

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE INCINERACIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN
EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA

KAREN YANETH SÁNCHEZ QUIROGA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA EN ENERGÍA
BUCARAMANGA, COLOMBIA

2016

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE INCINERACIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN
EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA

KAREN YANETH SÁNCHEZ QUIROGA

Proyecto de Grado para optar al Título de Ingeniera en Energía

Director: Carlos Alirio Díaz González (M.Sc)

Co-director: Leonardo Esteban Pacheco Sandoval (PhD)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA INGENIERIA EN ENERGIA

BUCARAMANGA, COLOMBIA

2016

Nota de aceptación

Firma Director de proyecto de grado

Firma Co-Director de proyecto de grado

Firma Calificador

Bucaramanga, 2016

Dedico este logro a Dios.

A mi madre, Yaneth Quiroga, por darme la vida y un incomparable amor. Por estar para mí incondicionalmente. Por su apoyo constante y dedicación. Por cada consejo, orientación y permitirme el privilegio de ser hija de una gran mujer.

A mi padre, Carlos Enrique, por enseñarme con su ejemplo que se vale soñar, y que todo en esta vida es posible si luchamos por conseguirlo. Por confiar en mí, ser mi soporte, mi guía y mi más grande admiración.

A mis hermanos, Karol y Junior, por ser mi motivo principal para continuar hacia adelante.

A mis amigos, por hacer de mí paso por la Unab una etapa maravillosa. Sus risas, consejos, compañía y lealtad estarán siempre conmigo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Bucaramanga por brindarme los espacios y herramientas necesarias para mi crecimiento integral y la obtención de este satisfactorio título.

Al director de este proyecto, Carlos Alirio Díaz, por su orientación y conocimientos brindados para llevar a cabo este trabajo.

Al codirector de este proyecto, Leonardo Pacheco, por su apoyo para la ejecución de este proyecto y el ejemplo ofrecido durante esta etapa de mi vida académica.

Al Dr. Miguel Ángel Gómez Martínez de la Universidad de Guanajuato, México, por su valiosa contribución para el desarrollo de esta tesis.

A la Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga (EMAB) por los datos suministrados.

Al docente Luis Eduardo Jaimes por su valioso acompañamiento en el transcurso de toda mi carrera universitaria.

Demás cuerpo docente del programa Ingeniería en Energía de la UNAB por hacer de mi paso por esta institución una etapa de crecimiento profesional integral. Por su dedicación, cariño y esmero para hacer cada día de este programa una mejor familia.

CONTENIDO

JUSTIFICACIÓN.....	10
OBJETIVO DEL PROYECTO	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
ANTECEDENTES.....	16
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1. ASPECTOS GENERALES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	17
1.1.1. DESCRIPCIÓN DE RESIDUO SÓLIDO URBANO.....	17
1.1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	17
1.1.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL AMB. 17	
1.2. SISTEMAS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	19
1.2.1. VERTIDO SIN CONTROL	19
1.2.2. VERTIDO CONTROLADO O RELLENO SANITARIO	20
1.2.3. PRODUCCIÓN DE ABONO O COMPOST.....	21
1.2.4. INCINERACIÓN.....	22
1.3. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LA INCINERACIÓN	24
1.3.1. SISTEMAS DE CONTROL DE CONTAMINANTES	25
1.4. MARCO LEGAL.....	27
1.5. DIAGNÓSTICO DE MANEJO DE RSU EN EL AMB.....	30
2. METODOLOGÍA.....	33
2.1. FASE I.....	33
2.2. FASE II.....	33
2.3. FASE III.....	34
3. RESULTADOS	36
3.1. FASE I. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....	36
3.2. FASE II. DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE PRODUCCIÓN DE RSU EN EL AMB 41	
3.3. FASE III. POTENCIAL ENERGÉTICO E INDICADORES DE DESEMPEÑO	50
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES.....	81
ANEXOS	82

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Disposición de residuos sólidos en vertido sin control.....	19
Figura 2 Disposición de residuos en relleno sanitario	20
Figura 3 Producción de abono a partir de residuos	21
Figura 4 Incineración de residuos sólidos	22
Figura 5 Ubicación geográfica Relleno sanitario El Carrasco	31
Figura 6 Situación actual de El Carrasco	32
Figura 7 Propuesta de sistema de incineración con generación de energía para el AMB	37
Figura 8 Diagrama de bloques del proceso propuesto.....	40
Figura 9 Cantidad mensual de residuos sólidos incinerables arrojados en El Carrasco de 2010 a 2016.....	43
Figura 10 Pruebas de Orden para optimización del modelo matemático con ARX	44
Figura 11 Curvas de los modelos matemáticos más aproximados al historial de RSU del AMB45	
Figura 12 Proyección de los RSU del AMB por método Gaussian de siete términos.	46
Figura 13 Proyección de los RSU del AMB por método Suma de senos.	47
Figura 14 Proyección de los RSU del AMB por método Polinómica de grado ocho.	47
Figura 15 Proyección de los RSU del AMB por medio de Series de Fourier con ocho términos.	48
Figura 16 Proyección de los RSU del AMB con línea de tendencia.....	48
Figura 17 Condiciones asumidas de presión y temperatura del ciclo de incineración	61
Figura 18 Temperatura 2 vs Eficiencia del sistema	65
Figura 19 Temperatura 2 vs Toneladas de residuos diarias requeridas.....	66
Figura 20 Parametrización de la presión 3 vs eficiencia del sistema	67
Figura 21 Parametrización de la presión 3 vs Toneladas de residuos diarias requeridas	68
Figura 22 Temperatura 2 vs eficiencia exergética	70
Figura 23 Presión del condensador vs eficiencia exergética.....	70
Figura 24 Condiciones de presión y temperatura del ciclo de incineración	72
Figura 25 Proyección de potencia útil entregada anualmente a partir de la planta de incineración del AMB.	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Caracterización de los Residuos sólidos urbanos de Bucaramanga y el área metropolitana.....	18
Tabla 2 Parámetros que determinan la eficiencia del proceso de incineración.....	39
Tabla 3 Datos de la producción mensual de residuos incinerables proyectada en cada año.....	49
Tabla 4 Producción diaria de residuos incinerables proyectada para cada año.....	49
Tabla 5 Caracterización de los residuos sólidos incinerables en base húmeda.....	50
Tabla 6 Caracterización de los residuos sólidos incinerables en base seca.....	51
Tabla 7 Exergía y entropía estándar de los productos de la combustión.....	54
Tabla 8 Composición molar en base húmeda.....	56
Tabla 9 Producción de energía eléctrica y térmica proyectada a partir del sistema de incineración de RSU del AMB.....	59
Tabla 10 Entalpías de los reactivos y productos de la combustión.....	59
Tabla 11 Condiciones de T, P y h de los estados del sistema de incineración.....	61
Tabla 12 Proyección de potencia eléctrica útil entregada anualmente a partir de la planta de incineración del AMB.....	77

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - Historial mes a mes de la cantidad de residuos sólidos urbanos depositados en el botadero El Carrasco de 2010 a 2016

JUSTIFICACIÓN

Cada día se están produciendo en el mundo 3,5 millones de toneladas de residuos sólidos [2], cifra que aumenta constantemente debido al aumento demográfico, los cambiantes hábitos de consumo de los países industrializados y en vía de desarrollo, y los cortos ciclos de vida de los productos de la nueva era [3]. El Banco Mundial proyecta que al 2025 la producción habrá incrementado a 6,1 millones de toneladas de residuos diarias [4].

La disposición final de tantos desechos se ha convertido en un reto difícil de superar. Los rellenos sanitarios son actualmente la forma más usada de disposición de residuos sólidos urbanos (RSU) en el mundo [5]. En Colombia, el 72% de los desechos va a dichos depósitos [6], una solución que tiene en apuros a las autoridades ambientales del país. Bucaramanga no es la excepción, su relleno sanitario “El carrasco” debería haberse cerrado por orden de las autoridades ambientales desde el año 2008 [7], debido a los lixiviados, emisiones gaseosas, filtración de metales pesados, transporte de material particulado tóxico en las corrientes de aire, entre otras problemáticas de insostenibilidad que lugares como este representan. Sin embargo, la falta de una alternativa a la disposición de los residuos en la ciudad, ha hecho que el tiempo de funcionamiento de El Carrasco se extienda indebida y constantemente.

Los Residuos sólidos cuentan con un poder calorífico y por tanto con un poder energético que mediante su incineración y uso del calor generado en la quema de los mismos probablemente podría ser aprovechado. De esta forma se podría disminuir considerablemente el volumen de residuos, se eliminarían las emisiones de metano por esta causa, se promovería el reciclaje de los residuos no incinerables y además, se contribuiría al suministro de cierto porcentaje de energía eléctrica y calorífica a la zona aledaña al sistema [8].

Teniendo en cuenta el análisis previo de ventajas y desventajas, en este proyecto se plantea evaluar la factibilidad técnica de un sistema de incineración de residuos sólidos urbanos para la generación de energía eléctrica y/o calorífica en la ciudad de Bucaramanga y el área metropolitana, como una alternativa (líder mundial) a la disposición final de los residuos sólidos de la ciudad.

OBJETIVO DEL PROYECTO

Determinar la factibilidad técnica, mediante análisis exergético, de un sistema de incineración de residuos sólidos urbanos para generación de energía eléctrica y/o calorífica en la ciudad de Bucaramanga y el área metropolitana.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el modelo de incineración de residuos sólidos urbanos más adecuado a las características de los residuos de la zona de Bucaramanga y el área metropolitana.
- Modelar termodinámicamente el sistema de incineración de residuos sólidos propuesto y el posible aprovechamiento energético eléctrico y/o calorífico.
- Establecer indicadores de desempeño para el modelo de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos que permitan valorar la factibilidad técnica del sistema.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación estudió un sistema de incineración de residuos orgánicos con generación de energía eléctrica y térmica para el Área Metropolitana de Bucaramanga, como alternativa a la problemática de disposición final de desechos que representa actualmente el relleno sanitario El Carrasco.

En primer lugar, por medio del historial de residuos sólidos recolectados por la EMAB, el software MATLAB® y los métodos numéricos mínimos cuadrados y series de Fourier, se encontró el modelo matemático que describe el comportamiento de la cantidad de residuos orgánicos producidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga, y se proyectó la cantidad que se prevé será arrojada durante los próximos seis años. Se encontró que la producción de residuos sólidos orgánicos en el AMB se incrementará 22,5 toneladas diarias en promedio cada año. Con el poder calorífico inferior calculado de los residuos (20660) y las cantidades diarias de los mismos proyectadas a arrojar, se encontró la potencia eléctrica y térmica que podría ser entregada por un sistema de incineración con la configuración propuesta de relación trabajo/calor =1,66. Los valores de energía útil generada (descontando la potencia requerida para el auto sostenimiento de la misma) corresponden a 17,5 MW eléctricos y 35 MW térmicos en 2016, y 23 MW eléctricos y 46 MW térmicos en 2022.

Se determinaron y analizaron las variables de temperatura y presión de mayor sensibilidad e influencia respecto a la eficiencia global del ciclo y cantidad de residuos sólidos en toneladas que deberían ingresar a la planta por segundo. Se asumieron, parametrizaron y modificaron las propiedades termodinámicas en cada estado del sistema logrando aumentar la eficiencia general del ciclo basada en PCI de 55,6% a 68,3% y disminuir el consumo de residuos orgánicos de 4,79 a 3,9 kg/s para generar la misma potencia. Se definieron los flujos de aire, vapor, humos, cenizas y residuos y sus condiciones de presión y temperatura.

Se realizó un balance exergético del sistema de incineración propuesto en el cual se encontró altas irreversibilidades que llevaron a baja eficiencia exergética de 29,3%, situación atribuida a la alta temperatura calculada a la salida de los humos de la caldera (749,3 K).

Palabras clave: Análisis exergético, Incineración, Irreversibilidad, Poder calorífico, Residuos sólidos, Series de Fourier.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas la problemática ambiental ha escalado como una prioridad en las políticas gubernamentales de cuantiosas naciones. Entre los aspectos más relevantes del tema, se encuentra la afanosa intención de establecer una relación sostenible con la naturaleza. Para tal fin, se han identificado ciertas situaciones de alto interés para la humanidad, a saber: la finitud del recurso hídrico, la contaminación del mismo, la polución del aire y la pérdida del suelo. En todos los contextos anteriores, es evidente el impacto directo que originan los residuos sólidos generados por los asentamientos humanos; así pues, un punto crítico de control ambiental en la sociedad moderna es el relacionado con la producción, recolección, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de los residuos sólidos [9].

Esto sumado a la inminente necesidad de hallar fuentes de energía más limpias, que contribuyan a suplir el creciente aumento de la demanda energética tanto en Colombia como en el resto del mundo, a partir de procesos de menor riesgo para el medio ambiente.

La mayoría de los países industrializados con densidades de población elevadas han empleado la incineración como procedimiento, alternativo al vertedero controlado, para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos [10].

