como se expresó anteriormente una de las alternativas ampliamente utilizadas hoy en día es la incineración de RSU. Esta tecnología además de eliminarlos rápidamente permite la generación de energía eléctrica y por lo tanto disminuye el impacto que causan los RSU a nivel ambiental y social a cambio de un recurso aprovechable (energía), lo cual hace de este procedimiento uno de los más adecuados para las ciudades densamente pobladas como es el caso de Bogotá.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivos Generales

Evaluar la viabilidad técnica y económica para generar energía eléctrica a partir de la incineración de RSU y la combustión del biogás generado por el RSDJ.

3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar de manera conceptual una planta de incineración de residuos sólidos que genere energía apta para los requerimientos del RSDJ.
- Realizar el diseño conceptual de un sistema de combustión de biogás para la generación de energía eléctrica dirigido al RSDJ.
- Calcular la eficiencia, costos y factores resultantes de los dos procesos nombrados que minimicen el impacto ambiental causado por el RSDJ.
- Comparar la viabilidad técnica de generar energía a partir de una planta de incineración de residuos sólidos y la producción de la misma por medio de la combustión del biogás generado por los desechos en el RSDJ.

4. MARCO TEÓRICO

Los residuos sólidos son definidos por el Decreto 2981 (2013) como:

Cualquier objeto, material, sustancia o elemento principalmente sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador presenta para su recolección por parte de la persona prestadora del servicio público de aseo.

Este mismo decreto clasifica los residuos en aprovechables y no aprovechables, siendo los primeros aquellos que, aunque no tienen valor de uso para quien lo genera, si pueden ser aprovechados en otros procesos de reincorporación.

A partir de esta definición se entiende que cualquier residuo sólido puede llegar a ser aprovechable, dado que no se establecen características específicas que determinen su utilidad. En la actualidad existen muchas formas de darles un valor a los residuos sólidos dentro de diferentes procesos productivos, desde el reciclaje que los aprovecha sometiéndolos a un proceso de transformación; hasta la valorización energética que permite la generación de electricidad a partir de un tratamiento térmico de estos.

4.1 Residuos sólidos en Bogotá

Según el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) (2015), la ciudad de Bogotá tiene una cobertura de recolección en el área urbana del 100% y los residuos que genera en mayor medida son orgánicos (65,48%), seguido por los plásticos (15,55%).

El RSDJ es actualmente el lugar para almacenar los RSU de Bogotá y de seis municipios aledaños a la ciudad (Fosca, Cáqueza, Choachí, Chipaque, Une y Ubaque), estos

últimos en menor proporción. El proyecto inició en el año 1988 y hoy en día tiene una vida útil autorizada hasta el año 2022. Sin embargo, desde el comienzo de sus operaciones ha presentado inconvenientes que han ocasionado problemas ambientales y emergencias sanitarias.

Además, algunas variables como los cambios tecnológicos y culturales y el crecimiento demográfico y económico que ha presentado la ciudad de Bogotá en los últimos años han generado un aumento en la cantidad de residuos sólidos que llegan al relleno sanitario.

La Figura 3, muestra el aumento de la disposición de residuos sólidos en RSDJ (Observatorio Ambiental de Bogotá – OAB, 2018) que se ha presentado a lo largo del tiempo a partir del número de toneladas al año de residuos convencionales y hospitalarios que son dispuestos por la ciudad de Bogotá sin incluir los municipios aledaños.



Figura 3. Disposición de residuos sólidos en el RSDJ en toneladas al año. (OAB, 2018)

Para el año 2018, según el OAB fueron depositadas 2.333.568,06 toneladas de residuos en el RSDJ, el cual representa un problema para la calidad de vida de la comunidad de Usme y Ciudad Bolívar quienes son los más cercanos a este lugar. Los habitantes de estos sectores desde hace mucho tiempo presentan quejas debido a los malos olores y demás problemas que tienen a causa del relleno sanitario,

El PGIRS actual de la ciudad de Bogotá está destinado al manejo de los residuos sólidos desde el año 2016 hasta el 2027 y tiene diferentes enfoques estratégicos entre los cuales se encuentra la disposición final. Esta estrategia cuenta con la línea de acción minimización de la disposición final en el RSDJ y busca implementar alternativas tecnológicas para la disposición de los residuos en el relleno sanitario, enfocados en el aprovechamiento (UAESP, 2015).

4.2 Sistema de manejo de residuos sólidos y de prestación del servicio

El Decreto 2981 (2013) por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo en Colombia, además de establecer los principios básicos para la prestación del servicio, también determina como actividades del mismo la recolección, el transporte, la transferencia, el tratamiento, el aprovechamiento, la disposición final de los residuos sólidos entre otros. A continuación, sus definiciones:

Recolección y transporte: Son las actividades que realiza la persona prestadora del servicio público de aseo; consiste en recoger y transportar los residuos aprovechables hasta las estaciones de clasificación y aprovechamiento.

Transferencia: Es la actividad complementaria del servicio público de aseo realizada al interior de una estación de transferencia, la cual consiste en trasladar los residuos sólidos de un vehículo recolector de menor capacidad a un vehículo de transporte a granel por medios mecánicos, previniendo el contacto manual y el esparcimiento de los mismos, con una mínima exposición al aire libre de los residuos.

Aprovechamiento: Es la actividad complementaria del servicio público de aseo que comprende la recolección de residuos aprovechables separados en la fuente por los usuarios, el

transporte selectivo hasta la estación de clasificación y aprovechamiento o hasta la planta de aprovechamiento, así como su clasificación y pesaje.

Disposición final: Se entiende como el último destino de los residuos, normalmente son los rellenos controlados.

4.3 Tratamientos de los RSU

Actualmente tanto en el país como alrededor del mundo los rellenos sanitarios son la opción más utilizada a la hora de tratar los RSU; sin embargo, esta técnica ha dejado de ser viable en muchas partes del mundo debido a la cantidad de residuos que debe ser dispuesta y el poco espacio que es destinado para su tratamiento. A continuación, se presentan descripciones de las formas de manejo de los RSU y más adelante se profundizará en las que son de importancia para el presente estudio:

Tratamientos aerobios: Utiliza microorganismos o insectos que fermentan la fracción biodegradable de los residuos sólidos. Dentro de este tipo de tratamiento se encuentra el compostaje, el vermicompostaje o lombricompostaje y el biosecado.

Tratamientos anaerobios: Es el tipo de fermentación presentada en los rellenos sanitarios. Los microorganismos, en este caso anaerobios o facultativos, realizan una degradación de los residuos lo cual genera principalmente un biogás compuesto en su mayoría por Metano.

Tratamientos térmicos: Se caracterizan por el uso de calor para tratar los residuos sólidos urbanos. Algunos procesos son la incineración, la gasificación y la pirolisis.

4.4 Rellenos sanitarios

Los rellenos sanitarios son una técnica para la disposición de residuos sólidos en el suelo que, a partir de principios de ingeniería, entierra la basura y la confina, controlando los

productos de la degradación de la materia orgánica (gases y líquidos lixiviados) mediante geomembranas y tuberías de control.

4.5 Métodos de construcción de un relleno sanitario

Dados principalmente por la topografía del terreno escogido, Meza (2012) describe tres metodologías para construir un relleno sanitario:

Método de trinchera y zanja: Utilizado en regiones planas, consiste en realizar una excavación de dos o tres metros de profundidad, dejando a un lado la tierra extraída para que sea usada como cobertura una vez se hayan depositado los residuos en la zanja.

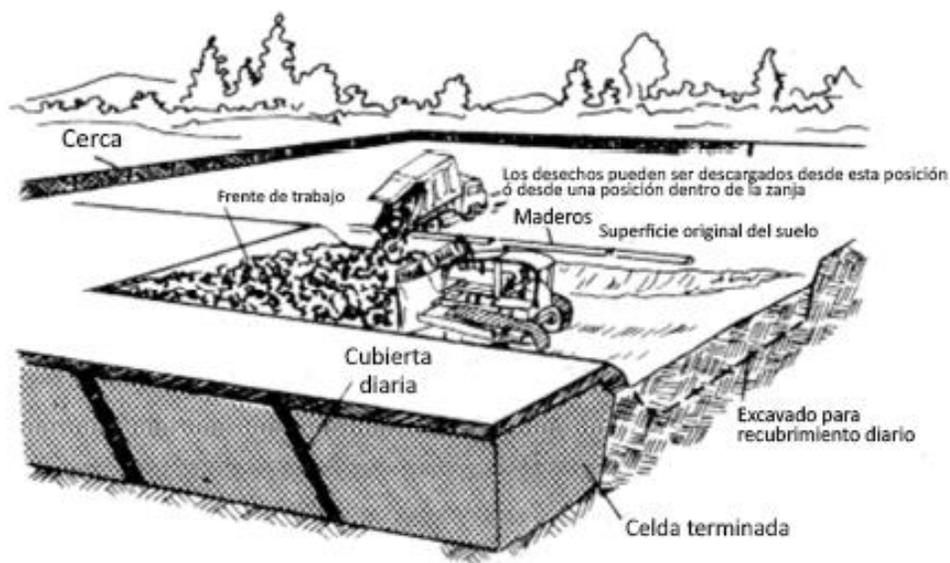


Figura 4. Método de trinchera y zanja para la construcción de un relleno sanitario. (Meza, 2012)

Método del área: Utilizado en regiones donde debido a la pendiente no es factible excavar. Los residuos son depositados directamente sobre el suelo elevando el nivel de este y son cubiertos por un material externo.

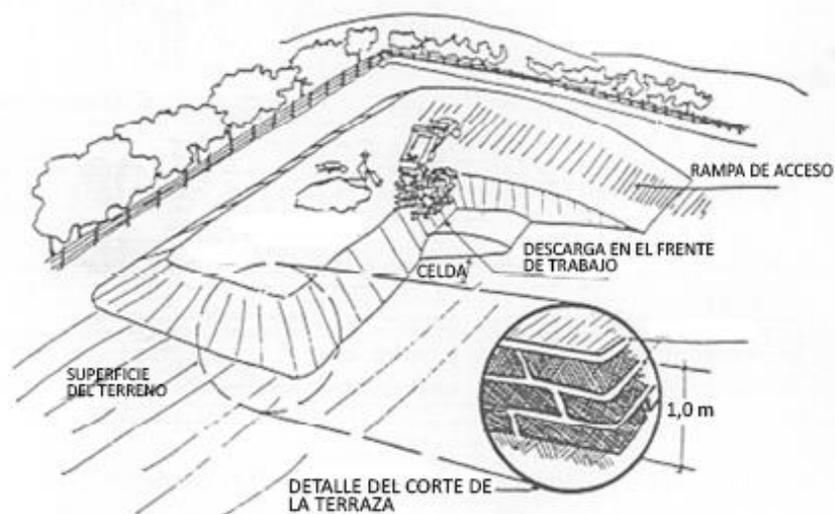


Figura 5. Método de área para la construcción de un relleno sanitario. (Meza, 2012)

Método de rampa: Es una variación del primer método en donde los residuos son depositados en pendiente y la excavación se realiza formando escalones. De igual forma, la cobertura se realiza con el material obtenido de la excavación.

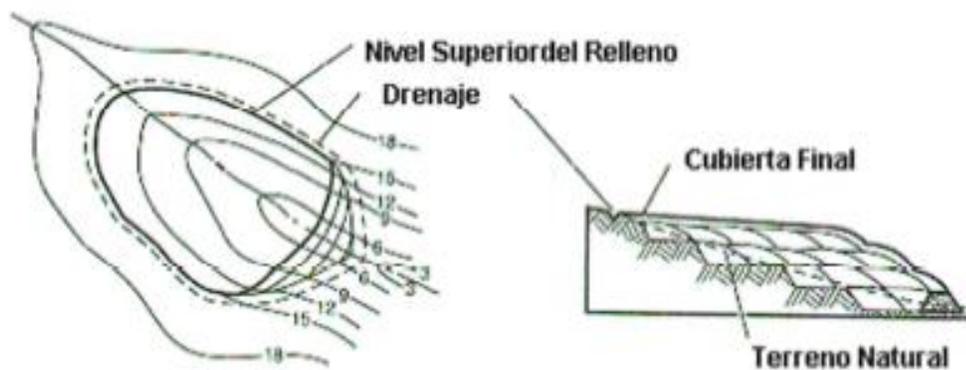


Figura 6. Método de rampa para la construcción de un relleno sanitario. (Meza, 2012)

En algunas ocasiones debido a la magnitud del área que se tiene para el relleno sanitario, los métodos son combinados para generar mayor eficiencia y aprovechar de mejor forma el terreno.

4.6 Descripción general de un relleno sanitario

Un relleno sanitario está compuesto por: (Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia, 2012)

Celda: Corresponde al volumen de material depositado en un relleno sanitario e incluye los residuos sólidos depositados y el material de cobertura con frecuencia diaria.

Berma: Tienen como objetivo mantener la estabilidad del relleno sanitario cuando su altura es considerable. También son utilizadas en la ubicación de los canales para el drenaje de aguas superficiales y tuberías para la recuperación de gas.

Impermeabilización de la celda: Los recubrimientos son diseñados para proveer la impermeabilización del volumen excavado y evitar la migración del lixiviado, deben cubrir el fondo y las superficies naturales.

Lixiviado: Líquido producido por la humedad presente en los residuos y su contacto con el agua procedente de la escorrentía superficial y/o lluvia, tiene características contaminantes.

Frente de trabajo: Lugar donde los vehículos descargan los residuos para su posterior tratamiento.

Biogás: Mezcla de gases, producto del proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica o biodegradable de los residuos, el metano y dióxido de carbono son sus principales componentes.

Los procesos de degradación que se dan en los rellenos sanitarios generan como productos gases de efecto invernadero y líquidos lixiviados los cuales deben tener también su

propio tratamiento con el fin de minimizar la contaminación que estos pueden causar en la atmosfera y en los cuerpos de agua respectivamente.

Los lixiviados son definidos como líquidos que percolan a través de la basura, llevando consigo materiales suspendidos y solubles que se originan como producto de la degradación de la basura. Medida normalmente en términos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) o Carbono Orgánico Total (TOC), la cantidad y cualidad de los lixiviados varía durante el proceso de degradación de los desechos.

En el caso de los rellenos sanitarios, los lixiviados son recolectados por medio de una capa de un material granular natural (arena, grava) o de algún material sintético de drenaje, la cual lleva el líquido a unos tubos que los transportan a un sumidero para sus posteriores tratamientos químicos y físicos como la desnitrificación, la remoción de orgánicos degradables, remoción de metano, entre otros.

Cabe resaltar que, aunque existen los procesos para minimizar el impacto de los lixiviados generados por los rellenos sanitarios, en algunos casos el tratamiento no se da y estos terminan contaminando suelos y cuerpos de agua tanto superficial como subterránea.