La utilización de esta tecnología permite reducir en gran medida el peso (75%) y el volumen (90%) de los residuos a tratar y, además, obtener energía. Son precisamente el poder calorífico del material a incinerar y el potencial contaminante de las emisiones dos motivos que han hecho evolucionar los sistemas de incineración hacia procedimientos capaces de alcanzar mayores rendimientos en la combustión y mayor eficacia en la eliminación de contaminantes [8].

La incineración ha sido objeto de críticas desde el punto de vista medioambiental debido a la formación de sustancias muy tóxicas, dioxinas y furanos, que junto a diferentes metales pesados pueden ser emitidos por estas instalaciones. Las disposiciones y normas legales que limitan las emisiones de las incineradoras son cada vez más estrictas de modo que para conseguir su cumplimiento ha sido necesario desarrollar nuevas tecnologías para el sistema de combustión y para el sistema de depuración de gases [11].

Actualmente, la incineración debe contemplarse como una de los posibles elementos que configuran los sistemas de gestión integrada de los residuos sólidos. En estos sistemas debe procederse a la reducción de la generación de residuos, a la recuperación de los materiales reciclables y finalmente al tratamiento y eliminación de los residuos inevitables y no reciclables. Es en esta última etapa donde la incineración compite con otros procesos térmicos o biológicos como tratamiento previo al vertido de los residuos no reciclables en el terreno [12].

De la caracterización de los residuos de la zona y su respectivo análisis térmico, exergético, ambiental y económico, depende la determinación de la factibilidad del proyecto. Las emisiones producidas por la quema, costos del sistema, potencial de los residuos generados en dicha zona, entre otras, son variables determinantes a evaluar.

ANTECEDENTES

El proceso de incineración de los residuos sólidos urbanos fue utilizado inicialmente en la Gran Bretaña, extendiéndose su aplicación a otros países europeos como Alemania, Francia, España, etc., así como a los Estados Unidos de América, Canadá y Japón. Datos presentados por la International Solid Waste Association (ISWA) en su VI Congreso realizado en Madrid, España, en junio de 1992, indican que es en Japón donde existe el mayor número de plantas incineradoras, con 1893; le sigue Francia con 170; los Estados Unidos de América con 168; Italia con 94; Alemania con 47; Dinamarca, 38; Gran Bretaña, 34; Suecia y España 23 y 22 respectivamente; Canadá, 17; Holanda 12 y Hungría 1.

En Suecia, Dinamarca y Japón se incineran aproximadamente el 60% de los residuos sólidos municipales y sólo en los dos primeros países se recupera el 100% de energía generada durante el proceso; en Japón en muy pocas plantas se aprovecha el calor generado por la combustión de los residuos sólidos. A excepción de Holanda, Francia e Italia, donde se utiliza alrededor del 50% de la energía liberada, en los otros países con incineradores, es muy bajo o nulo el aprovechamiento del calor generado.

La recuperación de la energía de los residuos sólidos como energía eléctrica presenta grandes posibilidades y hace más atractivo el proceso de incineración desde el punto de vista económico. La compañía de electricidad de combustión de los Estados Unidos de América diseñó un sistema denominado CPU-400 para recuperar la energía de los residuos sólidos urbanos, como energía eléctrica. Los desechos son quemados en un incinerador de lecho fluidizado y los gases calientes del horno pasan a través de una turbina de gas y llegan a un generador de electricidad [13].

1. MARCO TEÓRICO

1.1. ASPECTOS GENERALES DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

1.1.1. DESCRIPCIÓN DE RESIDUO SÓLIDO URBANO

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) define a los residuos como aquellas materias generadas en actividades de producción y consumo que no alcanzan, en el contexto en que son producidos, ningún valor económico [14]. Ambiguamente, residuo sólido es cualquier producto, materia o sustancia, resultante de la actividad humana o de la naturaleza, que ya no tiene más función para la actividad que fue generada y que para el común de la gente carece de valor [15].

1.1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los Residuos sólidos pueden clasificarse de acuerdo a su *origen* (domiciliar, industrial, comercial, institucional, público), a su *composición* (materia orgánica, vidrio, metal, papel, plásticos, cenizas, polvos, inerte) o de acuerdo a su *peligrosidad* (tóxicos, reactivos, corrosivos, radioactivos, inflamables, infecciosos) [16]. Las características físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos permiten orientar la selección de alternativas técnicas de recolección, transporte, tratamiento y disposición final.

1.1.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL AMB.

Los residuos sólidos se caracterizan por su heterogeneidad. Los constantes cambios en los procesos de producción industrial hacen que los porcentajes de

composición de los residuos varíen con el tiempo, por lo que los datos deben ser lo más actualizados posibles. Los diferentes componentes de los RSU se pueden englobar en cuatro grupos [17]:

- **Orgánicos:** restos de comida, jardinería y otros materiales fermentables. Constituyen el componente principal, disminuyendo su fracción en las zonas más desarrolladas.
- **Vidrio, plástico, cartón y metal:** Suelen conformar el tercer porcentaje de los residuos.
- **Inertes:** Se consideran los materiales leñosos, escombros y escorias.
- **Sanitarios:** Son los residuos peligrosos que deben manejar una disposición final particular y especial.

En la tabla 1 se presentan los porcentajes de composición de los Residuos sólidos urbanos de Bucaramanga y el área metropolitana caracterizada entre los años 2006 y 2015 por el equipo del Plan de Gestión integral de residuos sólidos del AMB (Universidad Industrial de Santander – Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga).

Tabla 1 Caracterización de los Residuos sólidos urbanos de Bucaramanga y el área metropolitana.

Tipo de Residuo	Caracterización
Residuos orgánicos	42,20%
Vidrio	11,28%
Plástico	3,04%
Cartón	1,63%
Metal	1,87%
Inertes	33,44%
Sanitarios	6,54%

Fuente: Plan de Gestión integral de residuos sólidos del AMB. 2015. UIS-CDMB [18]

1.2. SISTEMAS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS

Una vez recogidos los residuos, el siguiente paso en el sistema de gestión es su tratamiento final, que recoge todas las operaciones precisas para la recuperación o la eliminación de dichos residuos. Esta fase concentra todos los procesos de transformación, ya sean mecánicos, químicos, biológicos o de recuperación energética utilizados para valorizar los residuos, así como aquellos que se emplean para el vertido final de los restos no recuperados y de los rechazos de los procesos anteriores. A continuación se describen los procesos de disposición y tratamiento más habituales.

1.2.1. VERTIDO SIN CONTROL

Consiste en la acumulación de residuos sin ningún tipo de tratamiento a cielo abierto (Figura 1). Aunque es la forma más antigua y más económica de deshacerse de los residuos, no es aceptable desde el punto de vista ambiental y de salud humana. En estos vertederos proliferan animales y microorganismos y se generan productos de descomposición que contaminan el suelo, el aire e incluso aguas superficiales. Otros problemas son los malos olores, el impacto paisajístico y los posibles incendios, que liberarían humos tóxicos. Además, como consecuencia de las fermentaciones se produce una composición aproximada de 50% metano y 50% CO₂ [19].

Figura 1 Disposición de residuos sólidos en vertido sin control.



Fuente: Vertedero de residuos COGERSA. 2016 [20]

1.2.2. VERTIDO CONTROLADO O RELLENO SANITARIO

Se denomina vertido controlado cuando se toman las medidas necesarias para evitar todo aquello que pueda resultar nocivo o molesto y pueda resultar en un deterioro del medio (Figura 2). Consiste en el almacenamiento de residuos en terrenos amplios que se excavan y se rellenan con capas alternativas de basura y de tierra compactadas.

Es la técnica de eliminación más utilizada (teóricamente) en el mundo, pues solo un pequeño porcentaje cumple con los requisitos debidos para que sea controlado [19].

Figura 2 Disposición de residuos en relleno sanitario



Fuente: Definición.de [21]

El lugar de depósito de los vertidos debe cumplir una serie de requisitos, entre los que se destaca:

- Necesidad de impermeabilización: con el fin de proteger las aguas Subterráneas de filtraciones. Se realiza mediante revestimientos bituminosos o de alquitrán o bien mediante materias sintéticas (telas plásticas).
- Recogida de lixiviados: Los lixiviados se recogen a través de drenajes subterráneos para su posterior evacuación a colector o planta de tratamiento o para su tratamiento in situ.

- Recogida de gases procedentes de las fermentaciones mediante tubos perforados introducidos en la capa de residuos. El gas recuperado (biogás) puede utilizarse para la generación de energía.

1.2.3. PRODUCCIÓN DE ABONO O COMPOST

El compostaje es un proceso de descomposición biológica, por vía aerobia (en presencia de oxígeno), de la materia orgánica contenida en los residuos en condiciones controladas. Las bacterias actuantes son termófilas, desarrollándose el proceso a temperaturas comprendidas entre 50-70°C, lo que produce la eliminación de los gérmenes patógenos y la inocuidad del producto. El material resultante del proceso, llamado compost, no es enteramente un abono, aunque contiene nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y oligoelementos (manganeso, cobre, hierro), sino más bien, un regenerador orgánico del terreno, razón por la que se ha denominado abono orgánico [19].

Figura 3 Producción de abono a partir de residuos



Fuente: Gestión de biomasa y residuos biofutura. [22]

Esta técnica mejora las propiedades físicas del suelo. La materia orgánica favorece la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola, reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad y permeabilidad, y aumenta su capacidad de retención de agua en el suelo.

Se obtienen suelos más esponjosos y con mayor retención de agua. Además, mejora las propiedades químicas. Aumenta el contenido en macronutrientes N, P, K, y micronutrientes, la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) y es fuente y almacén de nutrientes para los cultivos. Mejora la actividad biológica del suelo. Actúa como soporte y alimento de los microorganismos ya que viven a expensas del humus y contribuyen a su mineralización [19].

1.2.4. INCINERACIÓN

La incineradora es una instalación dónde se produce la combustión controlada a temperaturas muy elevadas (más de 850°C) de la fracción rechazo, residuos de combustión, de los rechazos de otras plantas de tratamiento, entre otras. Toda la materia que entra en la planta incineradora se transforma en cenizas, escorias y gases, obteniendo la energía de la combustión que se puede transformar en electricidad (turbina y generador) o en climatización (intercambiador de calor) [19].

Figura 4 Incineración de residuos sólidos



Fuente: Ent. Innovación ambiental al servicio de la sociedad [23]

En las plantas inclinadoras no se queman todos los residuos, ya que algunos de los materiales no alcanzan su punto de fusión o se crean algunos productos residuales, entre los que se destacan:

- Las escorias, que representan un 20 a 25% en peso de los residuos y son aquel material que queda en el horno y no se ha quemado.
- Las cenizas, materiales volátiles que representan de 2 a 6% en peso de los residuos. Son más peligrosas y contaminantes que las escorias y se deben recoger por separado para ser llevadas a un depósito de residuos controlado.

Para diseñar un sistema de tratamiento de residuos sólidos por incineración es necesario tener en cuenta diferentes características tanto físicas como químicas de los desechos, las cuales influyen en la selección de los equipos, la configuración del método de combustión, la cantidad de energía que sería posible recuperar, entre otros [24]. Dentro de las propiedades físicas de los residuos sólidos urbanos, destacan:

- Humedad: Los porcentajes de humedad de los residuos varían según la zona hasta alcanzar cifras del 60%, A mayor humedad es más difícil obtener una combustión sostenible completa, por lo que se requeriría de un energético adicional en caso de que su porcentaje sea muy alto,
- Peso específico. La densidad de los residuos urbanos es un valor fundamental para dimensionar los recipientes de prerrecojida.
- Granulometría. El grado de segregación de los materiales y el tamaño físico de los componentes elementales de los residuos urbanos, constituyen un valor imprescindible para el dimensionamiento de los equipos de separación, sin embargo este así como el dimensionamiento de los recipientes de prerrecojida, no son objetivo focal del presente proyecto [24].

Las propiedades químicas de los residuos urbanos son factores condicionantes para los cálculos de los procesos de recuperación. El poder calorífico, la composición química, valores de entalpías, entropías, exergías son esenciales en los procesos de recuperación energética, al igual que el porcentaje de

cenizas producido en los mismos. Otras características como la eventual presencia de productos tóxicos, metales pesados, contenido de elementos inertes, etc., son informaciones útiles para diseñar soluciones adecuadas en los procesos de recuperación y para establecer las adecuadas precauciones higiénicas y sanitarias.

En cuanto al poder energético, las propiedades calorimétricas de los residuos urbanos son los parámetros sobre los que se diseñan las instalaciones de incineración y de recuperación energética. Su valoración, fruto de la propia variabilidad de la composición, viene marcada por el poder calorífico de cada producto [25].

El PCI no puede establecerse como fijo a la hora de diseñar una instalación de incineración, ya que su valor varía sensiblemente con la heterogeneidad de los componentes de residuo. Por ello en el presente proyecto se calcula el Poder calorífico inferior de los residuos sólidos de Bucaramanga

Adicionalmente, en el proceso de diseño del sistema se debe tener en cuenta que el punto de fusión de las cenizas oscila entre los 1.100° C y los 1.200° C [24].

1.3. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE LA INCINERACIÓN

Organizaciones no gubernamentales de todo el mundo dedicadas a promover el cuidado del ambiente, se declaran constantemente en contra de los procesos de incineración de residuos, puesto que estos sistemas, cuando no cuentan con sistemas de control de humos, cenizas y escorias, generan contaminantes perjudiciales para el ecosistema y la salud, entre los cuales se destacan:

- Óxidos de Azufre (SO_2 y SO_3)
- Ácido Clorhídrico (HCl)
- Monóxido de carbono procedente de combustión incompleta (CO)

- Óxidos de Nitrógeno (NO_x)
- Compuestos orgánicos, entre los que se encuentran dioxinas, furanos, clorofenoles y clorobencios.
- Metales pesados, tales como plomo, cadmio o mercurio, que volatilizan a tan sólo 330 °C.
- Partículas sólidas de inquemados.

Los productos citados [26] pueden ser eliminados o, en su defecto, minimizados, cumpliendo en todo caso con las normativas vigentes de emisiones contaminantes y reduciendo así los riesgos ambientales y de salud que son la desventaja líder de este sistema.

1.3.1. SISTEMAS DE CONTROL DE CONTAMINANTES

Existen diferentes sistemas que pueden acoplarse al proceso de incineración, para controlar las diferentes emisiones o subproductos provenientes del tratamiento de los residuos [27].

Para el tratamiento de cenizas volantes:

- Precipitadores: Filtros electrostáticos, son los más usados. Consiste en hacer pasar la corriente de gas a través de unos electrodos entre los que se establece una diferencia de potencial. Los electrones libres se adhieren a las partículas cargándolas negativamente. Estas partículas migran hacia el electrodo positivo donde se retiran. Resulta muy eficaz para retirar partículas de diferente tamaño. La eficiencia es casi del 100% para mayores de 10 micras y el 93% para menores de 2 micras.
- Ciclones. No son tan eficaces. Se usan antes que los precipitadores. Se retiran las partículas más gruesas (mayores de 15 micras). El gas se introduce de modo tangencial en un sistema en el que se forma un ciclón de aire, las partículas chocan contra las paredes y caen al fondo y son recogidas. El gas asciende más limpio.

- Filtro de Mangas. Son mucho más eficaces para las partículas finas. Conjunto de bolsas de tela a través de las cuales entra el gas de combustión atravesando los poros de la tela reteniendo las partículas. Cada vez se reduce más el tamaño de poro de la tela, en estas se fijan los contaminantes.

Sistemas lavadores de gases:

- Sistema seco: se inyecta un adsorbente en forma de polvo, que captará el gas y que se recogerá en los filtros de mangas.
- Sistema semiseco: se inyecta una lechada adsorbente, al contactar con el gas se evapora y actúa como un sistema seco.
- Sistema húmedo: se usan torres de lavado en las que se pulveriza el líquido lavador y se pasa el gas a través del lavado alcalino para ácidos y ácidos para alcalinos.
- Filtros de carbono activo. Se usan en la etapa final de la depuración de los gases de combustión. El gas se distribuye de manera homogénea por estos filtros y se reducen las dioxinas, furanos y metales pesados.

Retirar metales pesados:

Algunos poseen un punto de ebullición moderado (Hg, Cd) con lo que se volatilizan y son arrastrados por los gases y al enfriarse pueden condensarse como aerosoles en el horno o pueden adsorberse en las partículas de la chimenea. Aquellos que poseen el punto de ebullición más alto permanecen en las escorias. Para eliminarlos, los que se adsorben en partículas se retiran con éstas.

Retirar ácidos o tóxicos:

Los residuos pueden contener restos de Cl, S, N o F, que pueden generar en la combustión de gases tóxicos y corrosivos. Hay dos sistemas. Uno es hacer reaccionar los ácidos con una base (óxido de calcio = cal viva) hidróxido de Ca o de sodio (NaOH). El problema es que se pueden generar fangos de difícil gestión, de modo que se ha sustituido por la depuración seca en la que se

introducen gotas finas eliminando la producción de lodos ya que el calor del gas los evapora transformándolos en partículas que son retenidas por el filtro de mangas [27].

1.4. MARCO LEGAL

De carácter general:

- Constitución Política de Colombia, 1991.
- Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio Ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental -SINA- y se dictan otras disposiciones.
- Ley 388 de 1997, Ley de Ordenamiento Territorial.
- Ley 732 de 2002, Adopción y aplicación de estratificaciones socioeconómicas urbanas y rurales.

De Servicio público de aseo:

- Ley 142 de 1994, Régimen de Servicios Públicos Domiciliarios.
- Resolución No.1096 de 2000, expedida por el Ministerio de Desarrollo Económico, por la cual se adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.
- Decreto 605 de 1996, Capítulo I del Título IV, por medio del cual se establecen las prohibiciones y sanciones en relación con la prestación del servicio público domiciliario de Aseo.
- Resolución No. 201 de 2001, expedida por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, por la cual se establecen las condiciones para la elaboración, actualización y evaluación de los Planes de Gestión y Resultados.

- Resolución No. 151 de 2001, expedida por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, establece la regulación integral de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.
- Decreto 1713 de 2002, por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 32 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con La Gestión Integral de Residuos Sólidos.
- Resolución No. 233 de 2002 y No. 247 de 2003, expedida por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, establece una opción tarifaria para multiusuarios del servicio de aseo.
- Resolución 236 de 2002 de la CRA, establecimiento de la metodología para la realización de aforos a multiusuarios.
- Decreto 1140 de 2003, Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con el terna de las Unidades de almacenamiento y se dictan otras disposiciones.
- Decreto 1505 de 2003, Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con los planes de gestión integral de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.
- Resolución 1045 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.
- Resolución 351 y 352 CRA de 2005. Por la cual se establecen los regímenes de regulación tarifaria a los que deben someterse las personas prestadoras del servicio público de aseo y la metodología que deben utilizar para el cálculo de las tarifas del servicio de aseo de residuos ordinarios y se dictan otras disposiciones.
- Decreto 838 de 2005, por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.

Sanitario y ambiental:

- Decreto Ley 2811 de 1974, Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
- Ley 9 de 1979, Código Sanitario Nacional, compendio de normas sanitarias para la protección de la salud humana.
- Decreto 02 de 1982, Decreto reglamentario del Código de recursos naturales en cuanto a calidad del aire.
- Decreto 2104 de 1983 Por el cual se reglamenta parcialmente el Título III de la Parte IV del Libro I del Decreto - Ley 2811 de 1974 y los Títulos I y XI de la Ley 9 de 1979 en cuanto a residuos sólidos.
- Decreto 1594 de 1984, Por medio del cual se reglamenta parcialmente la Ley 9 de 1979 y el Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos de aguas y residuos líquidos.
- Resolución No. 541 de 1994, expedida por el Ministerio de Medio Ambiente, por la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de materiales, elementos, concretos y agregados sueltos de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación.
- Decreto 948 de 1995, por el cual se reglamenta parcialmente la ley 23 de 1973, los artículos 33,73, 74, 75 y 76 del Decreto 2811 de 1974; los artículos 41, 43, 44, 45, 48 y 49 de la ley 9 de 1979, y la ley 99 de 1993 en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y protección de la calidad del aire.
- Ley 430 de 1998, por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental referentes a los desechos peligrosos.
- Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos, Ministerio de Medio Ambiente, 1998.
- Política Nacional de Producción Más Limpia, Ministerio de Medio Ambiente, 1998
- Resolución No. 415 de 1998, expedida por el Ministerio de Medio Ambiente, por la cual se establecen los casos en los cuales se permite la

combustión de los aceites de desechos y las condiciones técnicas para realizar la misma.

- Resolución No. 058 de 2002, expedida por el Ministerio de Medio Ambiente, establece normas y límites máximos permisibles de emisión para incineradores y hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos.
- Decreto 1180 de 2003, por medio del cual se reglamenta el título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales.
- Resolución No.150 de 2003, expedida por el Instituto Colombiano Agropecuario, por la cual se adopta el Reglamento técnico de fertilizantes y acondicionadores de suelo para Colombia
- Decreto 4741 de 2005, Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

1.5. DIAGNÓSTICO DE MANEJO DE RSU EN EL AMB

El relleno sanitario del área metropolitana de Bucaramanga (AMB) está localizado entre los municipios de Bucaramanga y Girón en un terreno de 92 hectáreas, es una depresión o cañada natural dentro de los depósitos aluviales de la terraza de Bucaramanga, en el sector central de la zona del Distrito de Manejo Integrado (DMI) declarado por la CDMB, limita con el barrio El Porvenir hacia el oriente.

Es la actual disposición de residuos no sólo del área metropolitana de Bucaramanga, sino también de municipios aledaños, que en orden de densidad poblacional son: Lebrija, Rionegro, El Playón, Charta, Cáchira y Suratá. El relleno se encuentra en funcionamiento desde 1978. La cantidad promedio dispuesta en el día es de 750 toneladas. Aproximadamente 23000 ton/mes [26]. La Figura 5 muestra la ubicación geográfica del Carrasco.

Figura 5 Ubicación geográfica Relleno sanitario El Carrasco



Fuente: Google Earth, 2016.

Este relleno sanitario comenzó a emplearse desde 1978 como un botadero a cielo abierto sin tener ninguna precaución ni control técnico ambiental, por lo que se denominó “Botadero Malpaso”.

Con el paso del tiempo, en 1985, las autoridades ambientales nacionales reaccionaron ante este suceso, por lo que se realizó un convenio entre el municipio de Bucaramanga, las Empresas Públicas de Bucaramanga y la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB), donde se contrató una investigación para realizar la construcción de un relleno sanitario que redujera los daños ambientales ocasionados por el botadero. El resultado de esta investigación generó que las Empresas Públicas de Bucaramanga adquirieran todo el predio del relleno sanitario El Carrasco, como es llamado actualmente [26].

Sin embargo, en los siguientes años se continuó operando sin ningún control sobre la generación de vertimientos líquidos y emisiones gaseosas, generando daños ambientales, sociales y de salubridad sobre los habitantes de los 37 barrios cercanos al Carrasco, según la empresa operadora del botadero EMAB,

la cual fue sancionada en 1999 por la CDMB con la resolución 0898 por el incumplimiento al plan de manejo ambiental de El Carrasco.

A pesar de esta sanción, la empresa EMAB continuó recibiendo fuertes sanciones con respecto al defectuoso manejo técnico y ambiental del relleno sanitario (Figura 6). En el 2002 los habitantes del barrio Porvenir, que por su cercanía al relleno han sido los más perjudicados, impusieron una acción de tutela para cerrarlo. La tutela falló a favor de la comunidad, y en el año 2009 un juzgado de Bucaramanga ordena la clausura inmediata del lugar, y de igual forma ordena a las administraciones de Bucaramanga y el municipio de Girón iniciar las gestiones administrativas para la habilitación de un nuevo sitio de disposición final de basuras. Pero desde ese momento hasta el año 2015 que fue el último plazo para el cierre de El Carrasco, se decretaron una serie de prórrogas al fallo por parte de los mandatarios de los municipios afectados, quienes argumentan que es por la falta de un lugar alternativo que pueda ser adecuado como nuevo relleno sanitario que no se cierra el actual.

En el anexo A del presente proyecto se pueden observar las cifras de cantidades mensuales de residuos depositados en El Carrasco desde 2010 hasta abril de 2016.

Figura 6 Situación actual de El Carrasco



Fuente: Periódico El Tiempo [27]

2. METODOLOGÍA

El presente proyecto se llevó a cabo a través del desarrollo de tres fases, las cuales comprenden las etapas que hicieron posible el cumplimiento de los objetivos del mismo, tal como se expone a continuación.

2.1. FASE I

Dentro de la primera fase se realizó la comparación entre los modelos de conversión de residuos en energía útil, tanto por procesos biológicos como termoquímicos, y se contempló el análisis bibliográfico, de antecedentes y alternativas posibles que permitieron establecer el modelo de incineración de residuos sólidos urbanos más adecuado a las características de los desechos de la zona de Bucaramanga y el área metropolitana.

Además, se sintetizaron los parámetros determinantes para la eficiencia de un proceso de incineración.

2.2. FASE II

El desarrollo metodológico de la fase dos del presente proyecto fue llevado a cabo durante el 4º Curso de Verano de la Investigación Científica para Estudiantes de Excelencia en la Universidad de Guanajuato, campus Salamanca, Guanajuato, México, bajo la orientación del Dr. en ingeniería eléctrica Miguel Ángel Gómez Martínez, director del programa de pregrado de Ingeniería eléctrica de dicha institución. Este proceso contó con la aprobación previa del director general del proyecto, M Sc. Carlos Alirio Díaz González.