Aparte de los lixiviados, la degradación de basuras genera gases compuestos en su mayoría por Metano (CH_4) y Dióxido de Carbono (CO_2), con otros constituyentes a bajas concentraciones. Estos son extraídos de la parte interior del relleno sanitario mediante bombas para posteriormente ser utilizados en algunas ocasiones como generador de energía o para ser quemados en el relleno.

4.7 Valorización energética

El principio *Waste to energy* es utilizado actualmente para denotar la familia de tecnologías ya implementada en diferentes ciudades alrededor del mundo que busca disminuir el volumen ocupado por los residuos sólidos urbanos, aprovechando su capacidad calorífica para transformarlos en energía eléctrica a partir de tratamientos térmicos.

Dentro de esta clasificación de tratamiento de residuos sólidos encontramos tres grandes procesos que dependerán del tipo de combustión que se le dé al residuo sólido:

Incineración

Es el proceso de quema de residuos controlada que tiene por meta reducir el volumen y la masa de los mismos. Como consecuencia de esto, se puede recuperar energía, minerales y metales

Las temperaturas de reacción son mayores a los 850 °C y esta se da en presencia de oxígeno para conseguir una combustión completa de los residuos. Los subproductos de este proceso son principalmente emisiones atmosféricas y cenizas. (GIZ, 2017)

Pirolisis

Descompone térmicamente los residuos en ausencia total o casi total de oxígeno. Las condiciones de operación varían de acuerdo con los productos que se desee obtener. Entre estos se encuentran gas de síntesis, productos líquidos (principalmente aceites) y algunos sólidos transformables en carbón activado. Ocurre a temperaturas entre 200 °C - 1100 °C. (Steinvorth, 2014)

Gasificación

Hace referencia a la desgasificación de residuos bajo condiciones de oxígeno controladas. Las temperaturas de reacción para este proceso se dan desde los 800 °C hasta los 1000 °C y necesita de una sustancia de gasificación como el aire. La cantidad de oxígeno, al estar controlada, produce una combustión incompleta. El objetivo de la gasificación es obtener un gas de síntesis que tiene como componente principal metano (CH₄) que puede utilizarse para producir electricidad o con fines térmicos. (Steinvorth, 2014)

Cabe resaltar que, al ser un proceso de combustión incompleta, la gasificación necesita de dos cámaras de combustión. La primaria, que, mediante una combustión parcial realiza una vaporización de compuestos volátiles y la gasificación de los residuos (FEC, 2014) y una secundaria que permite el tratamiento del gas resultante de la primera fase. Este tratamiento dependerá completamente del uso que se pretenda darle al gas.

Los gasificadores son escogidos a partir de la calidad de combustible disponible, el rango de capacidad que se busca y las condiciones de calidad del gas a obtener. Los principales reactores utilizados para gasificación son:

Lecho fijo: Relativamente fáciles de operar y diseñar, son de uso común en la generación de bajas potencias eléctricas (<500 kW), debido a que producen gases limpios. Al generar baja energía utilizan una cantidad de residuos mínima por lo que son adecuados para casos en donde la cantidad de desechos es poca. (Zafar, 2009)

Lecho fluidizado: Son utilizados en procesos de mayor escala y constan de una corriente de gas (normalmente aire o vapor) que asciende a través de un lecho de combustible sólido y material como arena gruesa o piedra caliza. (Zafar, 2009)

Actualmente existen varias tecnologías del proceso de gasificación, las cuales utilizan oxígeno o nitrógeno puro para reemplazar el aire como fluido de gasificación. También existe un proceso conocido como Plasmagasificación muy similar a la pirolisis, en la que se exponen los residuos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno; sin embargo, la fuente de calor es una antorcha de descarga de plasma. Independientemente de la diferencia en los procesos, el tratamiento de residuos sólidos por gasificación tiene un esquema general.

En la Figura 7 se muestra un proceso de gasificación común a partir de residuos sólidos y FEC (2014) identifica las siguientes etapas:

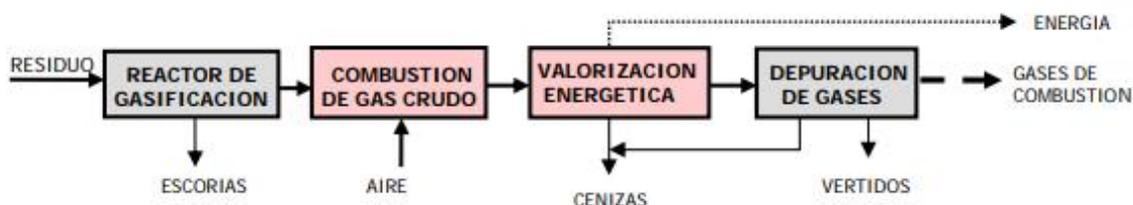


Figura 7. Proceso general del tratamiento de RSU por gasificación (FEC, 2014)

Reactor de gasificación: Transformación parcial de los residuos en gas combustible.

Combustión de gas crudo: El gas de síntesis pasa por otro proceso de combustión dependiente del aprovechamiento que se desee.

Valorización energética: Aprovechamiento energético del gas de síntesis o como materia prima para otros usos.

Depuración de gases: Proceso de eliminación de impurezas tales como alquitranes, polvo, metales, volátiles, etc.

4.8 Ventajas y desventajas de la gasificación

La gasificación tiene varias ventajas frente a otros sistemas de transformación termoquímica de residuos sólidos, debido a las condiciones de oxígeno controladas. Zafar (2009) especifica que algunas de estas son:

- Limita la formación de dioxinas y de grandes cantidades de SO_x y NO_x .
- Al utilizar menor cantidad de gas requiere procesos de limpieza mucho menos costosos.
- La generación de energía a partir del proceso de gasificación es mucho más eficiente que en los demás procesos.

Aunque algunos autores expresan que otra de las ventajas de la gasificación es la nula formación de compuestos nitrogenados, halogenados y azufrados peligrosos. La formación de contaminantes atmosféricos como compuestos halogenados y metales pesados es inevitable incluso al hacer una selección del material que se va a procesar.

4.9 Digestión anaerobia para producción de biogás

Como alternativa a los procesos térmicos anteriormente descritos, se presenta la digestión anaerobia; la cual, es utilizada para el tratamiento de los residuos orgánicos. Es un proceso natural en ausencia de oxígeno. Los microorganismos que descomponen la materia orgánica producen biogás de alto poder calorífico y un fertilizante orgánico. El biogás generado es una mezcla de diferentes gases que pueden convertirse en energía térmica y/o eléctrica. Contiene entre un 50% a 70% de metano (CH_4), principal fuente de energía en el gas (GIZ, 2017). El principio base de esta técnica es el mismo que el de un biodigestor, la diferencia radica en el tratamiento térmico del Biogás generado para producir energía.

El proceso de biodigestión anaerobia, está dado por la descomposición microbiológica de la materia orgánica, en un ambiente que presente ausencia de oxígeno y

humedad. La intervención de la población microbiana es de suma importancia, dado que permite la degradación de la materia. García y Gómez (2016) caracterizan los procesos de la biodigestión de la siguiente forma:



Figura 8. Proceso de biodigestión.

Hidrolisis: Ocurre la hidrólisis de polisacáridos, proteínas y lípidos a partir de la acción de bacterias hidrolíticas y fermentativas, éstas generan productos de bajo peso molecular como: los azúcares, los aminoácidos, los ácidos grasos y los alcoholes.

Acidogénesis: Ocurre la formación de ácido, en donde los productos de la hidrolisis se convierten en compuestos orgánicos solubles complejos y se dividen en ácido orgánicos de cadena corta.

Acetogénesis: Los productos de la etapa anterior como el propionato, butirato y etanol deben ser oxidados a acetato, anhídrido carbónico e hidrógeno.

Metanogénesis: Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes en el proceso de digestión anaerobia, dado que como su nombre lo indica son los responsables de la formación del gas metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores.

4.10 Antecedentes del RSDJ

La dirección de aseo de la Secretaria de Higiene asumió en el año 1940 las funciones de aseo público que eran realizadas por la Sociedad de Ornato. Para el año 1958 el Concejo Municipal del Distrito Especial de Bogotá creó la empresa Distrital de Aseo que se llamaría en

1960 como la Empresa Distrital de Servicios Públicos (EDIS) asignándole además del servicio público de aseo, el servicio de aseo en los mataderos, plazas de mercado y cementerios.

Para la definición de sitios y diseño de disposición final de los residuos sólidos generados en Bogotá, Soacha, Funza, Madrid y Mosquera, la CAR contrató al consorcio Ingesam – URS en el año 1984. Para este mismo año se le encargó a la EDIS los estudios preliminares y el posterior diseño del relleno sanitario. En el año 1986 se da inicio a la operación de este, el que hoy en día es denominado como la Zona Antigua, a raíz de esto se da el cierre a los botaderos El Cortijo y Gibraltar que funcionaban disponiendo los residuos a cielo abierto. Para el año 1989 la EDIS encargó la operación del relleno a PROSANTA.

En el año 1992 la EDIS contrató la firma de HIDROMECHANICAS LTDA con el fin de realizar los diseños de ampliación del RSDJ (Zona II, Zona V, Zona IV y Zona VI). Estos incluyeron aspectos tales como realizar la impermeabilización mediante el uso de geomembrana, la modificación en las alturas de la celda y además se formuló la recirculación como sistema de tratamiento de lixiviados para las nuevas zonas. La operación de la Zona II inició el año 1995, posteriormente, en septiembre de 1997, presentó un deslizamiento de aproximadamente 800.000 m³ de residuos sólidos, a partir de este acontecimiento y como respuesta ante la emergencia fue necesario realizar la adecuación de una nueva área para recolectar los residuos provenientes del deslizamiento.

La UESP en el año 1998 a través de la firma ESCO de Latinoamérica, instaló un sistema de extracción forzada de biogás con el fin de hacer más efectiva la extracción de gases y lixiviados, ayudando a la disminución de la presión interna mejorando de esta forma las condiciones de estabilidad geotécnica del mismo.

Por otra parte, en el año 1999 se contrataron los diseños de una planta para el tratamiento de todos los lixiviados del RSDJ. Para el mismo año se puso en marcha el Plan Maestro de Residuos Sólidos contratado con la firma alemana FISCHNER, el cual buscó definir las estrategias y tecnologías futuras para el manejo y disposición final de los residuos sólidos de Bogotá. Posteriormente se dio inicio la construcción de la planta de lixiviados en abril del año 2000.

El Centro de Gerenciamiento de Residuos -CGR- Doña Juana S.A E.S. P es el actual operador del relleno sanitario, el cual cuenta con una vida útil hasta el año 2022 (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015). Esta vida útil fue ampliada por la CAR en 7,6 años a razón de 8.300 Ton/día.

Con el fin de disminuir los impactos negativos al ambiente generados por la disposición de los RSU, la Alcaldía Mayor de Bogotá considera necesaria la implementación de nuevos procesos y tecnologías limpias. Por lo anterior, se adopta el programa Basura Cero el cual hace referencia a planes desarrollados a nivel mundial que buscan disminuir la basura llevada a disposición final (Bello, Bravo, Charczuk y Sobrino, 2012).

A partir de una visita realizada en el año 2007 por SCS Engineers y la información proveída por la UAESP, se realizó un informe del relleno que tuvo como propósito general una evaluación preliminar de la cantidad de biogás potencialmente disponible a ser colectado del relleno sanitario y las posibles opciones para la utilización del mismo, dentro de éstas se identificaron:

- Producción de energía eléctrica.
- Uso directo para evaporación de lixiviados.
- Combustión.

El Ministerio de Energía y Minas encontró aceptable un proyecto de generación de electricidad mediante el uso del biogás generado por los residuos sólidos dispuestos en el RSDJ. (SCS Engineers, 2007)

4.11 Aplicaciones internacionales

La generación de residuos aumenta a un ritmo alarmante y aunque este es un tema que las personas tienen presente, los países están desarrollándose rápidamente sin haber establecido sistemas adecuados para gestionar la distinta composición de residuos que producen los ciudadanos.

Los gases de efecto invernadero provenientes de los RSU son un factor fundamental que contribuye al cambio climático. De las emisiones atmosféricas a nivel mundial en el año 2016, el 5 % provenían de la gestión de los residuos sólidos, sin tener en cuenta las emitidas por el transporte de los mismos. (Banco Mundial, 2018)

La disposición inadecuada de residuos en los rellenos sanitarios no tecnificados, es un problema de contaminación global; dado que estas malas prácticas facilitan la contaminación de todos los elementos del medio que entren en contacto con los residuos. Además de la generación de lixiviados, producto de la descomposición de los residuos sólidos orgánicos los cuales son generadores de biogás, que aportan a la aceleración del efecto invernadero.

Según el informe *What a waste 2.0* para el año 2050, se prevé que a nivel mundial se generaran 3,40 billones de toneladas de residuos, incrementando los 2,01 billones de toneladas actuales (Kaza, Yao, BhadaTata y Woerden, 2018). La composición y generación de los residuos sólidos en el mundo varía dependiendo de la región y país, así mismo los índices de generación que están principalmente asociados al status económico.

En el último informe del Banco Mundial se reporta que en los países de ingreso más bajo el 90% de los residuos no se gestiona. Además, se estimó que, en países de ingresos medios y bajos, el 54% de residuos generados son orgánicos, el 16% son papel y el 12% son plásticos (Martínez, et al., 2015).



Figura 9. Generación de desechos a nivel regional por año (Banco Mundial, 2018).

A diferencia de lo anterior en los países de ingreso alto se proveen servicios universales de recolección de residuos, y son recuperados a través del reciclaje, el compostaje y la valorización energética.

La transición a una gestión sostenible de los residuos requiere de esfuerzos duraderos y de una inversión económica alta, siendo determinada como una de las inversiones económicas más importante para los gobiernos locales. Desde un punto de vista económico, invertir en la gestión sostenible de los residuos si es factible.

En la actualidad, los tratamientos eco ambientales como el reciclaje y el compostaje han tomado gran fuerza en las sociedades, esto se puede ver evidenciado en el informe Gestión de los residuos: Tendencias en el tratamiento de residuos urbanos en Europa del año 2016:

Tabla 1. Aplicaciones a nivel mundial para la disposición final de los residuos sólidos.