En dicha fase se realizó la Determinación del perfil de producción de residuos incinerables para la ciudad de Bucaramanga a partir de los siguientes pasos y el software MATLAB:

- Recopilación del historial de la cantidad de residuos sólidos urbanos depositados en el botadero El Carrasco en los últimos años.
- Obtención del modelo matemático que describe el comportamiento del historial de residuos incinerables de la ciudad de Bucaramanga y el área metropolitana.
- Elaboración de la proyección de residuos incinerables que se generarían en Bucaramanga dentro de los próximos 6 años a través de métodos numéricos.

Con los datos proyectados se obtuvo el flujo de residuos que estaría ingresando periódicamente a la planta, y a partir de allí se calculó posteriormente el potencial energético a generar.

2.3. FASE III

Durante la fase III se construyó la descripción cuantitativa del sistema propuesto de tratamiento de residuos sólidos con generación de energía, su potencial energético e indicadores de desempeño.

Para ello, se definió en primer lugar la composición másica en base húmeda de los residuos a analizar y ésta matemáticamente se convirtió a composición en base seca.

Con la composición másica en base seca se calculó la entropía de los residuos sólidos aprovechables del Área Metropolitana de Bucaramanga y el poder calorífico inferior de los mismos que será llamado en adelante HHV.

El poder calorífico inferior de los residuos en base seca (HHV) es convertido matemáticamente, teniendo en cuenta los porcentajes de humedad y contenido de hidrógeno, a poder calorífico inferior en base húmeda que será llamado en adelante LHV.

A continuación, con los porcentajes máxicos de composición de los residuos en base seca y el peso molecular de cada uno de los componentes se hallan los subíndices que serán usados posteriormente.

Seguidamente, con las exergías y entropías estándar de cada uno de los que serían productos resultantes de la combustión, el poder calorífico inferior de los residuos en base húmeda, los subíndices definidos anteriormente y la entropía de los residuos sólidos se calcula la exergía de los residuos sólidos aprovechables del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Paralelamente, los porcentajes máxicos en base húmeda de los residuos se convierten a moles y estos a fracciones molares para realizar el balance de la combustión teórico y el real, y encontrar así el aire teórico y el factor de aireación.

Seguidamente, con el poder calorífico inferior LHV, el flujo máxico de residuos determinado en la fase 2 y los porcentajes energéticos de un ciclo de cogeneración típico, se calcula la energía eléctrica y térmica recuperable posible del sistema de incineración. Estos datos (Energía eléctrica y térmica) son usados junto con las entalpías del fluido de trabajo para determinar el flujo de combustible (residuos) necesario en el ciclo.

Se iteró para encontrar las condiciones óptimas de potencia, calor útil, flujo de aire y residuos adecuado para que el sistema trabajara de la manera más eficiente, determinándose adicionalmente, los indicadores de desempeño que permitieron valorar la factibilidad técnica del sistema.

3. RESULTADOS

3.1. FASE I. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Tras evaluadas las distintas posibilidades, el contexto regional, los referentes internacionales con resultados de mayor satisfacción y las tendencias de gestión de residuos a nivel mundial, se selecciona desde el planteamiento de este proyecto, la alternativa termoquímica de incineración para el tratamiento de los residuos del Área Metropolitana de Bucaramanga y para en lo posible obtener energía recuperada del sistema de combustión.

La tecnología de tratamiento de residuos con generación de energía más usada en el mundo es la incineración de parrilla, debido a su versatilidad y bajo costo. Sólo un 4% de las instalaciones existentes utiliza otras técnicas como la pirolisis o la gasificación en lecho fluido, las cuales disminuyen considerablemente las emisiones de gases efecto invernadero, sin embargo, la inestabilidad presentada debido a la poca homogeneidad de los residuos que entran en las plantas y los altos costos no permiten su masificación a escala industrial.

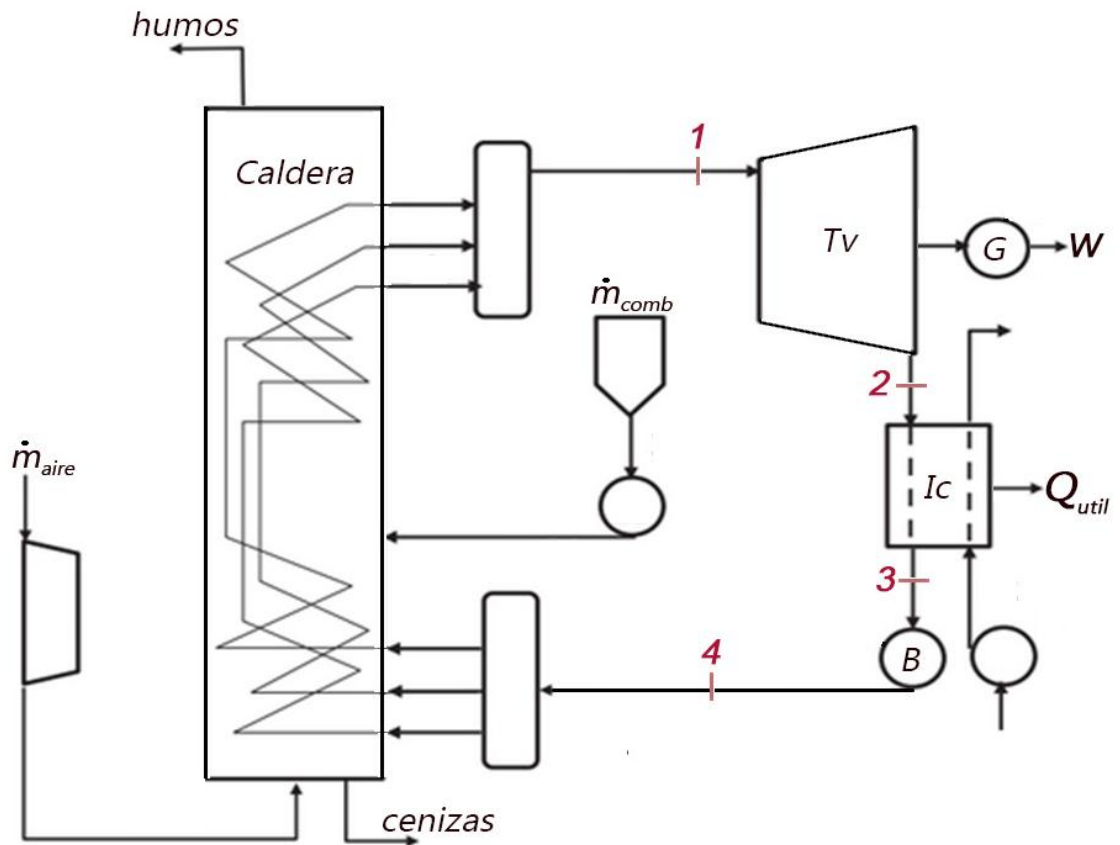
En cuanto a las plantas de incineración de RSU, las diferencias principales radican en la tecnología empleada en la combustión y en el proceso de tratamiento de humos. La forma de enfriar los humos establece una primera clasificación entre:

- Plantas con recuperación de energía.
- Plantas sin recuperación de energía.

Actualmente, el costo de la energía y operacional, las normativas cada vez más estrictas, exigen que las plantas sean construidas implementando un sistema de recuperación de energía pero contribuya al cubrimiento de los costos.

Tras el estudio de casos referentes, construidos en zonas con caracterización de residuos similar a la de Bucaramanga, se diseña la planta de incineración con recuperación de energía eléctrica y térmica que se presenta en la figura 7.

Figura 7 Propuesta de sistema de incineración con generación de energía para el AMB



Fuente: Autor.

Es de resaltar que los residuos sólidos que fueron tenidos en cuenta para el estudio de factibilidad del sistema de incineración son los de *tipo orgánico*, puesto que la exergía de la materia inorgánica es extremadamente baja, lo que aumentaría significativamente el volumen de escombreras, al tiempo que disminuiría la eficiencia del sistema en general.

En este proyecto se sugiere que el potencial de los residuos inorgánicos sea aprovechado bajo técnicas alternativas de recuperación en las que tendrían mayor valor agregado, como por medio del reciclaje.

Las ventajas y limitaciones principales del sistema propuesto son:

Ventajas:

- Reducción de 70 a 75% de masa y cerca de 90% del volumen de los residuos.
- Incentivo al reciclaje de los productos no incinerables.
- No exige grandes áreas como terreno para su operación.
- Se evitan emisiones de metano.
- Es posible recuperar cantidades considerables de energía (70%).
- Creación de una infraestructura industrial inducida de mantenimiento.
- Conservación de puestos de trabajo.

Limitaciones:

- Inversión muy alta en comparación con tratamientos orgánicos.
- Necesita de un sistema de separación de residuos previo, preferiblemente en fuente.
- Necesidad de depuración de humos bastante exigente.
- Coste de mantenimiento muy alto si no existe recuperación de energía.

En la tabla 2 se presentan los parámetros que determinan la eficiencia del proceso de incineración de residuos con generación de energía, los cuales se listan en cuatro factores: lo Relacionado con los residuos sólidos, con la operación, con el equipo y con las emisiones.

El presente proyecto establece unos límites de desempeño que no incluyen el proceso de separación de los residuos. Se asume una separación en la fuente que hace posible que sólo llegue a la planta el material incinerable. Además, en el proceso de tratamiento termoquímico se genera como subproducto humos, escorias y cenizas, los cuales naturalmente requieren de una disposición final especial y adecuada, cuyos tratamientos no son objeto del presente informe.

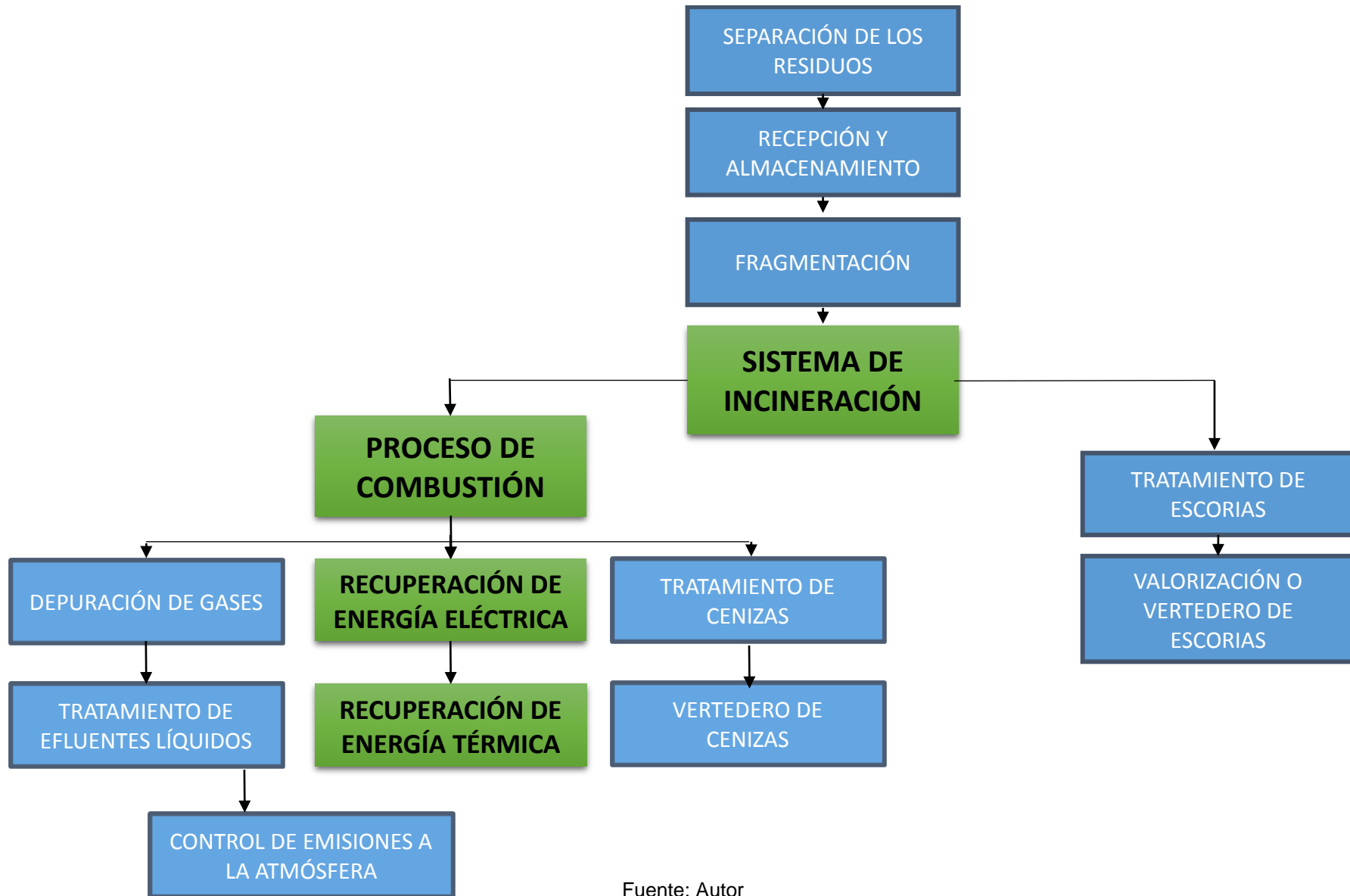
Tabla 2 Parámetros que determinan la eficiencia del proceso de incineración

Factores	Parámetros
Relacionados con los Residuos Sólidos	Composición Química
	Poder Calorífico
	Contenido/halógenos
Relacionados con la Operación	Velocidad de dosificación
	Temperaturas máximas y mínimas (1200 ± 100 °C)
	Aprovisionamiento de agua de Enfriamiento
	Aprovisionamiento de solución Absorbedora
	Porcentaje de destrucción
	Porcentaje de eficiencia
Relacionados con el Equipo	Capacidad Calorífica del Incinerador
	Fallas mecánicas del ventilador de solución
	Eficiencia de remoción del HCL (99%)
Relacionados con las Emisiones	Concentración de partículas (180 mg/m ³)
	Concentración de oxígeno (mínimo de 3%)
	Altas concentraciones de CO (100 ppm)
	Concentración de bifelinos policlorados (0,001 g/kg de BPC alimentados)

Fuente: Autor a partir de [28]

En la figura 8 se resaltan las partes incluidas en el estudio de este proyecto: proceso de combustión, recuperación de energía eléctrica y recuperación de energía térmica.

Figura 8 Diagrama de bloques del proceso propuesto



Fuente: Autor

3.2. FASE II. DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE PRODUCCIÓN DE RSU EN EL AMB

En la fase dos de este proyecto se presenta la obtención del modelo matemático que describe el comportamiento de la cantidad de residuos sólidos incinerables que se han producido en la ciudad de Bucaramanga y el área metropolitana durante los últimos años. Esto se realizó graficando los puntos del historial en el software MATLAB® (MATrix LABoratory) y haciendo uso del método numérico mínimos cuadrados. Posteriormente, se proyectaron los datos con Series de Fourier y se consiguió así los puntos de la cantidad de residuos incinerables que se producirán en los próximos seis años en Bucaramanga, cuya media en el 2017 será de 368333 kg por mes y se incrementará en promedio 20100 kg anuales.

La descripción de los resultados obtenidos en la fase dos se presenta detalladamente a continuación.

1. Recopilación del historial de la cantidad de residuos sólidos urbanos depositados en el botadero El Carrasco en los últimos años.

La Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga (EMAB) suministró para el desarrollo de este proyecto las cantidades mensuales de recolección y disposición final de residuos sólidos en El Carrasco durante los últimos seis años. En el historial se observa el incremento constante de los residuos totales depositados, tal como sucede en la tendencia de producción mundial.

En el anexo A de este documento se adjuntan los datos históricos mes a mes de la cantidad de residuos sólidos dispuestos en la Celda de disposición final del botadero el Carrasco desde enero de 2010 hasta abril del 2016. Dichos datos se cuantificaron disyuntivamente de los residuos cuyo sitio final corresponde a escombrera.

Los residuos arrojados a la celda provienen de:

Municipio de Bucaramanga

Municipio de Floridablanca

Municipio de Girón

Municipio de Piedecuesta

Municipio de Lebrija

Municipio de Rionegro

Municipio de Playón

Municipio de Suratá

Municipio de Charta

Municipio de Los Santos

Municipio de Tona

Municipio de California

Municipio de Matanza

Municipio de Sabana de Torres

Ruitoque

Vijagual

Municipio de Vetas

Municipio de Zapatoca

La Mariana

Suaita

San Gil

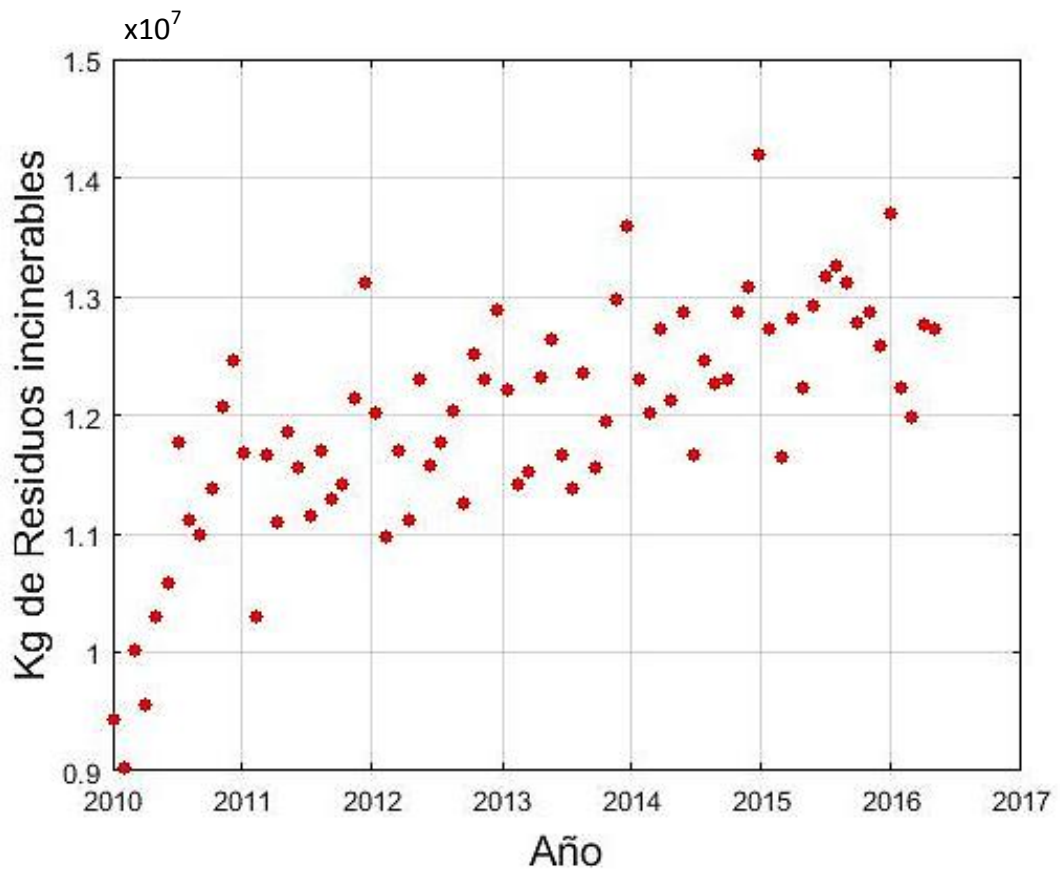
Municipio de Barrancabermeja.

2. Obtención del modelo matemático que describe el comportamiento del historial de residuos incinerables de la ciudad de Bucaramanga y el área metropolitana.

La obtención del modelo matemático partió del uso del historial suministrado por la EMAB de cantidad en Kg de RSU recolectados y depositados mensualmente por la Empresa en el relleno sanitario El Carrasco desde enero de 2010 hasta abril de 2016.

En primer lugar se enlistaron los totales de residuos mensuales arrojados y en una segunda columna la masa correspondiente a los residuos que serían incinerables en la planta (orgánicos, según se mencionó en los resultados de la fase uno). El historial de residuos incinerables se graficó en MATLAB® como se muestra en la Figura 9, donde en el eje x se observa el Tiempo en años, y en el eje y los Kg de residuos incinerables en una escala $\times 10^7$.

Figura 9 Cantidad mensual de residuos sólidos incinerables arrojados en El Carrasco de 2010 a 2016.

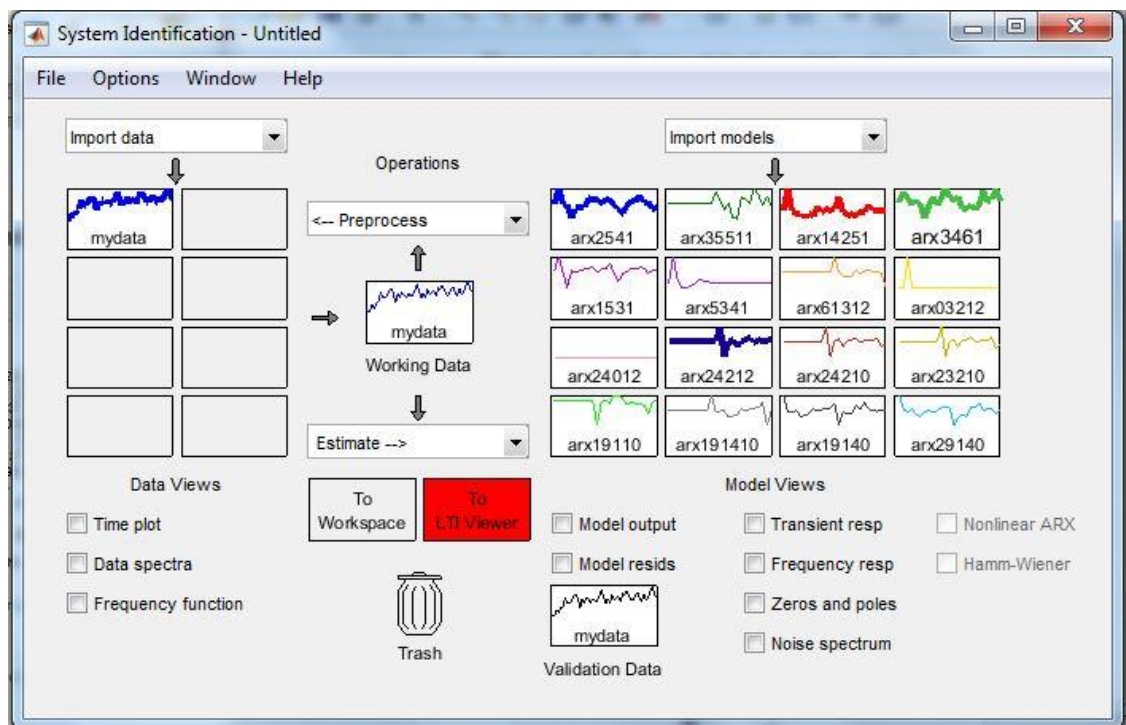


Fuente: Autor en Matlab a partir de datos suministrados por la EMAB [Anexo A]

Posteriormente, en la herramienta ident (System Identification Toolbox) de MATLAB®, se importaron los datos del historial de residuos incinerables en el dominio del tiempo. Seguidamente, se realizaron las estimaciones pertinentes

de modelos polinómicos (Polynomial Models), tomando como principio la estructura ARX (mínimos cuadrados) como se muestra en la figura 10. Esto se realizó variando el orden del modelo matemático (zeros y polos) hasta conseguir la curva que más se aproximara a los datos importados preliminarmente.

Figura 10 Pruebas de Orden para optimización del modelo matemático con ARX

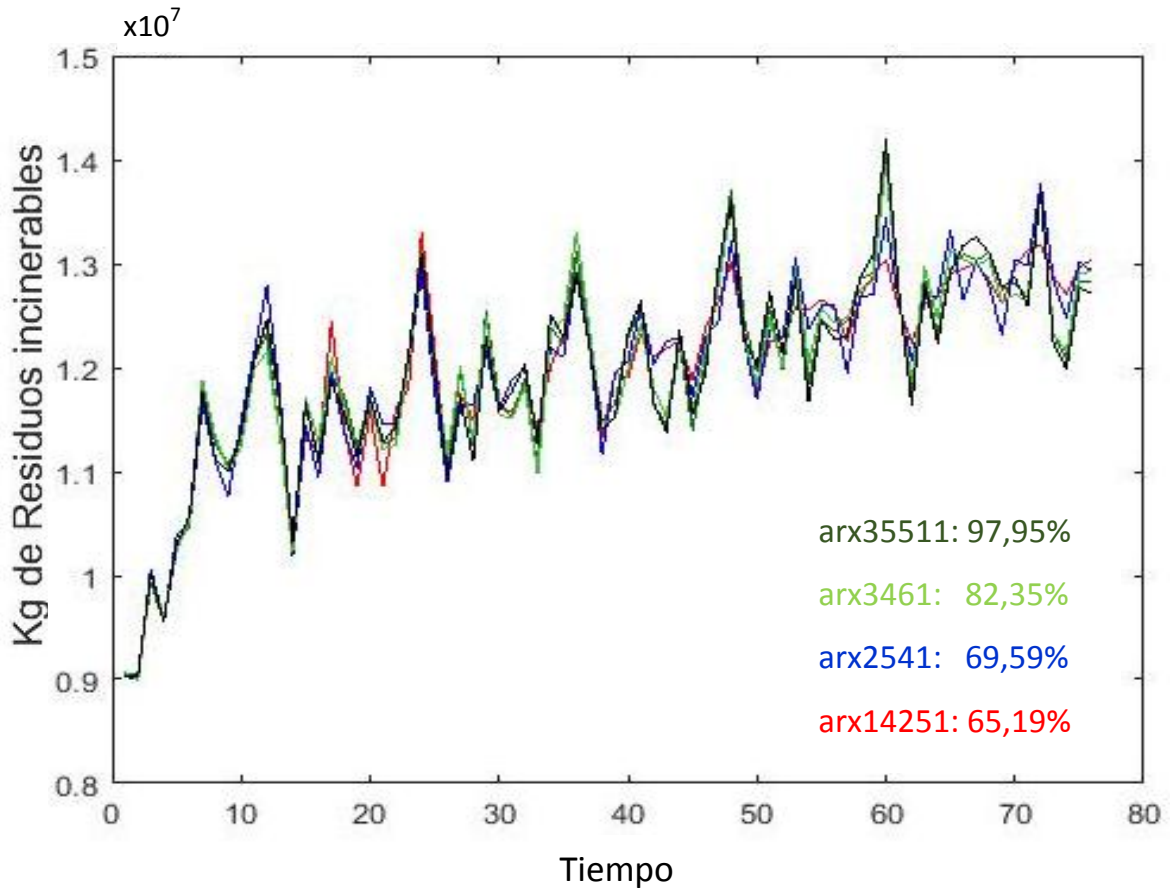


Fuente: Autor en MATLAB ®

Algunas de las curvas obtenidas se muestran en la figura 11, donde el tiempo se ilustra por número de meses, siendo enero de 2010 el mes uno (1) y así continuadamente hasta abril de 2016, mes setenta y seis (76), y la curva elegida para representar el comportamiento del historial de residuos del AMB es la curva arx35511, por mayor aproximación a los datos con un porcentaje de acierto de 97,95% que se expone en color verde.