PAÍS	APLICACIÓN
GRECIA	En el año 2012 el 82% de los residuos se depositaron en un relleno y solo el 16% se recicló.
LITUANIA	El 100% de los residuos es almacenado en rellenos. En el año 2004 se inicia la ruta hacia el reciclaje, para en el año 2013 la cifra del reciclaje fue del 21% y la incineración del 15% de los residuos.
ALEMANIA	A pesar de ser uno de los países que más residuos produce no hacen uso de rellenos. La disposición de residuos está enmarcada en tratamientos ecológicos, siendo así desde el año 1995, el 18% de los residuos es usado para compostaje, el 47% se recicla y el 35% se incinera.
REPUBLICA CHECA	La disposición de residuos en rellenos es de 56%. El 20% ha sido tratado mediante incineración y el restante ha sido llevado a compostaje.
FRANCIA	Disminuyó en 1,29% la cantidad de desechos producidos por persona, el 28% de los residuos es llevado a rellenos, el 34% tratado mediante incineración, el 21% es reciclado y el 17% se utiliza en compostaje.
ESLOVAQUIA	El 77% de los desechos es dispuesto en rellenos y un 12% es procesado mediante incineración. Estos porcentajes se espera descieran considerablemente después del inicio del compostaje y el reciclaje, además, una empresa financiada por la Unión Europea ha desarrollado un método a través del cual se pueden reprocesar los residuos de la industria automotriz y convertirlos en una nueva materia prima.
POLONÍA	El 100% de la disposición de residuos se hace en rellenos, pero es de los países que menos residuos generan al año por persona, tan sólo 297 kg por persona. En la actualidad el porcentaje ha disminuido hasta el 63%, gracias a la implementación del reciclaje y el compostaje.
ITALIA	La disposición de desechos en rellenos es de 38%, se recicla un 26%, se compostan un 15% y mediante valorización energética se procesa el 21% de los residuos.
FINLANDIA	El tratamiento de residuos mediante incineración abarca un 42%, el uso de rellenos un 25%, el reciclaje un 19% y el compostaje un 13%.
BÉLGICA	Le apuestan principalmente a la incineración, seguido del reciclaje en un 34%, el compostaje en un 21% y el restante a disposición en rellenos.
LUXEMBURGO	El tratamiento de residuos más usado es la valorización energética, mediante incineración se procesa el 35%, 28% se recicla, el 17% es depositado en rellenos y el 20% se compostan.

PAÍS	APLICACIÓN
RUMANÍA	Aunque es el país con menor volumen de residuos generados, es preocupante que el 97% de estos son dispuestos en rellenos y solo el 3% es gestionado mediante el reciclaje.
CROACIA	El manejo de los residuos se distribuye en un 14% en reciclaje, 2% en compostaje y el restante en disposición en rellenos.
AUSTRIA	El uso de rellenos corresponde al 4%, el 37% a la incineración, el 24% al reciclaje y el 35% al compostaje.
PAÍSES BAJOS	El método mayormente usado es la valorización energética mediante la incineración de los residuos con un 49%, seguido del reciclaje y el compostaje, solo el 1% es destinado en rellenos.
CHIPRE	El uso de rellenos para la disposición de los residuos es del 79%, un 12% para el reciclaje y un 9% para plantas de compostaje.
DINAMARCA	La incineración es el tratamiento generalizado con un porcentaje entre el 52% y 56%, el uso de rellenos un 2%, el reciclaje un 28% y el compostaje un 17%.
SUECIA	Aunque el uso de rellenos era de suma importancia hoy en día este ha disminuido al 1%, manejando entre un 38% y 52% la incineración, el reciclaje en un 36% y el 16% en plantas de tratamiento de compostaje.
HUNGRÍA	La implementación del reciclaje de residuos sólidos ocupa un 21%, la incineración 9%, el uso de plantas de compostaje 5% y el 25% se dispone en rellenos.
PORTUGAL	El uso de rellenos para desechos es de 55%, la incineración un 21% y el manejo mediante compostaje de un 13%.
MALTA	La implementación de plantas de compostaje para el tratamiento final de residuos es de 23% y el restante es dispuesto en rellenos.
LETONIA	La mayoría de los residuos generados son dispuestos en rellenos, tan solo el 11% es reciclado y el 6% es destinado a compostaje.
REINO UNIDO	El 35% de los residuos generados es dispuesto en rellenos, el 28% se recicla, el 16% se composta y el 21% se procesa mediante la valorización energética (incineración).
ESPAÑA	Un 30% de los residuos generados son tratados mediante reciclaje y plantas de compostaje y un 70% es dispuesto en rellenos.
IRLANDA	El manejo de los residuos se divide en 42% para la disposición en rellenos, el 34% al reciclaje y un 6% al tratamiento en plantas de compostaje.

PAÍS	APLICACIÓN
BULGARIA	A partir del año 1998 se empleó el método del reciclaje con un 25% y el restante en la disposición a rellenos.
ESTONIA	La incineración o valorización energética maneja el 64% del manejo de residuos, el 34% mediante reciclaje y por último el 2% es dispuesto en rellenos.
ESLOVENIA	La implementación de metodologías ecológicas ha sido un proceso lento para este país, pero en la actualidad el porcentaje el uso de rellenos es de 38%, del reciclaje 55% y del manejo mediante compostaje e incineración es del 8%.

4.12 Políticas nacionales

El contexto normativo legal en Colombia referente al manejo de residuos sólidos es amplio. A continuación, se relacionan las principales normas que rigen el manejo de RSU a nivel nacional:

- Ley 9 del 24 de enero de 1979, por la cual se dictan las medidas sanitarias sobre el manejo y disposición de residuos sólidos. (Congreso de Colombia, 1979)
- Documento CONPES 2750 del 21 de diciembre de 1994, el cual es una política nacional ambiental sobre el manejo integral de residuos sólidos. (República de Colombia, 1994)
- Resolución 1045 del 26 de septiembre de 2003, por la cual se adopta la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS, y se toman otras determinaciones. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2003)
- Decreto 2981 del 20 de diciembre de 2013, por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2013)

4.13 Simulación

La simulación de procesos es la construcción de modelos informáticos que describen el comportamiento de un sistema real o hipotético, mediante el diseño informático, con

el fin de entender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias, para apoyar al usuario en la toma de decisiones. (Martínez y Porras, 2015)

Además de tener enormes aplicaciones industriales y comerciales, la simulación tiene gran importancia para la solución de problemas en la ingeniería, biología, medicina, informática, química y otras áreas.

Ventajas y desventajas

Utilizar la simulación como metodología de trabajo ofrece algunas ventajas y desventajas que se deben tener en cuenta, algunas de estas expresadas por Martínez y Porras (2015) son citadas a continuación:

Ventajas

- Hace posible estudiar y experimentar con las interacciones complejas de un sistema dado.
- Desarrollo de habilidades por medio de sonidos, imágenes y textos.
- Permite estudiar el efecto de cambios ambientales, organizacionales y de operación en planta.
- Disminuye la brecha entre la teoría académica y la práctica laboral.

Desventajas

- Los modelos de simulación son costosos y requieren tiempo para su desarrollo.
- Se requiere de varias ejecuciones para obtener estimaciones exactas y para minimizar la probabilidad de tomar una mala decisión.
- Existen restricciones y limitaciones dependiendo del software utilizado, por falta de recursos económicos y materiales o falta de actualización del programa.

4.14 Software de simulación ASPEN HYSYS

Aspen HYSYS® es una herramienta computacional de simulación de procesos, especialmente para plantas petroquímicas y afines. Ha sido específicamente creada teniendo en cuenta lo siguiente: capacidades ingenieriles, arquitectura de programa, operación interactiva y diseño de interface.

Luque y Vega (como se citó en Martínez y Porras, 2015) expresan que “La gran cantidad de componentes que comprende la librería de Aspen HYSYS® proveen un enfoque extremadamente poderoso. Sus operaciones y propiedades permiten modelar una extensa gama de procesos con mayor confianza.”

5. METODOLOGÍA DEL DISEÑO CONCEPTUAL DEL TRATAMIENTO DE RSU

5.1 Diseño conceptual para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos inorgánicos

En esta sección se presenta el proceso propuesto para tratar la fracción inorgánica de los RSU que llegan al RSDJ. Se calculó la fracción combustible inorgánica del total de los residuos y en conjunto con la revisión bibliográfica se obtuvieron los demás parámetros necesarios para simular las operaciones del proceso en los softwares SuperPro Designer y Aspen HYSYS. La evaluación económica se realizó en Aspen Process Economic Analyzer V10.

De esta manera se obtuvo la cantidad de energía generada por la fracción inorgánica de los residuos y también una aproximación a la capacidad que debe tener cada uno de los equipos que hacen parte del proceso de tratamiento de estos desechos. Todos los cálculos realizados se encuentran explícitos en el Anexo 1.

Finalmente se realizó un análisis del abastecimiento energético que puede llegar a proporcionar la energía generada por el proceso a la población de la ciudad con el fin de determinar su beneficio e impacto social.

El proceso para el tratamiento de residuos sólidos urbanos constó inicialmente de la recepción de los residuos sólidos y su clasificación en inorgánicos y orgánicos, si este proceso no se ha realizado previamente en los hogares y/o recolección.

Posterior a esta clasificación los residuos inorgánicos entraron a un proceso de gasificación en el horno de incineración, en donde se produjo un gas de síntesis de alto poder calorífico. Luego, estos gases de síntesis pasaron por una caldera donde es quemado y eleva la temperatura del agua hasta generar vapor. El vapor de agua pasó por una serie de turbinas en donde

se generó la energía eléctrica. En la Figura 10 se muestra el diagrama de bloques de la propuesta de aprovechamiento del material inorgánico.

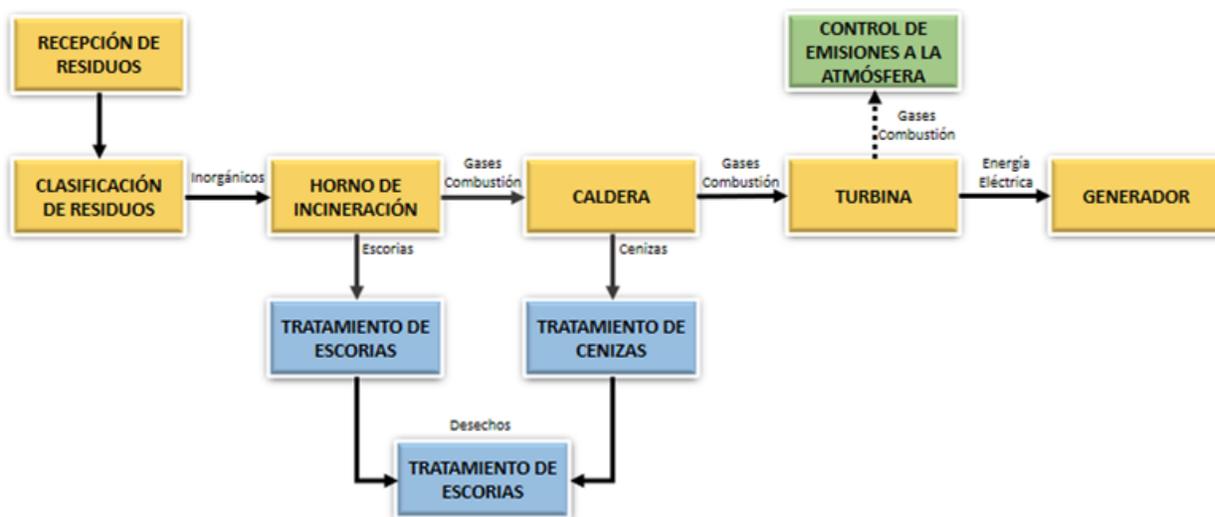


Figura 10. Esquema general del proceso propuesto para el tratamiento de RSU inorgánicos.

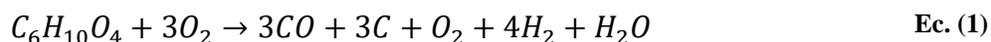
El diseño conceptual para el aprovechamiento de los residuos inorgánicos del Relleno Sanitario de Doña Juana se realizó teniendo en cuenta que las toneladas al día promedio recibidas son 6.266,12 (Relleno Sanitario de Doña Juana, 2017). Debido a su composición netamente inorgánica se excluyeron materiales como los metales y vidrios para dar paso a componentes con un mayor poder calorífico como el plástico, el papel, el cartón y los textiles.

La fracción de estos cuatro materiales fue obtenida relacionando la cantidad de desechos depositados en el relleno sanitario con el porcentaje de la caracterización física de los residuos reportada para Colombia por la Fundación Universitaria Iberoamericana. La siguiente tabla muestra el porcentaje de los elementos seleccionados para la combustión (plásticos, papel, cartón y textiles) y las toneladas por día obtenidas de la relación.

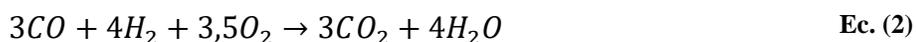
Tabla 2. Porcentaje y cantidad de toneladas diarias correspondientes a la clasificación de los RSU para el tratamiento inorgánico.

	PORCENTAJE (%)	TONELADAS / DÍA
PLÁSTICOS	14,2	889,80
PAPEL – CARTÓN	18,3	1.146,72
TEXTIL	3,8	238,12
TOTAL		2.274,64

Ducharme C. y Themelis N. en el año 2010 establecieron que la formula empírica para la fracción combustible de los residuos sólidos es $C_6H_{10}O_4$ y que la reacción de oxidación en un gasificador con fines de una combustión parcial es:



De igual forma establecieron una segunda reacción química para la generación de los gases de turbina:



Debido a que el proceso de combustión requiere oxígeno. Se calculó la cantidad de este elemento que reacciona a partir de estequiometría con la ecuación (1). Posterior se calculó la cantidad de aire total necesitada para el proceso con un porcentaje de exceso del 20%.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan en la Tabla 3 las condiciones iniciales para la simulación del tratamiento de los residuos inorgánicos del Relleno Sanitario de Doña Juana.

Tabla 3. Condiciones iniciales para simulación del tratamiento de RSU inorgánicos.

Cantidad de residuos inorgánicos que entran en el proceso de combustión (Inerte)	2.274,64 ton / día
Cantidad de aire inicial en el proceso	6.135,58 ton / día
Porcentaje de rendimiento de la reacción	100 %
Temperatura inicial	25° C
Presión inicial	1,013 bar
Tipo reactor	Adiabático

Posterior a esto, con la información anteriormente descrita y a partir de los procedimientos especificados en la Figura 10, se simuló el horno de gasificación en Super Pro Designer.

En la Figura 11, se muestra la simulación del proceso de gasificación, en que las dos corrientes de entrada hacen referencia al residuo y al aire necesario para el proceso. Y la corriente de salida contiene el gas de síntesis generado.

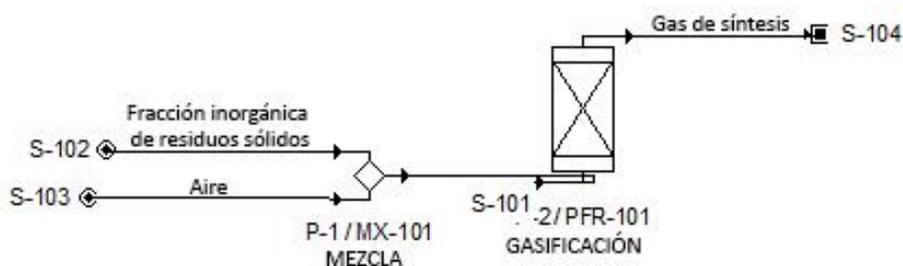


Figura 11. Simulación de la gasificación en Super Pro Designer.