Los porcentajes de certeza de cada modelo matemático se muestran en la parte inferior derecha de la figura en mención.

Figura 11 Curvas de los modelos matemáticos más aproximados al historial de RSU del AMB



Fuente: Autor en MATLAB ®

De esta forma se obtuvo la descripción matemática por el método de mínimos cuadrados que describe con mayor exactitud el comportamiento del historial de residuos incinerables de Bucaramanga y es la siguiente:

$$\text{Modelo ARX en tiempo discreto} = A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$$

Donde,

- $A(z) =$

$$1 - 0.2253 z^{-1} + 0.6632 z^{-2} - 0.2913 z^{-3} + 0.7436 z^{-4} + 0.5959 z^{-5} + 0.2442 z^{-6} + 0.4119 z^{-7} + 0.2865 z^{-8} + 0.4322 z^{-9} + 0.3481 z^{-10} - 0.1227 z^{-11} - 0.0909 z^{-12} + 0.2446 z^{-13} + 0.6963 z^{-14} - 0.01237 z^{-15} + 0.3454 z^{-16} - 0.08912 z^{-17} + 0.4891 z^{-18} + 0.2605 z^{-19} + 0.5958 z^{-20} - 0.01712 z^{-21} + 0.7832 z^{-22} + 0.2465 z^{-23} + 0.2881 z^{-24} + 0.4278 z^{-25} + 0.0301 z^{-26} + 0.619 z^{-27} +$$

$$0.1331 z^{-28} + 0.1595 z^{-29} + 0.08898 z^{-30} - 0.234 z^{-31} + 0.3139 z^{-32} - 0.3446 z^{-33} + 0.2185 z^{-34} + 0.254 z^{-35}$$

- $B(z)=$

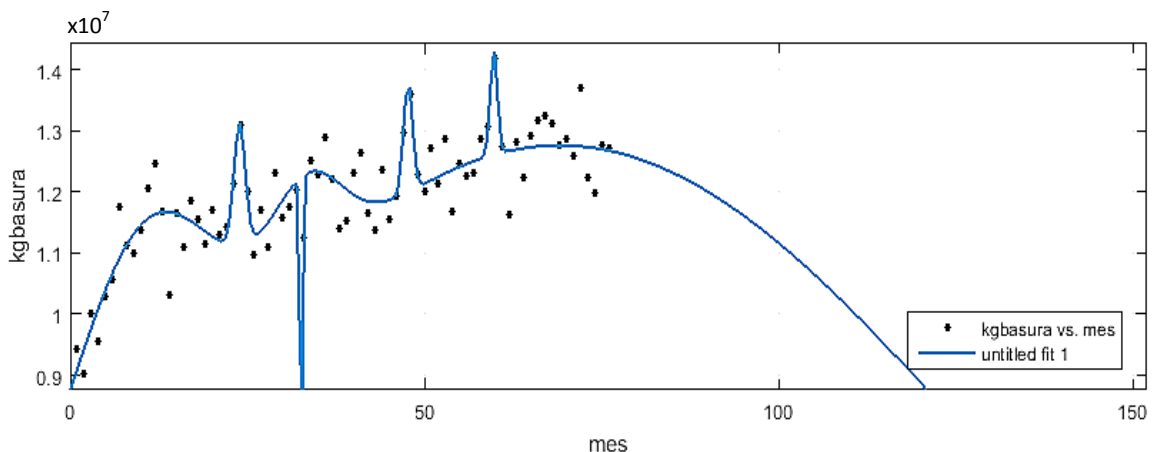
$$2.559e09 z^{-1} - 2.533e09 z^{-5}$$

3. Elaboración de la proyección de residuos incinerables que se generarían en Bucaramanga dentro de los próximos años.

Tras descrito el historial se procedió a obtener la proyección de lo que será la cantidad de residuos sólidos incinerables arrojados en los 6 años venideros. El periodo de proyección usado (seis años) es igual (no mayor) al tiempo del historial con que se cuenta para así evitar la presencia de un porcentaje de error agregado. Para ello se usó la herramienta Curve Fitting de MATLAB ®.

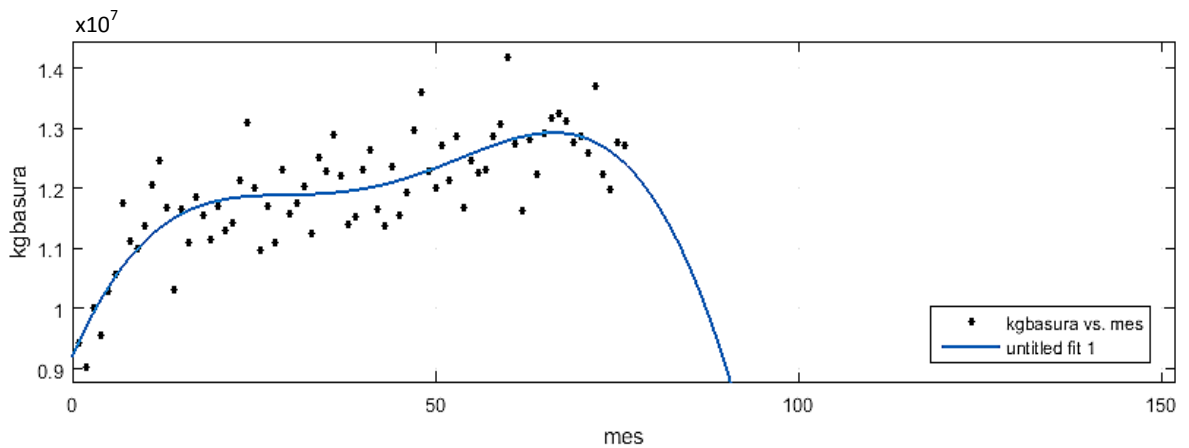
Se usaron distintos métodos numéricos: Gaussian de siete términos, Suma de senos y polinómica de grado ocho, como se muestra en las figuras 12, 13 y 14, respectivamente.

Figura 12 Proyección de los RSU del AMB por método Gaussian de siete términos.



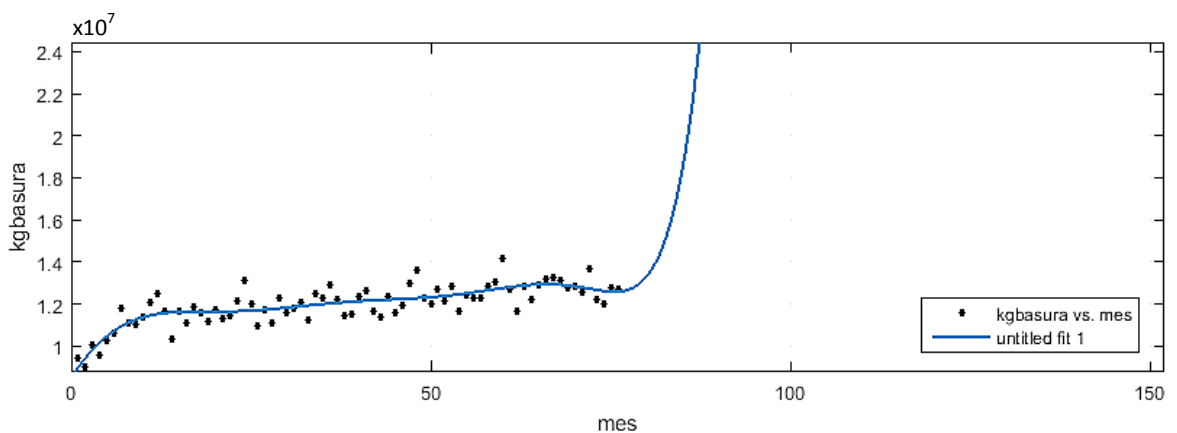
Fuente: Autor en MATLAB ®

Figura 13 Proyección de los RSU del AMB por método Suma de senos.



Fuente: Autor en MATLAB ®

Figura 14 Proyección de los RSU del AMB por método Polinómica de grado ocho.



Fuente: Autor en MATLAB ®

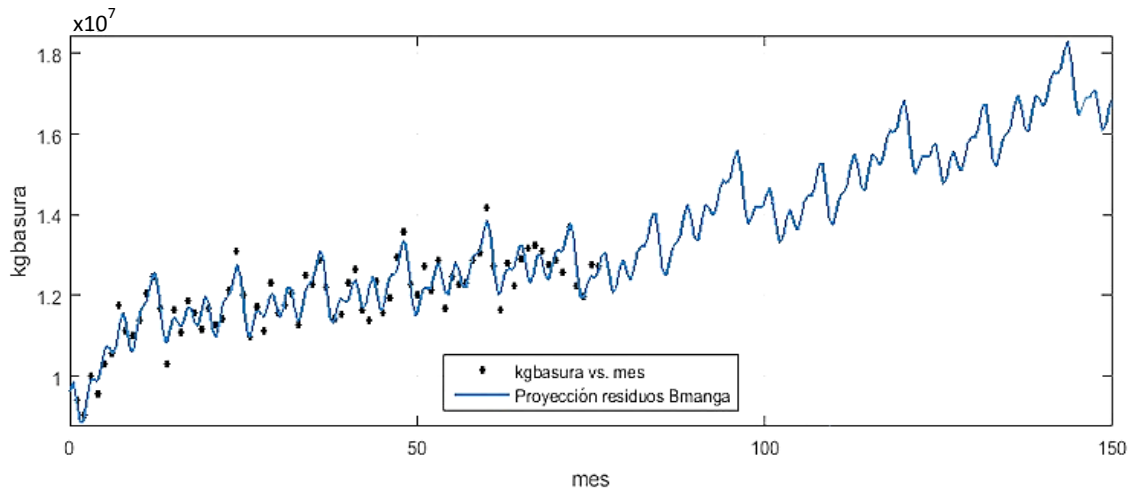
Sin embargo, en ninguna de las proyecciones mencionadas se obtuvo una aproximación aceptable, por lo que tras haber importado en la toolbox los datos históricos se seleccionó el método numérico de series de Fourier con 8 términos y se ajustaron los límites de la gráfica en Adjust axes limits (ajustar los límites de los ejes) como se explica a continuación.

El valor del límite máximo del eje X (era 76) se reemplazó por el número de meses que se esperaba ver graficado (152); de esta manera, se obtuvo la

curva, no sólo de los datos históricos (6 años y 4 meses), sino también de la proyección para los seis años siguientes.

El resultado del historial y la proyección se muestra en la figura 15.

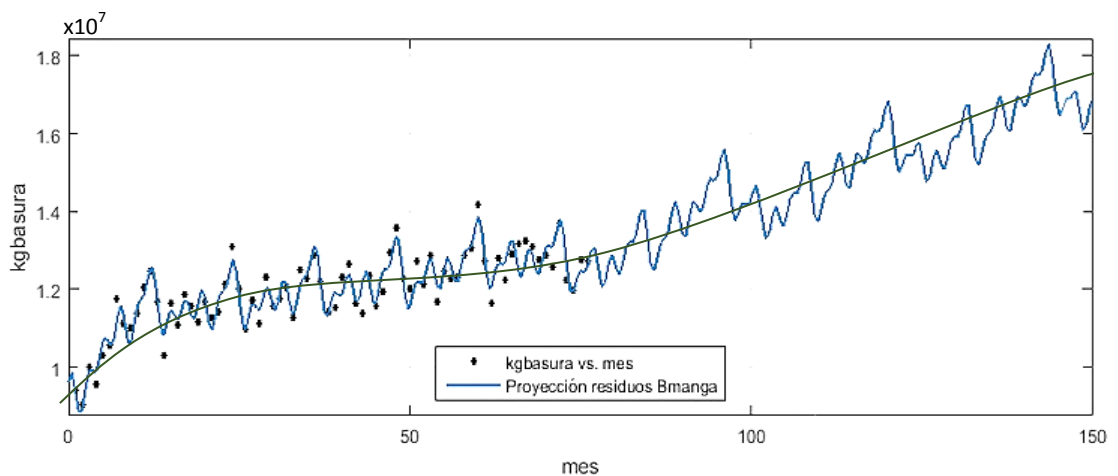
Figura 15 Proyección de los RSU del AMB por medio de Series de Fourier con ocho términos.



Fuente: Autor en MATLAB ®

Tras optimizada la proyección de los datos de los residuos que estarán arrojándose en Bucaramanga y el área metropolitana en los próximos seis años, se trazó la línea de tendencia de la ecuación tal como se muestra en la figura 16.

Figura 16 Proyección de los RSU del AMB con línea de tendencia.



Fuente: Autor en MATLAB ®

Posteriormente, se tabularon parejas de puntos de la línea de tendencia, correspondientes al mes de junio de cada uno de los años venideros como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Datos de la producción mensual de residuos incinerables proyectada en cada año.

	Eje X	Eje Y
Mes	Número de mes	Kg residuos incinerables por mes [x10 ⁷]
Junio 2016	78	1,30
Junio 2017	90	1,36
Junio 2018	102	1,40
Junio 2019	114	1,48
Junio 2020	126	1,57
Junio 2021	138	1,67
Junio 2022	150	1,71

Fuente: Autor a partir de la proyección en MATLAB®

Al dividir cada una de las cantidades de kilogramos de residuos incinerables por mes tabulados, entre treinta (número de días del mes), se obtuvo la cantidad de kilogramos incinerables por día. A estos datos se les extrajo el 85% que es el porcentaje de recuperación estimado entraría en la planta de incineración. El 15% de la producción orgánica restante se desestimaría por razones diversas. Los datos mencionados anteriormente se exponen en la tabla 4.

Tabla 4 Producción diaria de residuos incinerables proyectada para cada año.

Mes	Número de mes	Kg residuos incinerables por día	Porcentaje de recuperación 85%	Toneladas residuos incinerables por día
Junio 2016	78	433333	368333	368
Junio 2017	90	453333	385333	385
Junio 2018	102	466667	396666	396
Junio 2019	114	493333	419333	419
Junio 2020	126	523333	444833	444
Junio 2021	138	556667	473166	473
Junio 2022	150	570000	484500	484

Fuente: Autor

3.3. FASE III. POTENCIAL ENERGÉTICO E INDICADORES DE DESEMPEÑO

En esta fase se definió el flujo de energía eléctrica y térmica en MW que se podría recuperar con la planta de incineración a partir de los residuos orgánicos proyectados para el AMB y sus características.

Se partió de la caracterización másica en base húmeda de los residuos orgánicos, la cual se muestra en la tabla 6.

Tabla 5 Caracterización de los residuos sólidos incinerables en base húmeda

Componente	Kg
Carbono (C)	71,0
Hidrógeno (H ₂)	9,2
Azufre (S)	3,4
Oxígeno (O ₂)	2,1
Nitrógeno (N ₂)	0,6
Humedad (H ₂ O)	12,2
Total	100

Fuente: Combustion and incineration processes. Applications in environmental engineering.
Niessen, Walter. Pg 29 [29]

La caracterización másica se llevó matemáticamente a porcentajes en base seca, eliminando la cifra correspondiente a humedad y extrapolando los datos restantes a base 100.

$$100\% - 12,2\% [H_2O] = 87,8\%$$

- Carbono (C)

$$87,8\% \rightarrow 100\%$$

$$71,0\% \rightarrow x$$

$$x = 80,87\%$$

- Hidrógeno (H₂)

87,8% → 100%

9,2% → x

$$x = 10,48\%$$

- Azufre (S)

87,8% → 100%

3,4% → x

$$x = 3,88\%$$

- Oxígeno (O₂)

87,8% → 100%

2,1% → x

$$x = 2,39\%$$

- Nitrógeno (N₂)

87,8% → 100%

0,6% → x

$$x = 0,68\%$$

La caracterización de los residuos sólidos incinerables en base seca obtenida se muestra en la tabla 6.

Tabla 6 Caracterización de los residuos sólidos incinerables en base seca

Componente	Kg
Carbono (C)	80,87
Hidrógeno (H ₂)	10,48
Azufre (S)	3,88
Oxígeno (O ₂)	2,39
Nitrógeno (N ₂)	0,68
Total	100

Fuente: Autor

Posteriormente, con las ecuaciones (28) y (23) del artículo de Eboh Francis "Estimating the specific chemical exergy of municipal solid waste" [30] y la

composición másica de los residuos en base seca (tabla 6) se calculó la entropía de los residuos sólidos aprovechables del Área Metropolitana de Bucaramanga y el poder calorífico inferior de los mismos (HHV).

- Cálculo de la entropía de los residuos sólidos incinerables (RSI) en kJ/kgK

Ecuación para el cálculo de la entropía [30]:

$$S_{RSI} = 0,0101 * C + 0,0630 * H + 0,0106 * O + 0,0108 * N + 0,0155 * S$$

Reemplazo de los porcentajes másicos en base seca:

$$S_{RSI} = 0,0101 * (80,87) + 0,0630 * (10,48) + 0,0106 * (2,39) + 0,0108 * (0,68) + 0,0155 * (3,88)$$

$$S_{RSI} = 1,569 \frac{kJ}{kgK}$$

- Cálculo del poder calorífico inferior de los residuos incinerables en base seca (HHV) en MJ/kg

Ecuación para el cálculo del HHV [30]:

$$HHV = 0,364 * C + 0,863 * H + 0,075 * O + 0,028 * N - 1,633 * S$$

Reemplazo de los porcentajes másicos en base seca:

$$HHV = 0,364 * (80,87) + 0,863 * (10,48) + 0,075 * (2,39) + 0,028 * (0,68) - 1,633 * (3,88)$$

$$HHV = 31,984 \frac{MJ}{kg}$$

El HHV se convirtió a poder calorífico inferior en base húmeda (LHV) teniendo en cuenta los porcentajes de humedad y contenido de hidrógeno, como se explica en el artículo “Biomasa y sus propiedades como combustible” de Héctor Jara Millar [31].

- Conversión del poder calorífico inferior de los residuos a base húmeda

Ecuación para el cálculo del LHV [31]:

$$LHV = HHV * \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 2,447 * \frac{w}{100} - \left(\frac{h}{100} * 2\right) * 18,02 * 2,447 + \left(1 - \frac{w}{100}\right)$$

Donde,

w=humedad (% H₂O)

h=contenido de hidrógeno (% H₂)

Reemplazo de HHV y los porcentajes de H₂O y H₂:

$$LHV = 31,984 * \left(1 - \frac{12,2}{100}\right) - 2,447 * \frac{12,2}{100} - \left(\frac{9,2}{100} * 2\right) * 18,02 * 2,447 + \left(1 - \frac{12,2}{100}\right)$$

$$LHV = 20,6603 \frac{MJ}{kg}$$

Seguidamente, con los porcentajes máxicos de composición de los residuos en base seca y el peso molecular de cada uno de los componentes se halló los subíndices m, n, p, q, r y t [30] que luego se usaron para el cálculo de la exergía de los RSI.

$$m = 0,01 * \frac{C}{12,011} = 0,01 * \frac{80,87}{12,011} = 0,06732$$

$$n = 0,01 * \frac{H}{1,008} = 0,01 * \frac{10,48}{1,008} = 0,10396$$

$$p = 0,01 * \frac{N}{14,007} = 0,01 * \frac{0,68}{14,007} = 0,000485$$

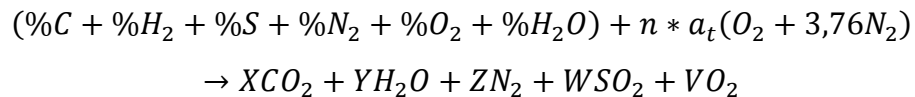
$$q = 0,01 * \frac{O}{15,999} = 0,01 * \frac{2,39}{15,999} = 0,00149$$

$$r = 0,01 * \frac{Cl}{35,45} = 0,01 * \frac{0}{35,45} = 0$$

$$t = 0,01 * \frac{S}{32,066} = 0,01 * \frac{3,88}{32,066} = 0,00121$$

A continuación, se calculó la exergía de los residuos sólidos incinerables del AMB con las exergías y entropías estándar de cada uno de los que serían productos resultantes de la combustión, el LHV, los subíndices definidos anteriormente y la entropía de los residuos sólidos.

- La ecuación de la combustión de los residuos orgánicos es la siguiente:



En la tabla 7 se presentan las exergías y entropías químicas estándar de los productos de la combustión.

Tabla 7 Exergía y entropía estándar de los productos de la combustión

Componente	Exergía [kJ/kmol]	Entropía [kJ/kmol.K]
CO ₂	20140	214
O ₂	3970	205
H ₂ O	3120	70
N ₂	720	192
SO ₂	303500	248
HCl	85950	187

Fuente: T J Kotas. The Exergy method of thermal plant analysis [32]

Con los datos mencionados anteriormente y la ecuación propuesta en la referencia [30] se calculó la exergía química específica de los residuos incinerables del AMB. Se tomó T_o temperatura ambiente como 298,15 K

- Cálculo de la exergía química específica de los RSU del AMB en kJ/kg.

Ecuación para el cálculo de la exergía de los RSI [30]:

$$\begin{aligned}
 e_{RSI} = m * [& (e_{CO_2}^o + T_o * S_{CO_2}^o) - (e_{O_2}^o + T_o * S_{O_2}^o)] \\
 & + \frac{n}{2} \left[(e_{H_2O}^o + T_o * S_{H_2O}^o) - \frac{1}{2} (e_{O_2}^o + T_o * S_{O_2}^o) \right] + \frac{q}{2} (e_{O_2}^o + T_o * S_{O_2}^o) \\
 & + \frac{p}{2} (e_{N_2}^o + T_o * S_{N_2}^o) + t \left[(e_{SO_2}^o + T_o * S_{SO_2}^o) - (e_{O_2}^o + T_o * S_{O_2}^o) \right] \\
 & - \frac{r}{2} \left[(e_{H_2O}^o + T_o * S_{H_2O}^o) - \frac{1}{2} (e_{O_2}^o + T_o * S_{O_2}^o) - 2(e_{HCl}^o + T_o * S_{HCl}^o) \right] \\
 & + LHV - T_o * S_{RSI}^o
 \end{aligned}$$

Reemplazo de los datos:

$$\begin{aligned}
 e_{RSI} = 0,067 * [& (20140 + 298,15 * 214) - (3970 + 298,15 * 205)] \\
 & + \frac{n}{2} \left[(3120 + 298,15 * 70) - \frac{1}{2} (3970 + 298,15 * 205) \right] \\
 & + \frac{q}{2} (3970 + 298,15 * 205) + \frac{p}{2} (720 + 298,15 * 192) \\
 & + t \left[(303500 + 298,15 * 248) - (3970 + 298,15 * 205) \right] \\
 & - \frac{r}{2} \left[(3120 + 298,15 * 70) - \frac{1}{2} (3970 + 298,15 * 205) \right. \\
 & \left. - 2(85950 + 298,15 * 187) \right] + 20660 - 298,15 * 1,569
 \end{aligned}$$

$$e_{RSI} = 21455,12 \frac{kJ}{kg}$$

De forma paralela, se realizaron los balances de combustión y de energía. Para ello, los porcentajes másicos en base húmeda de los residuos se convirtieron a moles y estos últimos a fracciones molares.

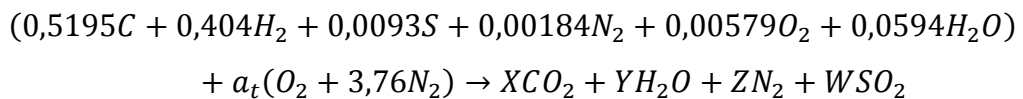
Tabla 8 Composición molar en base húmeda

Componente	Porcentaje másico	mol	Fracciones molares
Carbono (C)	71	5,916	0,5195
Hidrógeno (H ₂)	9,2	4,6	0,4040
Azufre (S)	3,4	0,106	0,0093
Oxígeno (O ₂)	2,1	0,066	0,00579
Nitrógeno (N ₂)	0,6	0,021	0,00184
Humedad (H ₂ O)	12,2	0,677	0,0594

Fuente: Autor

Con las fracciones molares se realizó el balance de la combustión teórico y el real, y se halló así el aire teórico y el factor de aireación.