Debido a que los modelos para las turbinas en Super Pro Designer no permitió predecir satisfactoriamente la producción energética, se simuló en Aspen HYSYS V10 las demás unidades de procesamiento, así como la integración con el proceso orgánico.

Aspen HYSYS V10 ofreció la posibilidad de colocar intercambiadores de calor que integran térmicamente las corrientes del proceso. Además, permitió la generación de energía eléctrica a partir del vapor de agua producto del intercambio de temperaturas.

En la Figura 12 se presenta la simulación correspondiente a Aspen HYSYS V10, que contiene los siguientes equipos:

Tabla 4. Equipos utilizados en la simulación del tratamiento de residuos inorgánicos.

EQUIPO	TAG
Intercambiadores de Calor	E-100, E-102, E-104, E-105, E-107
Horno de Combustión	CRV-100
Turbinas	K-101, K-102, K-103, K-105
Compresores	K-100

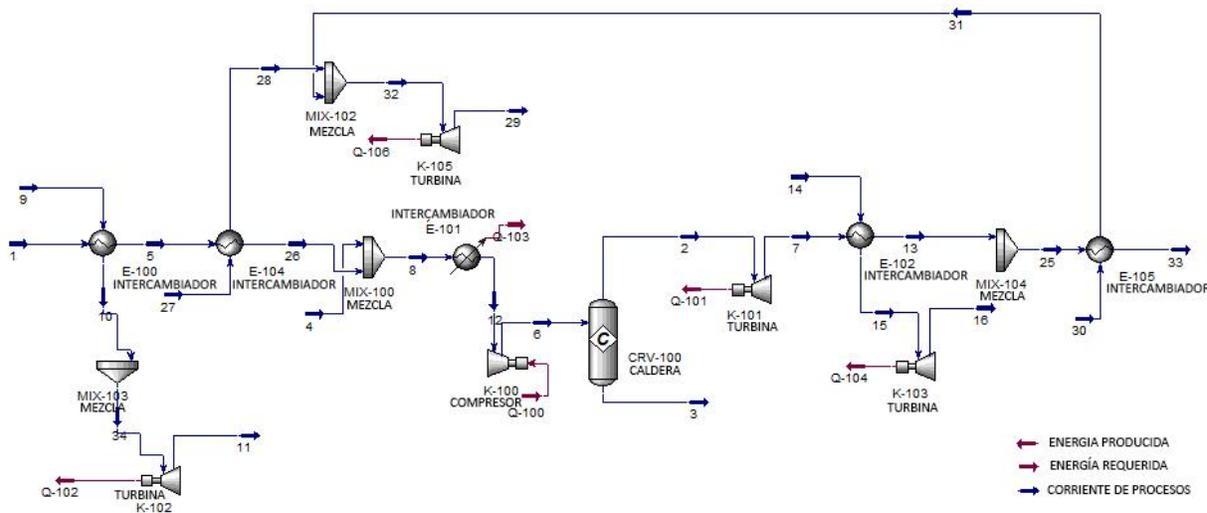


Figura 12. Simulación final en el software Aspen HYSYS.

5.2 Diseño conceptual para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos orgánicos

En este apartado se presenta la simulación de la segunda metodología propuesta para el tratamiento de los RSU del RSDJ, correspondiente al uso de los compuestos orgánicos para la generación de gas metano que permitirá obtener la energía eléctrica mediante el movimiento de una turbina.

De la misma manera que en el capítulo 5.1 se realizaron los cálculos para obtener la fracción orgánica de los residuos sólidos y finalmente se obtuvieron por literatura las condiciones que permitieron la simulación en ASPEN HYSYS V10 para así realizar un análisis de la capacidad de abastecimiento de energía eléctrica que puede tener el tratamiento de residuos por este método. Todos los cálculos realizados se encuentran explícitos en el Anexo 1.

Para la realización del diseño del componente orgánico se usaron los softwares SuperPro Designer y Aspen Hysys como herramientas para la modelación y evaluación de los procesos integrados en la utilización de la fracción orgánica de los residuos sólidos como compost para la producción de biogás. La evaluación económica fue realizada en Aspen Process Economic Analyzer.

En la Figura 13, se muestra el esquema general de la simulación, que consistió en la producción de metano a partir de la fermentación de la fracción orgánica de los residuos sólidos. Este gas, pasó a un proceso de combustión en una caldera que finalmente se encargó de la producción de energía mediante una turbina.

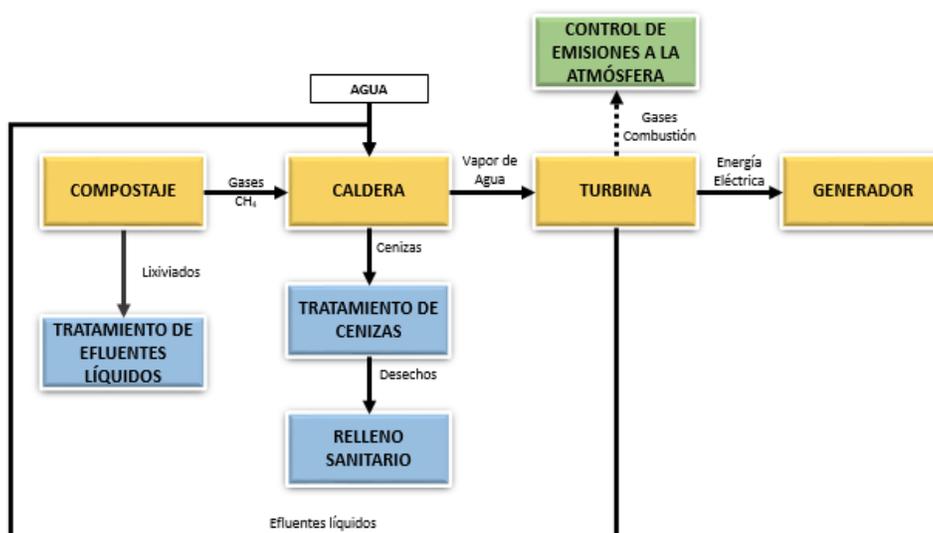
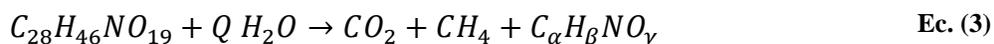


Figura 13. Esquema general del proceso propuesto para el tratamiento de RSU orgánicos.

Ayeleru, O. O., Ntuli, F., y Mbohwa, C. en 2016 establecieron la fórmula empírica para la fracción orgánica de los residuos sólidos, siendo esta $C_{28}H_{46}NO_{19}$, que junto con el compuesto H_2O conforman los reactivos de la ecuación establecida para la parte orgánica de los residuos sólidos, esta se muestra a continuación:



Como se observa, la reacción química no está balanceada y se hace necesario obtener tanto los coeficientes estequiométricos como los subíndices del componente correspondiente al abono orgánico resultante del proceso de fermentación de la materia orgánica. A continuación, se muestra todo el proceso realizado para obtener estos valores:

Themelis, N. J., & Ulloa, P. A. en el año 2007, determinaron los porcentajes correspondientes a la concentración media de cada gas producido (CH_4 , CO_2 , N_2) como se muestra en la Tabla 5. Además, determinaron que se generan 0,149 toneladas de CH_4 generadas por cada tonelada de residuos sólidos.

Tabla 5. *Porcentajes de concentración de gases producidos en el proceso.*

	PORCENTAJE (%)
CH₄	50
CO₂	45
N₂	5
TOTAL	100

Con lo anterior se calculó la cantidad de gases producidos en el proceso de fermentación. Para lo cual inicialmente fue obtenida la fracción orgánica de los residuos sólidos a partir de la diferencia entre el valor total de toneladas dispuestas por día en el RSDJ (6.266,23) y las toneladas por día de la fracción inorgánica (2.274,64).

$$6.266,13 \frac{\text{ton}}{\text{día}} \text{RSU} - 2.274,64 \frac{\text{ton}}{\text{día}} \text{Fracción Inorgánica} = 3.991,59 \text{ ton residuos orgánicos día} \quad \text{Ec. (4)}$$

Una vez obtenida la fracción orgánica, esta se relacionó con el valor establecido por Themelis, N. J., & Ulloa, P. A. para obtener el total de metano producido diariamente.

$$1 \text{ ton MSW} \rightarrow 208 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \rightarrow 0,149 \text{ ton CH}_4 \quad \text{Ec. (5)}$$

$$3.991,59 \text{ ton MSW} \rightarrow x \text{ ton CH}_4 = 594,75 \text{ ton} \frac{\text{CH}_4}{\text{día}} \quad \text{Ec. (6)}$$

Para realizar el balance estequiométrico de la reacción química es necesario que las cantidades estén en moles. Por lo tanto, se realizaron las respectivas conversiones.

A partir de las moles de la fracción orgánica y su respectiva producción de metano, se calculó el coeficiente estequiométrico del gas.

$$5.696.900 \text{ mol } C_{28}H_{46}NO_{19} \rightarrow 37.171.875 \text{ mol CH}_4 \quad \text{Ec. (7)}$$

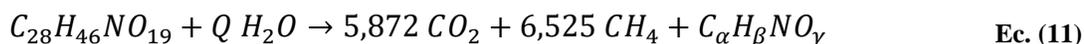
$$1 \text{ mol } C_{28}H_{46}NO_{19} \rightarrow x \text{ mol CH}_4 \quad \text{Ec. (8)}$$

$$6,525 \text{ mol} \rightarrow \text{CH}_4 \quad \text{Ec. (9)}$$

Una vez calculado el coeficiente estequiométrico del metano, con los valores de la Tabla 5 se obtuvo el coeficiente estequiométrico del Dióxido de Carbono (CO₂).

$$6,525 \text{ mol CH}_4 * \frac{0,45 \text{ CO}_2}{0,50 \text{ CH}_4} = 5,872 \text{ mol CO}_2 \quad \text{Ec. (10)}$$

A continuación, se muestra la reacción química con los coeficientes de los productos obtenidos:



Una vez realizado lo anterior, se calculó el coeficiente estequiométrico del agua y los subíndices del último producto correspondiente al abono orgánico a partir de un balance de

masas entre todos los subíndices de la reacción. Las ecuaciones iniciales para el procedimiento son:

$$\rightarrow 28 = 6,525 + 5,872 + \alpha \quad \text{Ec. (12)}$$

$$\rightarrow 46 = 2Q = 4(6,525) + \beta \quad \text{Ec. (13)}$$

$$\rightarrow 1 = \theta \quad \text{Ec. (14)}$$

$$\rightarrow 19 + Q = 2(5,872) + \gamma \quad \text{Ec. (15)}$$

$$\rightarrow \frac{1}{(\alpha + \beta + \gamma)} = \theta \quad \text{Ec. (16)}$$

Continuando con el procedimiento, se realizó el despeje de las ecuaciones para reemplazarlas en la Ecuación (16). Posterior a esto se obtuvo el valor de Q (coeficiente estequiométrico del agua) para que este finalmente pudiera ser reemplazado en las Ecuaciones (13) y (15) para encontrar beta y gamma.

La fórmula empírica obtenida del abono orgánico para la reacción química se presenta en la Ecuación (17).



Finalmente, se determinó la cantidad de agua que va a ser utilizada en el proceso mediante la estequiometria de las moles de materia orgánica dispuestas.

$$5.696.900 \text{ mol } C_{28}H_{46}NO_{19} * \frac{2,414 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } C_{28}H_{46}NO_{19}} * \frac{18 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} * \frac{1 \text{ ton } H_2O}{1.000.000 \text{ g } H_2O} = 247,54 \text{ ton } H_2O \quad \text{Ec. (18)}$$

El valor correspondiente a la cantidad de agua inicial requerida por el proceso es de 247.54 ton/día, esta cifra corresponde a 0,00287 m³/s, como se muestra en la ecuación 18. Lo que demuestra que la captación del recurso hídrico en este caso del río Tunjuelo no generaría un

impacto sobre su cauce, dado que el promedio anual del río es de $2,16 \text{ m}^3/\text{s}$ como es reportado por Suarez, R. y Buitrago C. en el estudio Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá D.C del año 2004.

La Tabla 6 muestra los parámetros requeridos en la simulación:

Tabla 6. *Condiciones iniciales para simulación del tratamiento de RSU orgánicos.*

Cantidad de residuos orgánicos que entran en el proceso de fermentación	3.991,59 ton / día
Cantidad de agua inicial en el proceso	247,54 ton / día
Porcentaje de rendimiento de la reacción	100 %
Temperatura inicial	25° C
Presión inicial	1,013 bar

El proceso de fermentación o digestión anaerobia se simuló en Super Pro Designer. La Figura 14 muestra la simulación en donde las corrientes de entrada hacen referencia a la fracción orgánica de los residuos sólidos y el agua ingresada al reactor; y, la corriente de salida específica la cantidad de biogás y abono orgánico generados.

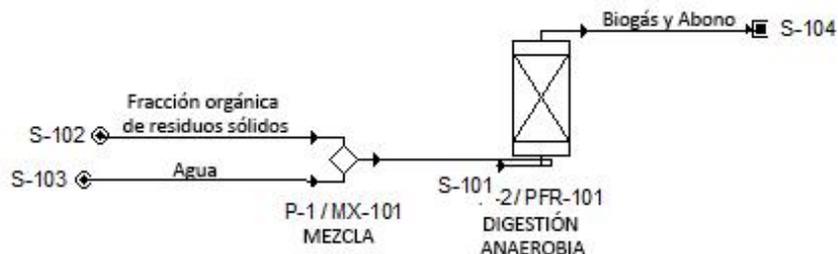


Figura 14. Simulación de la gasificación en Super Pro Designer.

La Figura 15 muestra el proceso simulado en el software Aspen HYSYS V10, donde la corriente de entrada para este proceso corresponde a la resultante de Super Pro Designer. El proceso en el segundo software comienza en la combustión del gas metano para la obtención de energía eléctrica; de igual manera que en el proceso inorgánico se realizaron las conversiones

correspondientes para ingresar los valores a Aspen HYSYS V10. Al igual que en la propuesta de tratamiento para los residuos inorgánicos se agregaron intercambiadores de calor para disminuir las temperaturas de las corrientes de salida.

La simulación del tratamiento orgánico de los residuos consta de los siguientes equipos:

Tabla 7. Equipos utilizados en la simulación del tratamiento de residuos inorgánicos.

EQUIPO	TAG
Intercambiadores de Calor	E-103
Horno de Combustión	CRV-101
Turbinas	K-106, K-107
Compresores	K-104

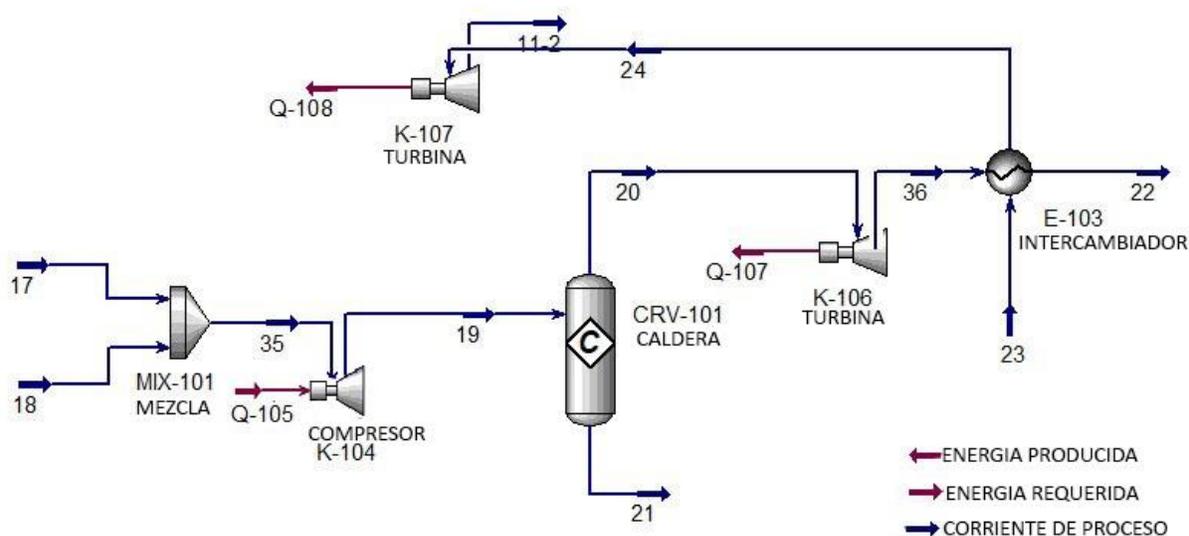


Figura 15. Simulación final en el software Aspen HYSYS.

5.3 Unión de los diseños conceptuales para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos

Con la finalidad de realizar la evaluación económica de todo el proyecto, se unieron de los procesos para el tratamiento orgánico e inorgánico de los RSU, mediante la unión de las

corrientes 24 y 22 del proceso orgánico. La Figura 16 muestra el esquema del proceso resultante de la unión de los dos tratamientos.

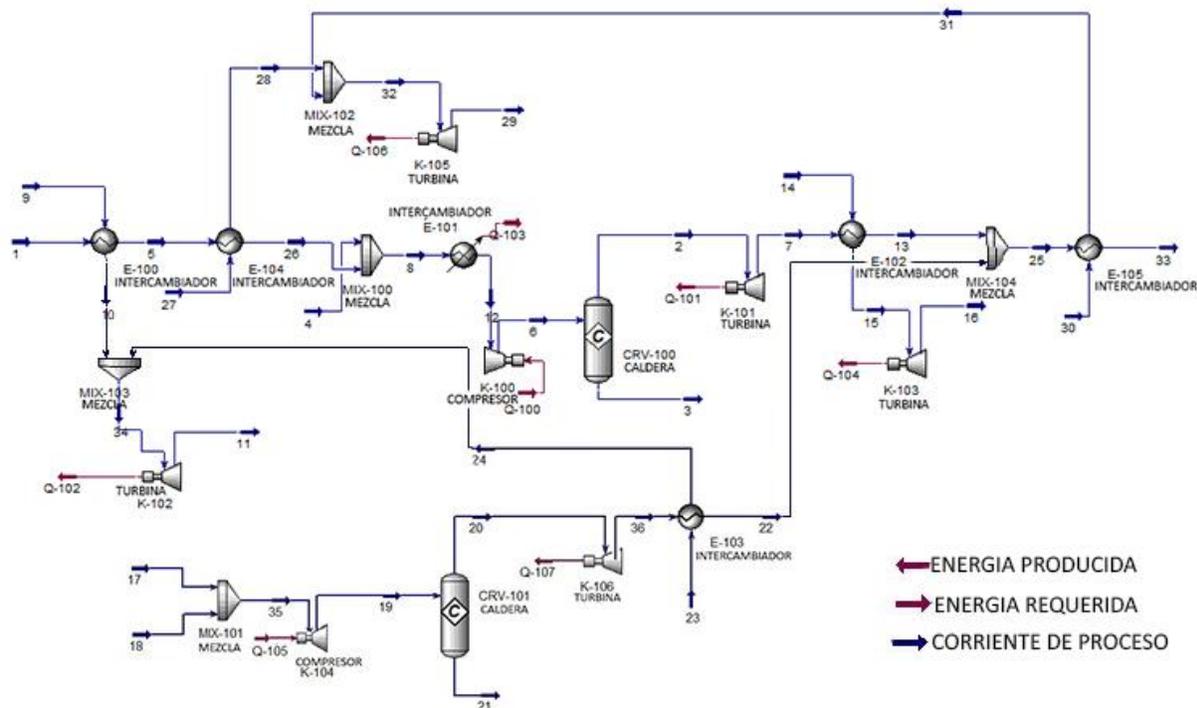


Figura 16. Simulación conjunta de los procesos orgánico e inorgánico

En la tabla 8 se encuentran cada uno de los componentes contenidos por las corrientes presentadas en la figura 16, tales como monóxido de carbono, hidrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, agua, nitrógeno y metano con sus respectivos porcentajes.

Tabla 8. Componentes y porcentajes contenidos por corriente.

CORRIENTE	CO	H	O	CO ₂	H ₂ O	N	CH ₄	TOTAL
1	13,87%	18,47%	0,00%	13,87%	4,62%	49,15%	0,00%	100%
2	0,00%	0,00%	0,97%	16,34%	13,62%	69,07%	0,00%	100%
3	0,00%	0,00%	0,97%	16,34%	13,62%	69,07%	0,00%	100%
4	0,00%	0,00%	20,75%	0,00%	0,00%	79,25%	0,00%	100%
5	13,87%	18,49%	0,00%	13,87%	4,62%	49,15%	0,00%	100%
6	7,46%	9,94%	9,59%	7,46%	2,49%	63,06%	0,00%	100%
7	0,00%	0,00%	0,97%	16,34%	13,62%	69,07%	0,00%	100%

CORRIENTE	CO	H	O	CO₂	H₂O	N	CH₄	TOTAL
8	7,46%	9,94%	9,59%	7,46%	2,49%	63,06%	0,00%	100%
9	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
10	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
11	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
12	7,46%	9,94%	9,59%	7,46%	2,49%	63,06%	0,00%	100%
13	0,00%	0,00%	0,97%	16,34%	13,62%	69,07%	0,00%	100%
14	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
17	0,00%	0,00%	0,00%	45,00%	0,00%	5,00%	50,00%	100%
18	0,00%	0,00%	22,01%	0,00%	0,00%	77,99%	0,00%	100%
19	0,00%	0,00%	18,60%	6,97%	0,00%	66,80%	7,75%	100%
20	0,00%	0,00%	3,10%	14,72%	15,50%	66,80%	0,00%	100%
21	0,00%	0,00%	3,10%	14,72%	15,50%	66,68%	0,00%	100%
22	0,00%	0,00%	3,10%	14,72%	15,50%	66,68%	0,00%	100%
23	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
25	0,00%	0,00%	1,99%	15,56%	14,52%	67,92%	0,00%	100%
26	13,87%	18,49%	0,00%	13,87%	4,62%	49,15%	0,00%	100%
27	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
28	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
29	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
31	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
32	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
33	0,00%	0,00%	1,99%	15,56%	14,52%	67,92%	0,00%	100%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
35	0,00%	0,00%	18,60%	6,97%	0,00%	66,68%	7,75%	100%
36	0,00%	0,00%	3,10%	14,72%	15,50%	66,68%	0,00%	100%

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL DISEÑO CONCEPTUAL DEL TRATAMIENTO DE RSU

En este capítulo se presentan los resultados y análisis obtenidos del diseño conceptual de la planta de tratamiento de RSU. En las Figuras 12 y 15 se presenta el diagrama de flujo de proceso de la simulación de la transformación orgánica e inorgánica de los residuos. Las flechas de color púrpura presentes en estos diagramas hacen referencia a la energía eléctrica producida o requerida en las turbinas y compresores, las cuales se listan en la Tabla 8. Los equipos K-100 y K-104 son los dos compresores que inyectan el gas a la caldera. Al ser energía requerida son restadas de la energía obtenida.

Tabla 9. Resultados por corriente obtenidos de la simulación para el tratamiento de RSU inorgánicos y orgánicos.

	EQUIPO	Tag	ENERGÍA PRODUCIDA MWH
INORGÁNICO	COMPRESOR	K – 100	156,2
	TURBINA	K – 101	224,2
		K – 102	9,19
		K – 103	48,4
		K – 105	2,32
	TOTAL ENERGÍA PRODUCIDA POR LA FRACCIÓN INORGÁNICA		
ORGÁNICO	COMPRESOR	K – 104	133,2
	TURBINA	K – 106	242,5
		K – 107	56,37
	TOTAL ENERGÍA PRODUCIDA POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA		

En la Tabla 9 se presentan las condiciones de las corrientes de salida de los equipos a partir de la Figura 16. Las corrientes 3 y 21 son corrientes de salida de cenizas, resultado de la combustión realizada por las calderas.

La corriente 19 es la salida de los gases del compresor en el proceso de Biodigestión. Las corrientes 9, 14, 23, 27, 30 y 30-2 son corrientes de entrada de agua en fase líquida para enfriamiento.

Tabla 10. Condiciones de las corrientes de salida para cada equipo

EQUIPO	TAG	CORRIENTE	TEMPERATURA DE SALIDA (°C)	PRESIÓN DE SALIDA (kPa)	VAPOR PRODUCIDO (Kg/h)	AGUA DE ENFRIAMIENTO REQUERIDO (Kg/h)
CALDERA	CRV-100	2	1.982	4.292	53.032,32	-
		3	1.982	4.292	-	-
	CRV-101	20	2.201	5.800	89.667,50	-
		21	2.201	5.800	-	-
COMPRESOR	K-100	6	765,3	4.292	15.776,64	-
	K-104	19	726,8	5.800	-	-
TURBINAS	K-101	7	1.099	101,3	86.296,32	-
	K-102	11	85,95	60	451.200	-
	K-103	16	99,96	101,3	372.500	-
	K-105	29	85,95	60	88.850	-
	K-106	36	1.206	101,3	89.667,50	-
INTERCAMBIADORES DE CALOR	E-100	1	543,3	111,3	10.609	-
		9	220	4.000	-	63.270
		5	260	111,3	14.691,60	-
		10	251,3	4.000	63.270	-
	E-102	7	1.099	101,3	86.296,32	-
		14	240	4.000	-	370.500
		13	260	101,3	86.296,32	-
		15	251,3	4.000	370.500	-
	E-103	23	240	4.000	-	388.000

EQUIPO	TAG	CORRIENTE	TEMPERATURA DE SALIDA (°C)	PRESIÓN DE SALIDA (kPa)	VAPOR PRODUCIDO (Kg/h)	AGUA DE ENFRIAMIENTO REQUERIDO (Kg/h)
		24	251	4.000	388.000	-
		36	1.206	101,3	89.667,50	-
		22	260	101,3	89.667,50	-
	E-104	26	140	101,3	14.691,60	-
		27	80	208,9	-	20.320
		28	120	198,9	20.320	-
		5	260	111,3	14.691,60	-
	E-105	25	260	101,3	175.982,40	-
		30	80	198,9	-	68.530
		31	120	198,9	68.530	-
		33	140	101,3	175.982,40	-
	E-106	8	88,58	101,3	15.776,64	-
		12	35	101,3	15.776,64	-
		30-2	32	446,1	-	628.900
		31-2	46,11	101,3	628.900	-

6.1 Energía generada en la planta de residuos sólidos urbanos inorgánicos

A partir de los procesos descritos en la sección 8 se generó un total de 127,9 MW de energía por hora. Para obtener el número de hogares beneficiados por la planta de generación de energía de residuos inorgánicos se consideró que esta ópera por 330 días al año y que los 35 días restantes corresponden a procesos de mantenimiento por medio de la Ecuación 19.

$$127,9MWH * 24 \text{ horas} * 330 \text{ días} = 1.012.968 \frac{MWH}{\text{año}} \quad \text{Ec. (19)}$$

La Universidad Nacional de Colombia en el año 2006 reportó un promedio anual de consumo de energía mensual en hogares de estrato 1, 2 y 3 en la ciudad de Bogotá de 176,2 KWH/mes. Este representa un valor de $2.114,4 \frac{KWH}{\text{año}}$ y por tanto un beneficio a 479.080 hogares

6.2 Energía generada en la planta de residuos sólidos urbanos orgánicos

Los cálculos para el proceso de los residuos orgánicos fueron realizados de la misma manera anteriormente descrita para el proceso de los residuos inorgánicos. Sin embargo, para este se tuvo en cuenta el valor 165,6 MWH que corresponde a la cantidad de energía eléctrica obtenida de la simulación orgánica.

$$165,6MWH * 24 \text{ horas} * 330 \text{ días} = 1.311.552 \frac{MWH}{\text{año}} \quad \text{Ec. (20)}$$

Este valor corresponde a $1.311.552.000 \frac{KWH}{\text{año}}$ y fue relacionado con el consumo de energía anual de los hogares anteriormente nombrado, para así obtener 620.295 hogares beneficiados. Como producto adicional el proceso de digestión anaerobia produjo 3.991,59 ton/día de abono orgánico.

En comparación con la implementación de estas tecnologías en otros países, el aprovechamiento de los RSU es bastante significativo para la ciudad de Bogotá. Un ejemplo de lo anterior es la isla de Mallorca en España en donde, a partir de 700.000 toneladas de residuos sólidos por año logra abastecer 67.000 hogares de la isla. (P. Chaliki, C. S. Psomopoulos, N. J. Themelis, C. Stavroulakis, 2014).

También, la ciudad de Múnich en Alemania para el año 2009 aprovechó el 49 % de los residuos generados mediante la incineración de 653.273 toneladas de residuos sólidos y con ello generó 131.514 MWH/año de energía eléctrica y 744.722 MWH/año de energía térmica para sistemas de calefacción. (P. Chaliki, C. S. Psomopoulos, N. J. Themelis, C. Stavroulakis, 2014).

Otro ejemplo es Malmo que produce una cantidad de residuos similar a la de Bogotá (2 millones de toneladas anuales). Sin embargo, en esta ciudad realizan la combustión del 69 % de los desechos y a partir de este tratamiento generan 0,46 MWH de energía eléctrica y 2,68 MWH

de energía para sistemas de calefacción por cada tonelada de residuos tratada. (P. Chaliki, C. S. Psomopoulos, N. J. Themelis, C. Stavroulakis, 2014)

Cabe resaltar que el estudio se realizó para el tratamiento de los residuos orgánicos y la fracción combustible de los desechos inorgánicos que llegan al Relleno Sanitario Doña Juana. De igual forma; no se tienen en cuenta variables como la eficiencia de los equipos o los errores en las operaciones, lo cual acercaría las cifras resultantes aún más a las de los tratamientos realizados en otros países.

7. METODOLOGÍA EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL TRATAMIENTO DE RSU

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación económica de la planta de generación de energía eléctrica a partir de material orgánico e inorgánico de los residuos sólidos del Relleno Sanitario de Doña Juana. Se realizó la búsqueda bibliográfica del impuesto a la renta, el precio de la energía eléctrica y su aumento porcentual anual y el precio de venta del abono orgánico; también se calculó el costo capital del gasificador, del biodigestor y de algunos intercambiadores de calor. Los valores posteriormente fueron ingresados a la simulación en el software ASPEN Process Economic Analyzer (APEA) que permitió la estimación de los costos de capital y operación bajo el diseño de construcción y modelo de cada equipo que se presenta en la simulación.

Inicialmente se exportaron todos los equipos de la simulación realizada en ASPEN HYSYS V10 al analizador económico APEA. Se realizó el mapeo o dimensionamiento de las calderas (CRV), los compresores (K), las turbinas (K), y los intercambiadores de calor (E).

Todos los equipos fueron procesados por el programa a excepción de los intercambiadores E-102 y E-103 cuyo costo de capital fueron calculados a partir de las ecuaciones establecidas por Seider et al. (2016):

$$C_P = F_P * F_M * F_L * C_B \quad \text{Ec. (21)}$$

$$C_B = \exp\{11,41 - 0,92[\ln(A)] + 0,098[\ln(A)]^2\} \quad \text{Ec. (22)}$$

$$F_P = 0,98 + 0,018 \left(\frac{P}{100}\right) + 0,0017 \left(\frac{P}{100}\right)^2 \quad \text{Ec. (23)}$$

$$F_M = a + \left(\frac{A}{100}\right)^b \quad \text{Ec. (24)}$$

Donde:

- A: El área de superficie del intercambiador de calor (ft²)
- P: Presión del lado coraza del intercambiador de calor (psig)
- a y b: Factores función del material de construcción del intercambiador

Finalmente está F_L que hace referencia a la corrección del largo de los tubos y se determina mediante la siguiente tabla:

Tabla 11. *Factor de corrección del largo del tubo de un intercambiador de calor.*

LARGO DEL TUBO	F_L
8	1,25
12	1,12
16	1,05
20	1

Los valores de área de transferencia de calor y presión de diseño fueron obtenidos en el software Aspen Exchanger Design and Rating V10 (los resultados de este diseño se encuentran en el Anexo 2). Los costos obtenidos fueron ingresados a APEA y se presentan en la Tabla 10:

Tabla 12. *Costos capitales para los intercambiadores de calor E-102 y E-103.*

H_E	ÁREA TOTAL (ft ²)	ÁREA POR H_E (ft ²)	CANTIDAD H_E	PRESIÓN (psig)	F_P	F_M	F_L	C_B	C_P POR H_E
E-102	1.294.597	25.891,9	50	14,7	0,98	3,81	1,00	203.567,4	\$ 762.245
E-103	1.306.733	26.134,7	50	14,7	0,98	3,81	1,00	205.633,3	\$ 770.486

Los gasificadores y biodigestores simulados en Super Pro Designer, no pueden ser mapeados por APEA. Para determinar los costos de capital para estos procesos se utilizó el procedimiento de una economía de escala denominada por Seider et al. (2017) como la relación

de la variación en los costos con la capacidad de producción de un equipo y está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{Costo_2}{Costo_1} = \left(\frac{Capacidad_2}{Capacidad_1} \right)^m * \left(\frac{Indice\ de\ Costos\ promedio\ anuales_1}{Indice\ de\ Costos\ promedio\ anuales_2} \right) \quad \text{Ec. (25)}$$

En donde m hace referencia a un factor de escala con un valor promedio de 0,6 y el índice de costos promedio anuales permite establecer el costo de un equipo en un punto dado en el tiempo relacionándolo con un determinado tiempo base.

Teniendo en cuenta lo anterior y los costos establecidos por Zafar, S. (2011) para diferentes tratamientos *Waste-to-Energy* entre los que se encuentran los gasificadores y los biodigestores se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 13. *Costos capitales del equipo gasificador.*

Capacidad del Gasificador (ton/día)	900
Costos Capitales (USD\$)	\$ 170.000
Capacidad Simulador (ton/día)	2274,64
Índice de Costos Promedio Anuales (2011)	586
Índice de Costos Promedio Anuales (2019)	731
Costo Capital Gasificador (USD\$)	\$ 369.960

Tabla 14. *Costos capitales del equipo biodigestor.*

Capacidad del Biodigestor (ton/día)	300
Costos Capitales (USD\$)	\$ 80.000
Capacidad Simulador (ton/día)	3991,6
Índice de Costos Promedio Anuales (2011)	586
Índice de Costos Promedio Anuales (2019)	731
Costo Capital Biodigestor (USD\$)	\$ 471.638

Los costos del biodigestor y del gasificador obtenidos fueron ingresados al simulador económico APEA.

Por otra parte, se agregan los costos de operación que corresponden al operario (dólares/hora), supervisor (dólares/hora), uso agua potable (dólares/millón de galones) y de aire instrumental (dólares/kilo pies cúbicos). Asociados en la siguiente tabla:

Tabla 15. *Costos de operación.*

COSTO UNITARIO LABORAL		
	UNIDADES	VALOR
Operario	\$/H	2,85
Supervisor	\$/H	3,39
COSTO UNITARIO SERVICIOS PÚBLICOS		
Agua Potable	\$/MMGAL	5,75
Aire Instrumental	\$/KCF	0,1

A su vez se ingresó en el simulador el valor del impuesto a la renta para el año 2019 en Colombia, que tiene un porcentaje del 37% (OLDMUTUAL, 2019) y el aumento presentado en el costo de la energía eléctrica anualmente en Colombia realizado mediante un promedio de los porcentajes de los mismos presentados obteniendo un valor de 2,8% anual (XM, 2017)

En la siguiente tabla se presentan los factores requeridos por el simulador para la evaluación económica del proceso. Se presentan en las unidades obtenidas en HYSYS, Super Pro Designer o tomados de la literatura y las unidades requeridas en el evaluador económico APEA.

Tabla 16. Factores adicionales requeridos por el simulador

FACTOR	VALOR	VALOR INGRESADO AL SIMULADOR
Energía Eléctrica Producida	294,8 MW	1.005.899.000 BTU/H
Precio de Venta Energía Eléctrica	\$212KWH	0,00025 \$BTU/H
Cantidad de Abono Producida	366.664,13 LB/H	366.664,13 LB/H
Precio de Venta Abono	\$4.000/ton NT	0,0587 \$LB/H

Finalmente se realizó la evaluación de los costos del proyecto que permitió mediante la base de datos del software hallar el dimensionamiento de los equipos y así obtener el capital total de inversión, costo de diseño, equipos, tubería, instrumentación, obra civil, instalación eléctrica, estructuras e instalación de equipos, mano de obra operativa, mantenimiento, servicios de ingeniería y flujo de caja.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL TRATAMIENTO DE RSU

El software Aspen Process Economic Analyzer genera hojas de cálculo que son presentadas en el Anexo 3. Los costos correspondientes a los equipos del proceso son evidenciados en la Tabla 17. El simulador compiló los costos de la caldera CRV-100 y CRV-101 con sus respectivos compresores y turbinas K-100 / K-101 y K-104 / K-106 lo cual se evidencia en la Tabla 17 en colores verde y azul.

Tabla 17. *Costos de equipos.*

EQUIPO	TAG	COSTO (USD)	COSTO (COP)
Caldera	CRV-100	\$ 18.124.100,00	\$ 58.761.957.020
	CRV-101	\$ 30.670.800,00	\$ 99.440.867.760
Compresor	K-100		
	K-104		
Turbinas	K-101		
	K-102	\$ 31.706.500,00	\$ 102.798.814.300
	K-103	\$ 23.717.600,00	\$ 76.897.202.720
	K-105	\$ 979.900,00	\$ 3.177.031.780
	K-106		
Intercambiadores de calor	E-100	\$ 2.296.300,00	\$ 7.445.063.860
	E-102	\$ 38.315.000,00	\$ 124.224.893.000
	E-103	\$ 38.715.000,00	\$ 125.521.773.000
	E-104	\$ 443.600,00	\$ 1.438.239.920
	E-105	\$ 1.257.700,00	\$ 4.077.714.940
	E-106	\$ 1.704.600,00	\$ 5.526.654.120
Gasificador		\$ 373.300,00	\$ 1.210.313.260
Biodigestor		\$ 473.300,00	\$ 1.534.533.260
TOTAL COSTOS DE EQUIPOS		\$ 188.777.700	\$ 612.055.058.940

En la Tabla 18, se presenta el resumen de los costos capitales del proyecto. El costo total del proyecto es la sumatoria de todos los costos capitales. El costo total del proyecto ajustado corresponde al valor total escalado por medio del parámetro de escalación capital (15%) dado por

el simulador, el cual indica el rango de aumento de los costos capitales del proyecto en un periodo de tiempo.

Tabla 18. *Resumen costos capitales del proyecto.*

RESUMEN CAPITAL DEL PROYECTO	COSTO TOTAL (USD)	COSTO (COP)
Equipo Comprado	\$ 188.230.112,00	\$ 610.279.669.126,40
Ajustes de Equipo	\$ 1.080.260,00	\$ 3.502.418.972,00
Tubería	\$ 5.320.617,50	\$ 17.250.506.058,50
Civil	\$ 6.283.906,50	\$ 20.373.681.654,30
Instrumentación	\$ 1.887.946,50	\$ 6.121.100.142,30
Eléctricos	\$ 46.721,50	\$ 151.480.447,30
Aislamiento	\$ 540.207,70	\$ 1.751.461.404,94
Pintura	\$ 164.878,00	\$ 534.567.451,60
Otros	\$ 41.820.800,00	\$ 135.591.397.760,00
Costos Generales y Administrativos	\$ 7.295.368,00	\$ 23.653.042.129,60
Tarifa de Contrato	\$ 5.706.097,50	\$ 18.500.309.314,50
Contingencias	\$ 46.507.848,00	\$ 150.787.744.785,60
TOTAL COSTOS DEL PROYECTO	\$ 304.884.763	\$ 988.497.379.247
TOTAL COSTOS DEL PROYECTO AJUSTADO	\$ 350.575.597	\$ 1.136.636.203.511

La fila correspondiente a la variable “Otros” hace referencia a la suma de los siguientes costos: diseño, ingeniería, costos de adquisición, cargos por materiales y costos indirectos como la renta de equipos, servicios y construcción de oficinas de supervisión. Además, en la Tabla 19 se presenta el resumen económico del proyecto, en donde se tiene en cuenta la venta total de la energía eléctrica y el abono como productos del proceso.

Tabla 19. *Resumen económico del proyecto.*

RESUMEN DE RESULTADOS	UNIDAD	COSTO (USD)	COSTO (COP)
Costo Total de Capital del Proyecto	Costo	\$ 350.575.598	\$ 1.136.636.203.511
Venta Total de Productos	Costo/periodo	\$ 373.365.275	\$ 1.210.524.896.064
Costo Total de mano de obra y mantenimiento	Costo/periodo	\$ 3.165.120	\$ 10.261.952.064

RESUMEN DE RESULTADOS	UNIDAD	COSTO (USD)	COSTO (COP)
Costo Total de Operación	Costo/periodo	\$ 5.196.377	\$ 16.847.692.861
Costo Labor Operativa	Costo/periodo	\$ 255.120	\$ 827.150.064
Costo de Mantenimiento	Costo/periodo	\$ 2.910.000	\$ 9.434.802.000
Cargos Operativo	Costo/periodo	\$ 63.780	\$ 206.787.516
Gastos Generales de la Planta	Costo/periodo	\$ 1.582.560	\$ 5.130.976.032
Subtotal Costos de Operación	Costo/periodo	\$ 4.811.460	\$ 15.599.715.612

8.1 Viabilidad económica del proyecto

Con el fin de analizar los resultados económicos obtenidos se utilizó el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), obtenidos por el simulador. La Tabla 20 especifica los valores del VPN para 10 años de duración del proyecto y de igual forma se muestra el porcentaje de la TIR.

Tabla 20. Valor Presente Neto – Tasa Interna de Retorno

	AÑO	VPN (USD)	COSTO (COP)	TIR (%)
1	2019	\$ -322.348.651	\$ -1.045.118.796.791	60,17
2	2020	\$ -201.365.803	\$ -652.868.207.167	
3	2021	\$ -49.550.541	\$ -160.652.763.252	
4	2022	\$ 80.360.962	\$ 260.546.310.089	
5	2023	\$ 191.532.086	\$ 620.985.328.062	
6	2024	\$ 286.668.833	\$ 929.437.689.899	
7	2025	\$ 368.086.042	\$ 1.193.408.565.340	
8	2026	\$ 437.764.004	\$ 1.419.318.454.061	
9	2027	\$ 497.396.872	\$ 1.612.660.139.274	
10	2028	\$ 562.589.035	\$ 1.824.026.170.704	

El cálculo del VPN permitió conocer el tiempo de retorno de la inversión. En la Figura 17 los valores negativos corresponden a los años de puesta en marcha del proyecto, en los que se realiza la retribución de la inversión. Desde el año 2022 este valor es positivo, indicando los ingresos recaudados por la venta de la energía eléctrica y el abono orgánico.

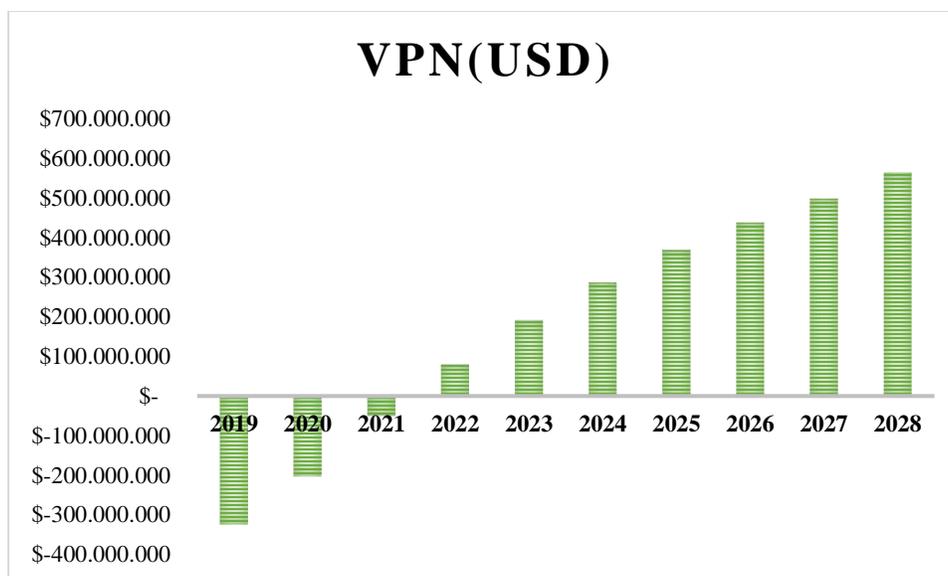


Figura 17. Valor Presente Neto para 10 años del proyecto.

Los resultados obtenidos por el VPN están ligados con la TIR, la cual al ser del 60,17% verifica el retorno de la inversión en corto tiempo. Lo anterior demuestra la viabilidad económica y la rentabilidad del proyecto, lo cual beneficiaría a la población impactada no solamente en materia ambiental y de salubridad, sino que además a futuro la alta oferta energética podría disminuir los gastos a pagar en los hogares por el uso del recurso.

Un estudio realizado por Selva C. (2017) propone una planta de tratamiento térmico de residuos sólidos para la ciudad de Santiago de Chile la cual trata 2,9 millones de toneladas al año de residuos sólidos. El costo total calculado para esta planta es de \$318.122.806 dólares estadounidenses que incluyen costos de inversión totales y costos operacionales. Los valores resultantes de este estudio y la cantidad de residuos tratada son similares a la analizada en la propuesta para el tratamiento de residuos sólidos urbanos de Bogotá.

9. CONCLUSIONES

- El tratamiento para los residuos sólidos urbanos inorgánicos diseñado bajo los parámetros de un proceso de gasificación permitiría la generación de 127,918 MWH de energía eléctrica con la cual se lograrían abastecer 479.080 hogares.
- El tratamiento de los residuos sólidos urbanos orgánicos se diseñó mediante la metodología de digestión anaerobia y permitiría la generación de 165,67 MWH de energía eléctrica y 3.991,59 toneladas diarias de abono orgánico como sub producto del proceso fermentativo de la fracción orgánica de los residuos. La producción de energía eléctrica abastecería 620.295 hogares.
- El costo total del proyecto fue de \$350.575.597 USD, lo cual incluye costos de operación, mantenimiento, compra de maquinaria y gastos generales de la planta. Por otra parte, la tasa interna de retorno fue del 60,17%, lo cual junto con el valor presente neto representan una devolución de la inversión a corto plazo.
- Referente a la viabilidad técnica se obtuvo que el tratamiento de residuos orgánicos generó mayor producción de energía frente al tratamiento de residuos inorgánicos, con una diferencia de 37,752 MWH. Siendo la producción energética del proceso orgánico 165,67 MWH, que además ofrece como valor agregado la producción de 3.991,59 ton/día de abono orgánico.

10. RECOMENDACIONES

Al finalizar el proyecto se recomienda para futuras investigaciones los siguientes aspectos:

- El tratamiento de residuos sólidos presentado en este proyecto, se basa en diseños completamente conceptuales. Por lo que tiene en cuenta la eficiencia de los equipos brindada por los simuladores (60-70%); por consiguiente, no se encuentra un margen de error establecido y los resultados pueden variar. Se recomienda utilizar los porcentajes de conversión y la pérdida de energía que se da en los diferentes equipos del proceso.
- Por otro lado, el proyecto se realizó basado en un tratamiento de la fracción orgánica e inorgánica combustible de los residuos sólidos que ingresan al RSDJ. Por eso se considera importante discriminar los desechos que por variables como la contaminación no pueden ser ingresados en ninguno de los dos procesos y que además se brinde su correcta disposición.
- También se recomienda buscar alternativas de aprovechamiento para los residuos que no son tenidos en cuenta dentro de ninguno de los dos procesos propuestos en el documento, como lo son los Vidrios y los Metales.
- Aunque el proyecto generaría un impacto positivo en la ciudad de Bogotá a nivel medio ambiental a partir de la disminución del volumen de los residuos dispuestos, es posible analizar más a fondo el contexto mediante la valoración de impactos ambientales positivos y negativos.

- El proyecto tiene un importante énfasis en la viabilidad económica y social, por eso se considera importante complementar con una evaluación económica de los costos de remediación ambiental.
- La inversión inicial del proyecto puede llegar a ser complementada mediante el análisis del comportamiento de los costos si estos fueran sufragados en cuotas por alguna entidad bancaria.
- De igual forma, los costos totales del proyecto pueden ser más verídicos si se analizara más a fondo la inversión necesaria para el proceso de compostaje y de los recursos que se necesitan dentro de los tratamientos.
- Existe la posibilidad de realizar el análisis económico de cada uno de los tratamientos propuestos por separado; lo cual, en materia de viabilidad permitiría tener generar más certeza a la hora de seleccionar uno de los dos procesos.

11. REFERENCIAS

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2012). *Aportes para la Construcción de la Política Basura Cero*.

Recuperado de

http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/BasuraCero/DocumentoBasuraCero.pdf

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2015). *Relleno Sanitario Doña Juana, Observatorio de Salud Ambiental*. Recuperado de

http://biblioteca.saludcapital.gov.co/img_upload/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/informacion%20comunidad/rsdj_osab_03_11_2015.pdf

Banco Mundial (2018). *Los desechos: un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos*. Recuperado de <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>

Bello, Bravo, Charczuk y Sobrino (2012). Más educación, menos contaminación.

Recuperado

de <http://economicas.unlz.edu.ar/nuevosite/doc/pas/ProyectoMaseducacionmenoscontaminacion.pdf>

Benítez, J. (enero 08 de 2019). *¡No todo es basura!*. Bogotá: El Tiempo Blogs. Recuperado de <http://blogs.eltiempo.com/ambiente-urbano/2019/01/08/no-todo-es-basura/>

Carreño, L. y Rivera, M. (octubre 23 de 2018). *Vida útil de Doña Juana, en manos de los bogotanos*. Bogotá: El Espectador. Recuperado de <https://www.elespectador.com/noticias/bogota/vida-util-de-dona-juana-en-manos-de-los-bogotanos-articulo-819615>

- Codensa (2019). *Tarifas de energía eléctrica reguladas por la comisión de regulación de energía y gas (CREG)*. Recuperado de <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espa%20B1ol/personas/1-17-1/2019/Tarifario-enero-2019.pdf>
- Confederation of European Waste-to-Energy Plants. (2016). *Waste-to-Energy in Europe in 2016*. Recuperado de <http://www.cewep.eu/2018/10/22/waste-to-energy-plants-in-europe-in-2016/>
- Congreso de Colombia (1979). *Ley 9 del 24 de enero de 1979*. Recuperado de http://biblioteca.saludcapital.gov.co/img_upload/03d591f205ab80e521292987c313699c/ley-9-de-1979_1.pdf
- Chen Y. (2016). *A Cost Analysis of Food Waste Composting in Taiwan*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/310733732_A_Cost_Analysis_of_Food_Waste_Composting_in_Taiwan
- Defensoría del Pueblo. *Informe Defensorial del Pueblo. Disposición final de residuos sólidos en Bogotá*. Recuperado de <http://www.defensoria.gov.co/attachment/129/Disposici%C3%B3n%20final%20de%20residuos%20s%C3%B3lidos%20en%20Bogot%C3%A1.pdf>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) (2017) *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management* Recuperado de https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf
- Fundación para la Economía Circular (FEC) (2014). *Estrategias para la gestión sostenible de residuos en el horizonte 2020*. Recuperado de http://economiecircular.org/wp/?page_id=1402
- Fundación Universitaria Iberoamericana (FUNIBER). *Valorización Energética*.

- García, A. y Gómez, J. (2016) *Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de Abastos de Bogotá mediante Digestión Anaerobia*. (Tesis de Pregrado) Fundación Universidad de América, Bogotá.
- Grupo Epidemiología y Salud Poblacional (2006) *Evaluación del impacto del Relleno Sanitario Doña Juana en la salud de grupos poblacionales en su área de influencia*. Recuperado de <http://www.hospitalvistahermosa.gov.co/web/node/sites/default/files/uploads/evaluacionImpactoRSDJ.pdf>
- Kaza, Yao, BhadaTata y Woerden (2018). *What a Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Recuperado de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317?deliveryName=DM5107&locale-attribute=fr>
- Martínez, O. y Porras, R. (2015) *Simulación de sistemas de control en procesos del sector Oil & Gas a través del software Aspen HYSYS y conexión a Rockwell Automation con el estándar de comunicación OPC*. (Tesis de Pregrado) Universidad Distrital Francisco José de Caldas
- Mendoza, J., (2013) *Análisis de Instrumentos de Gestión Ambiental en la Ciudad Colombiana* (Tesis de Pregrado). Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario, Bogotá
- Meza, E., (2012) *Análisis y Propuesta de Aplicabilidad de Métodos y Técnicas de aprovechamiento, recuperación y eliminación de residuos sólidos urbanos en Tabacundo, Cantón Pedro Moncayo* (Tesis de Especialización). Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2012) *Guía para el diseño, construcción, operación y cierre de Rellenos Sanitarios*. Recuperado de <http://www.anesapa.org/wp->

content/uploads/2014/07/Guia-para-el-Diseno-Construccion-Operacion-Mantenimiento-y-Cierre-de-Relleno-Sanitario.pdf

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2013). *Decreto 2981 del 20 de diciembre de 2013*.

Recuperado de <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2013/Documents/Diciembre/20/Decreto%202981%20del%2020%20de%20diciembre%20de%202013.pdf>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2003). *Resolución 1045 del 26 de septiembre de 2003*. Recuperado de <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Resolucion-1045-de-2003-.pdf>

Observatorio Ambiental de Bogotá. *Disposición de Residuos en el Relleno Sanitario Doña Juana-DRRSDJ*. Recuperado de <http://oab.ambientebogota.gov.co/esm/indicadores?id=37&v=1>

Observatorio de Salud Ambiental. (2015) *Relleno Sanitario Doña Juana*. Recuperado de http://biblioteca.saludcapital.gov.co/img_upload/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/informacion%20comunidad/rsdj_osab_03_11_2015.pdf

OLDMUTUAL (2019). *Cambios para las personas naturales en el impuesto sobre la renta*. Recuperado de https://www.oldmutual.com.co/mercadeo/clientes/mailing/2019/ley_financiamiento/ley_financiamiento.pdf.

P. Chaliki, C. S. Psomopoulos, N. J. Themelis, C. Stavroulakis, (2014). *WTE Plants installed in 10 European Cities*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/263713966_WTE_plants_installed_in_10_European_Cities

Pérez, J. C. (mayo 25 de 2016). *Doña Juana, una vecina incómoda*: Las2Orillas. Recuperado de <https://www.las2orillas.co/dona-juana-una-vecina-incomoda/>

Plastics Europe (2017). *Plastics – the Facts 2017. An analysis of European plastics production, demand and waste data.* Recuperado de https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf

República de Colombia (1994). *Documento CONPES 2750 del 21 de diciembre de 1994.* Recuperado de <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2016/10/Documento-Conpes-2750-de-1994.pdf>

SCS Engineers (2007). *Informe de Evaluación Relleno Sanitario Doña Juana Bogotá, Colombia.* Recuperado de <https://www.globalmethane.org/Data/DonaJuanaSpanish.pdf>

Sectaria Distrital de Salud. (2015) *Relleno Sanitario Doña Juana Acciones del Sector Salud.* Recuperado de http://biblioteca.saludcapital.gov.co/img_upload/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/informacion%20comunidad/informe_rsdj_22_10_2015.pdf

Seider, W., et al. (2017). *Product and Process Design Principles Synthesis, analysis and evaluation.* Recuperado de <://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/599466987.pdf>.

Selva C. (2017). *Pre-feasibility study of a Waste-to-Energy Plant in Santiago de Chile.* Recuperado de <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Selva%20Calixto%20Jan%202017.pdf>.

Sosa, A. (2003) *Los plásticos Materiales a Medida.* Recuperado de http://www.cientec.or.cr/ambiente/pdf/plasticos_materiales2003-CIENTEC.pdf

Steinvorth, A (2014). *Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmico avanzada.* Recuperado de http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_253_240314_es.pdf

Suarez, R., Buitrago, C. y Sanclemente, X. (2004) Calidad del Recurso Hídrico de Bogotá D.C.

Recuperado de

http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=e464720b-b21b-4b3c-b134-2dea4af9f372&groupId=10157

Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP). (2015) Plan de Gestión Integral

de Residuos Sólidos 2016-2027. Recuperado de

http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/direccion/PGIRS_FINAL_18-12-2015.pdf

XM (2017). *Demanda de energía nacional*. Recuperado de

<http://informesanuales.xm.com.co/2017/SitePages/operacion/4-1-Demanda-de-energia-nacional.aspx>

Zafar, S. (2009). *Gasification of Municipal Solid Waste*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/285295261_Gasification_of_municipal_solid_wastes

Zafar, S. (2011). *Analyzing Different Waste-to-Energy Technologies*. Recuperado de

<https://bioenergyconsult.wordpress.com/2011/09/24/comparison-of-different-waste-to-energy-processes/>.

12. ANEXOS

Anexo 1. Balances de masa.

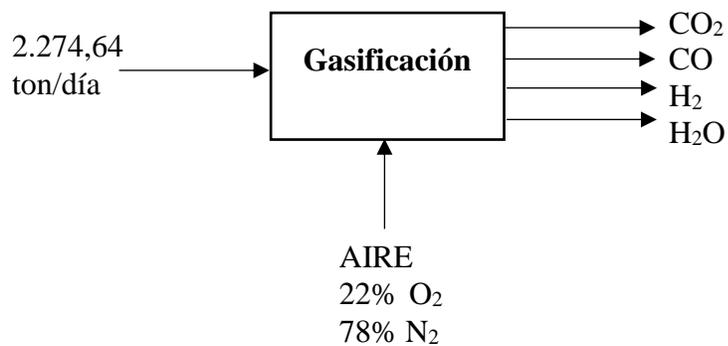
INORGÁNICOS

1.



	PORCENTAJE (%)	TONELADAS / DÍA
PLÁSTICOS	14,2	889,80
PAPEL – CARTÓN	18,3	1.146,72
TEXTIL	3,8	238,12
TOTAL		2.274,64

2.



ENTRADA (ton/día)	SALIDA (ton/día)
2.274,64	3.370,8
6.135,58	4.639,93
8.410,22	8.410,73



Ec. (1)

$$2.274,64 \frac{\text{ton}}{\text{día}} * \frac{1.000.000}{1 \text{ ton}} * \frac{1 \text{ mol } C_6H_{10}O_4}{146 \text{ g } C_6H_{10}O_4} = 15.579.726,03 \frac{\text{mol}}{\text{día}}$$

$$15.579.726,03 \frac{\text{mol}}{\text{día}} * \frac{3 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } C_6H_{10}O_4} = 46.739.178,09 \text{ mol } O_2 * \frac{78 \text{ mol } N_2}{22 \text{ mol } O_2} = 1.657.116,31 \text{ mol } N_2$$

$$46.739.178,09 \text{ mol } O_2 * \frac{32 \text{ g } O_2}{1 \text{ mol } O_2} * \frac{1 \text{ ton } O_2}{1.000.000 \text{ } O_2} = 1.495,65 \text{ ton } O_2$$

Ec. (2)

$$1.657.116,314 \text{ mol } N_2 * \frac{28 \text{ g } N_2}{1 \text{ mol } N_2} * \frac{1 \text{ ton } N_2}{1.000.000 \text{ } N_2} = 4.639,93 \text{ ton } N_2$$

$$= 6.135,58 \text{ ton } \frac{\text{Aire}}{\text{día}}$$

$$46.739.178,09 \text{ mol } O_2 * \frac{3 \text{ mol } CO}{3 \text{ mol } O_2} * \frac{28 \text{ g } CO}{1 \text{ mol } CO} * \frac{1 \text{ ton } CO}{1.000.000 \text{ g } CO} = 1.308,70 \frac{\text{ton } CO}{\text{día}}$$

Ec. (3)

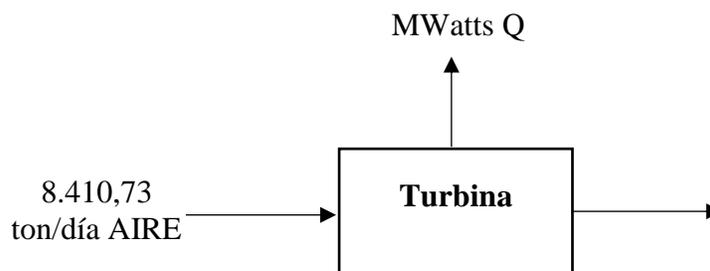
$$46.739.178,09 \text{ mol } O_2 * \frac{3 \text{ mol } CO_2}{3 \text{ mol } O_2} * \frac{44 \text{ g } CO_2}{1 \text{ mol } CO_2} * \frac{1 \text{ ton } CO_2}{1.000.000 \text{ g } CO_2} = 2.056,52 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{día}}$$

$$46.739.178,09 \text{ mol } O_2 * \frac{4 \text{ mol } H_2O}{3 \text{ mol } O_2} * \frac{2 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} * \frac{1 \text{ ton } H_2O}{1.000.000 \text{ g } H_2O} = 124,64 \frac{\text{ton } H_2O}{\text{día}}$$

$$46.739.178,09 \text{ mol } O_2 * \frac{1 \text{ mol } H_2O}{3 \text{ mol } O_2} * \frac{18 \text{ g } H_2}{4 \text{ mol } H_2} * \frac{1 \text{ ton } H_2O}{1.000.000 \text{ g } H_2O} = 280,94 \frac{\text{ton } H_2O}{\text{día}}$$

$$= 3.770,8 \frac{\text{ton}}{\text{día}}$$

3.



ENTRADA (ton/día)	SALIDA (ton/día)
8.410,73	15.987,79
7.577,09	
15.987,73	



$$CO = 1.308,70 \frac{\text{ton CO}}{\text{día}} + 124,64 \frac{\text{ton H}_2}{\text{día}}$$

- **O₂**

$$1.308,70 \frac{\text{ton CO}}{\text{día}} * \frac{1000.000 \text{ g CO}}{1 \text{ ton CO}} * \frac{1 \text{ mol CO}}{28 \text{ g CO}} = 46.739.235,71 \frac{\text{mol CO}}{\text{día}} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$46.739.235,71 \frac{\text{mol CO}}{\text{día}} * \frac{3,5 \text{ mol O}_2}{3 \text{ mol CO}} * \frac{32 \text{ g O}_2}{1 \text{ mol O}_2} * \frac{1 \text{ ton O}_2}{1.000.000 \text{ g O}_2} = 1.744,93 \frac{\text{ton O}_2}{\text{día}}$$

$$124,64 \frac{\text{ton H}_2}{\text{día}} * \frac{1.000.000 \text{ g H}_2}{1 \text{ ton H}_2} * \frac{1 \text{ mol H}_2}{2 \text{ g H}_2} = 62.320.000 \frac{\text{mol H}_2}{\text{día}}$$

- **CO₂**

$$46.739.235,71 \frac{\text{mol CO}}{\text{día}} * \frac{3 \text{ mol CO}_2}{3 \text{ mol CO}} * \frac{44 \text{ g CO}_2}{1 \text{ mol CO}_2} * \frac{1 \text{ ton CO}_2}{1.000.000 \text{ CO}_2} = 2.056,53 \frac{\text{ton CO}_2}{\text{día}} \quad \text{Ec. (6)}$$

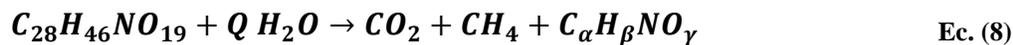
- **H₂O**

$$46.739.235,71 \frac{\text{mol CO}}{\text{día}} * \frac{4 \text{ mol H}_2O}{3 \text{ mol CO}} * \frac{18 \text{ g H}_2O}{1 \text{ mol H}_2O} * \frac{1 \text{ ton H}_2O}{1.000.000 \text{ H}_2O} = 1.121,74 \frac{\text{ton H}_2O}{\text{día}} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$1.744,93 \frac{\text{ton O}_2}{\text{día}} * \frac{78 \text{ ton N}_2}{22 \text{ ton O}_2} = 5.832,13 \frac{\text{ton N}_2}{\text{día}}$$

$$1.744,93 \frac{\text{ton O}_2}{\text{día}} + 5.832,13 \frac{\text{ton N}_2}{\text{día}} = 7.577,09 \text{ ton AIRE}$$

ORGÁNICOS



	PORCENTAJE (%)
CH ₄	50
CO ₂	45
N ₂	5
TOTAL	100

$$1 \text{ ton MSW} \rightarrow 208 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \rightarrow 0,149 \text{ ton CH}_4 \quad \text{Ec. (9)}$$

$$3.991,59 \text{ ton MSW} \rightarrow x \text{ ton CH}_4 = 594,75 \text{ ton} \frac{\text{CH}_4}{\text{día}}$$

$$594,75 \text{ ton} \frac{\text{CH}_4}{\text{día}} * \frac{1.000.000 \text{ CH}_4}{1 \text{ ton CH}_4} * \frac{1 \text{ CH}_4}{16 \text{ g CH}_4} = 37.171.875 \text{ mol CH}_4 \quad \text{Ec. (10)}$$

$$594,75 \text{ ton} \frac{\text{CH}_4}{\text{día}} * \frac{0,45 \text{ CO}_2}{0,50 \text{ CH}_4} = 535,275 \text{ ton CO}_2$$

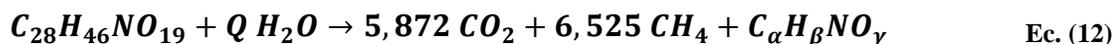
$$3.991,59 \text{ ton C}_{28}\text{H}_{46}\text{NO}_{19} * \frac{1.000.000 \text{ C}_{28}\text{H}_{46}\text{NO}_{19}}{1 \text{ ton C}_{28}\text{H}_{46}\text{NO}_{19}} * \frac{1 \text{ mol C}_{28}\text{H}_{46}\text{NO}_{19}}{700,66 \text{ g C}_{28}\text{H}_{46}\text{NO}_{19}} = 5.696.900 \text{ mol C}_{28}\text{H}_{46}\text{NO}_{19}$$

$$5.696.900 \text{ mol C}_{28}\text{H}_{46}\text{NO}_{19} \rightarrow 37.171.875 \text{ mol CH}_4 \quad \text{Ec. (11)}$$

$$1 \text{ mol C}_{28}\text{H}_{46}\text{NO}_{19} \rightarrow x \text{ mol CH}_4$$

$$6,525 \text{ mol} \rightarrow \text{CH}_4$$

$$6,525 \text{ mol CH}_4 * \frac{0,45 \text{ mol CO}_2}{0,50 \text{ mol CH}_4} = 5,87 \text{ mol CO}_2$$



C	$\rightarrow 28 = 6,52 + 5,87 + \alpha$	(1)
H	$\rightarrow 46 = 2Q = 4(6,52) + \beta$	(2)
N	$\rightarrow 1 = \theta$	(3)
O	$\rightarrow 19 + Q = 2(5,87) + \gamma$	(4)
	$\rightarrow \frac{1}{(\alpha + \beta + \gamma)} = \theta$	(5)

$$(1) \quad \alpha = 28 - 6,52 - 5,87 \rightarrow 15,60 \quad \text{Ec. (13)}$$

$$(2) \quad \beta = 2Q + 19,9 \quad \text{Ec. (14)}$$

$$(4) \quad \gamma = Q + 7,25 \quad \text{Ec. (15)}$$

$$(5) \quad \theta = \frac{1}{(15,60 + 2Q + 19,9 + 7,25)} \quad \text{Ec. (16)}$$

$$0,02 = \frac{1}{(15,60 + 2Q + 19,9 + 7,25 + Q)}$$

$$0,02 (15,60 + 2Q + 19,9 + 7,25 + Q) = 1$$

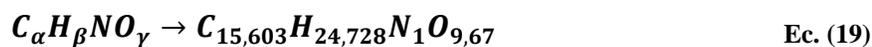
$$0,312 + 0,04Q + 0,38 + 0,14 + 0,02Q = 1$$

$$0,85 + 0,06Q = 1$$

$$Q = \frac{1 - 0,85}{0,06} = 2,41$$

$$(2) \quad \beta = 2 (2,41) + 19,9 = 24,72 \quad \text{Ec. (17)}$$

$$(4) \quad \gamma = 7,25 + 2,41 = 9,67 \quad \text{Ec. (18)}$$



- **CANTIDAD DE AGUA**

$$5.696.900 \text{ mol } C_{28}H_{46}NO_{19} * \frac{2,41 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } C_{28}H_{46}NO_{19}} * \frac{18 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} * \frac{1 \text{ ton } H_2O}{1.000.000 \text{ g } H_2O} \quad \text{Ec. (20)}$$

$$= 247,54 \text{ ton } H_2O$$

Anexo 2. Resultados de los Intercambiadores E-102 y E-103 por medio de Aspen

Exchanger Design and Rating V10

E-102				
Tamaño: 100/200 pulgadas Conectados: 10 paralelos 5 serie				
Área Superficial: 1.294.597 ft ² Unidades: 50 Área/unidad: 25.891,9 ft ²				
RENDIMIENTO DE UNA UNIDAD				
Localización del Flujo	Lado Coraza		Lado Tubos	
Cantidad Total de Flujo (lb/h)	1.396.932		816.693	
Vapor (Entrada/Salida) (lb/h)	1.396.932	1.396.932	0	816.693
Líquido (lb/h)	0	0	816.693	0
No Condensable (lb/h)	0	0	0	0
Temperatura (Entrada/Salida) (°F)	20,10,89	500	464	485,4
Densidad Vapor/Líquido (lb/ft ³)	0,016	0,037	50,479	1,208
Viscosidad (cp)	0,054	0,026	0,1114	0,017
Peso Molecular	29,3	29,3		18,02
Calor Específico (BTU/lb-F)	0,3219	0,2731	1,2719	0,57
Conductividad Térmica (BTU/ft-h-F)	0,049	0,023	0,363	0,029
Calor Latente (BTU/lb)			748,6	748,7
Presión absoluta (psi)			580,15	579,52
Velocidad (Promedio/Máxima) (ft/s)	156,43	242,38	0,85	1,65
Caída de Presión (psi)	1,6	53,18	7,25	0,63
Calor Intercambiado 633.150.800 BTU/h		MTD(corregido) 383,34 °F		
CONSTRUCCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR				
	Lado Coraza		Lado Tubos	
Presión de Diseño/Vacío/Pruebas (psi)	50		640	
Temperatura de Diseño (°F)	2.080		550	
Número de pasos por coraza	1		1	
Tolerancia de Corrosión	0,125		0,125	
Largo de los tubos: 20 ft				
Material de los tubos: Acero Carbono				
Material de la Coraza: Acero Carbono				

E-103				
Tamaño: 100/240 pulgadas Conectados: 10 paralelos 5 serie				
Área Superficial: 1.306.733 ft ² Unidades: 50 Área/unidad: 26.134,7 ft ²				
RENDIMIENTO DE UNA UNIDAD				
Localización del Flujo	Lado Coraza		Lado Tubos	
Cantidad Total de Flujo (lb/h)	1.275.247		855.277	
Vapor (Entrada/Salida) (lb/h)	1.275.247	1.275.247	855.277	0
Líquido (lb/h)	0	0	855.277	0
No Condensable (lb/h)	0	0	0	0
Temperatura (Entrada/Salida) (°F)	2.202,25	500	464	485,44
Densidad Vapor/Líquido (lb/ft ³)	0,015	0,037	0,47	1,208
Viscosidad (cp)	0,057	0,0258	0,11	0,017
Peso Molecular	28,94	28,94		18,02
Calor Específico (BTU/lb-F)	0,32	0,27	1,27	0,57
Conductividad Térmica (BTU/ft-h-F)	0,052	0,023	0,363	0,029
Calor Latente (BTU/lb)			748,6	748,6
Presión absoluta (psi)	14,7	13,1	580,15	579,52
Velocidad (Promedio/Máxima) (ft/s)	151,43	243,76	0,88	1,71
Caída de Presión (psi)	1,6	46,85	7,25	0,35
Calor Intercambiado 663.062.000 BTU/h		MTD(corregido) 424,2 °F		
CONSTRUCCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR				
	Lado Coraza		Lado Tubos	
Presión de Diseño/Vacío/Pruebas (psi)	50		640	
Temperatura de Diseño (°F)	2270		550	
Número de pasos por coraza	1		1	
Tolerancia de Corrosión	0,125		0,125	
Largo de los tubos: 20 ft				
Material de los tubos: Acero Carbono				
Material de la Coraza: Acero Carbono				

Anexo 3. Resultados de la evaluación económica realizada por el software Aspen Process Economic Analyzer V10. Estos se encuentran en el documento en formato PDF (ANEXO 3_COSTOS_APEA).

Anexo 4. Condiciones finales de las corrientes presentadas por el software Aspen Hysys V10. Estas se encuentran en el documento en formato PDF (ANEXO4_CORRIENTES_ASPEN_HYSYS).