- Cálculo del aire teórico (a_t)



$$C \rightarrow 0,5195 = X$$

$$H \rightarrow 0,808 + 0,1184 = 2Y$$

$$O \rightarrow 0,01158 + 0,0594 + 2a_t = 2X + Y + 2W$$

$$N \rightarrow 0,00368 + 7,52a_t = 2Z$$

$$S \rightarrow 0,0093 = W$$

$$X \rightarrow 0,5195$$

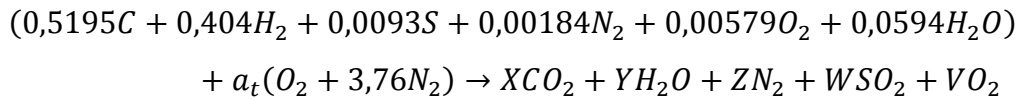
$$Y \rightarrow 0,4632$$

$$Z \rightarrow 2,6925$$

$$W \rightarrow 0,0093$$

$$a_t \rightarrow 0,7249$$

- Cálculo de factor de aireación (n)



$$a_t \rightarrow 0,7249$$

$$C \rightarrow 0,5195 = X$$

$$H \rightarrow 2 * 0,404 + 2 * 0,0594 = 2Y$$

$$O \rightarrow 2 * 0,00579 + 0,0594 + n * 2 * a_t = 2X + Y + 2W + 2V$$

$$N \rightarrow 2 * 0,00184 + n * 2 * 3,76 * a_t = 2Z$$

$$S \rightarrow 0,0093 = W$$

$$n \rightarrow 1,961$$

Posteriormente, con el poder calorífico inferior en base húmeda LHV, el flujo másico diario de residuos determinado en la fase 2 y los porcentajes energéticos de un ciclo de cogeneración típico [33] se calculó la energía eléctrica y térmica recuperable posible del sistema de incineración.

Ecuación para el cálculo de la energía:

$$Energía_{t,e,p} = \frac{\dot{m}}{\text{día}} * LHV * \frac{1\text{día}}{86400s} * \text{factor de planta} * \%_{t,e,p} * 0,95^*$$

t = térmica (50%)

e = eléctrica (30%)

p = perdida (20%)

$\dot{m}_{2016} = 368333 \text{ kg/día}$

$LHV = 20,66 \text{ MJ/kg}$

$\text{factor de planta} = 0,8$

* → este término(0,95) se usa sólo para el cálculo de energía eléctrica, corresponde a la eficiencia del acople entre la turbina de vapor y el generador.

- Cálculo de la energía térmica que podría ser generada con el flujo diario de residuos orgánicos de 2016.

$$Energía_{t\acute{e}rmica} = 368333 \frac{kg}{d\acute{a}a} * 20,66 \frac{MJ}{kg} * \frac{1d\acute{a}a}{86400s} * 0,8 * 0,5$$

$$Energía_{t\acute{e}rmica} = 35,23 \text{ MW}$$

- Cálculo de la energía eléctrica que podría ser generada con el flujo diario de residuos orgánicos de 2016.

$$Energía_{el\acute{e}ctrica} = 368333 \frac{kg}{d\acute{a}a} * 20,66 \frac{MJ}{kg} * \frac{1d\acute{a}a}{86400s} * 0,8 * 0,3 * 0,95$$

$$Energía_{el\acute{e}ctrica} = 20,0811 \text{ MW}$$

- Cálculo de la energía perdida en el proceso de conversión del sistema con el flujo diario de residuos orgánicos de 2016.

$$Energía_{perdida} = 368333 \frac{kg}{d\acute{a}a} * 20,66 \frac{MJ}{kg} * \frac{1d\acute{a}a}{86400s} * 0,8 * 0,2$$

$$Energía_{perdida} = 14,092 \text{ MW}$$

El flujo de residuos orgánicos diario aumenta cada año, por ello, la energía eléctrica y térmica que podría ser generada también varía con el tiempo. En la tabla 9 se presenta los resultados de los cálculos de energía para cada uno de los seis años proyectados.

Tabla 9 Producción de energía eléctrica y térmica proyectada a partir del sistema de incineración de RSU del AMB

	Energía térmica [MW]	Energía eléctrica [MW]
2016	35,230	20,081
2017	36,856	21,007
2018	37,940	21,625
2019	40,108	22,861
2020	42,547	24,251
2021	45,257	25,796
2022	46,341	26,413

Fuente: Autor

Estos datos (energía eléctrica y térmica) se usaron con las entalpías del fluido de trabajo en cada una de las cuatro etapas ilustradas en el diseño de la planta, para determinar el flujo de combustible (residuos sólidos) necesario en el ciclo para que este funcione eficientemente.

En primer lugar, en la fase de diseño de la planta se determinó que la temperatura de productos será de $1200\text{ }^{\circ}\text{C} = 1573\text{ K}$, por lo tanto fue a esta temperatura que se calcularon las entalpías de los productos de la combustión. Las entalpías de los reactivos, por su parte, se hallaron a partir de la temperatura de reacción (ambiente) 300 K . Las entalpías calculadas en el software EES se muestran en la tabla 10.

Tabla 10 Entalpías de los reactivos y productos de la combustión

Reactivos [$T_r=300\text{K}$]		Productos [$T_p=1573\text{K}$]	
Componente	Entalpía [kJ/kmol]	Componente	Entalpía [kJ/kmol]
C	0	CO ₂	-327541
H ₂	53,5	H ₂ O	-190112
S	277197	N ₂	40926
O _{2,r}	54,11	SO ₂	-230453
N _{2,r}	53,78	O ₂	43258
H ₂ O _r	-241749		

Fuente: Datos de EES.

Con las entalpías y las fracciones molares respectivas se realizó el balance de energía.

- Balance de energía

$$H_{\text{productos}} = H_{\text{reactivos}}$$

$$H_{\text{productos}} = X * h_{\text{CO}_2} + Y * h_{\text{H}_2\text{O}} + Z * h_{\text{N}_2} + V * h_{\text{O}_2} + W * h_{\text{SO}_2}$$

$$H_{\text{reactivos}} = 0,5195 * h_C + 0,404 * h_{\text{H}_2} + 0,0093 * h_S + 0,00579 * h_{\text{O}_2r} + 0,00184 * h_{\text{N}_2r} + 0,0594 * h_{\text{H}_2\text{O}r} + n * a_t + h_{\text{O}_2r} + n * a_t + 3,76h_{\text{N}_2r}$$

Se calculó la relación Aire combustible teórica y real de la planta.

- Relación aire combustible teórica

$$AC_{\text{teórico}} = \frac{a_t * 4,76 * 28,84}{1 * 8,64}$$

$$AC_{\text{teórico}} = 11,52$$

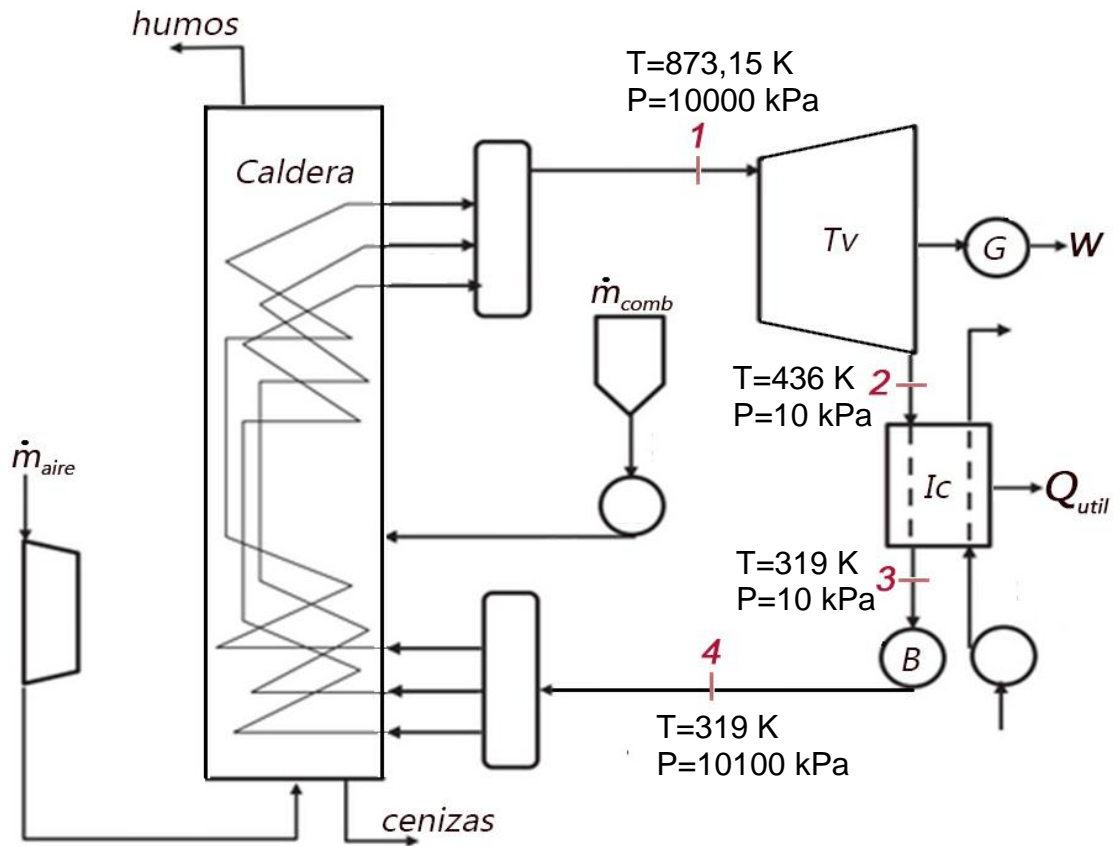
- Relación aire combustible real

$$AC_{\text{real}} = \frac{n * a_t * 4,76 * 28,84}{1 * 8,64}$$

$$AC_{\text{real}} = 22,59$$

A continuación se muestran las condiciones de presión y temperatura asumidas para cuatro etapas del ciclo. Fueron planteadas con base en las referencias bibliográficas citadas en la parte inferior de la figura.

Figura 17 Condiciones asumidas de presión y temperatura del ciclo de incineración



Fuente: Autor a partir de [32] y [34]

A partir de las condiciones de presión y temperatura descritas en la figura 17 se encontraron las entalpías de los estados que se exponen en la tabla 11.

Tabla 11 Condiciones de T , P y h de los estados del sistema de incineración.

Estado	Temperatura [K]	Presión [kPa]	Entalpía [kJ/kg]
1	873,15	10000	3624
2	436	10	2807
3	319	10	191,8
4	319	10100	200,6

Fuente: Cálculos EES

Con las entalpías de los estados 1 y 2, y la potencia eléctrica (W) a generar durante el primer año, calculada previamente, se calculó el flujo másico de vapor (\dot{m}_{vapor}) que estaría circulando en el sistema.

- Cálculo del flujo de vapor y h_2

$$W = m_{vapor} \cdot (h_1 - h_2)$$

Reemplazando:

$$20081 = m_{vapor} \cdot (3627 - 2807)$$

$$m_{vapor} = 24,57 \frac{kg}{s}$$

Esto indica que el flujo de vapor que estaría circulando por el circuito a dichas condiciones es de 24,57 kg por segundo.

Posteriormente, se calculó el calor útil de la caldera con el flujo de vapor y las entalpías a la entrada y salida de la misma, es decir, las entalpías 1 y 4. De esta forma fue posible calcular luego la eficiencia global del sistema de incineración.

- Cálculo del calor del útil de la caldera

$$Q_{util\ caldera} = m_{vapor} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$Q_{util\ caldera} = 24,57 \cdot (3627 - 181,4)$$

$$Q_{util\ caldera} = 84131 \text{ kW}$$

Con el poder calorífico inferior de los residuos (LHV), un factor de eficiencia de combustión (85%) y el calor útil de la caldera hallado, se calculó la cantidad de residuos sólidos que debería estar ingresando a la incineración por unidad de tiempo bajo las condiciones asumidas.

- Cálculo de cantidad de residuos sólidos por unidad de tiempo que debe estar ingresando al sistema.

$$Q_{util_{caldera}} = m_{RSI} * n_{comb} * LHV$$

$$84131 = m_{RSI} * 0,85 * 20660$$

$$m_{RSI} = 4,791 \frac{kg}{s}$$

Tras calculada la cantidad de residuos sólidos incinerables (RSI) que estaría entrando al sistema por segundo, se extrapoló la cifra a cantidad diaria para comparar el resultado con el dato de residuos que previamente se había proyectado como disponible al día.

- Cálculo de RSI necesarios diariamente.

$$ton_{RSI_{dia}} = \frac{m_{RSI} * 3600 * 24}{1000}$$

$$ton_{RSI_{dia}} = \frac{4,791 * 3600 * 24}{1000}$$

$$ton_{RSI_{dia}} = 413,9 ton$$

Se necesitaría, bajo las condiciones descritas hasta el momento, que un total de 413,9 toneladas de residuos sólidos ingresara por día al sistema de incineración. Sin embargo, la proyección matemática de la fase dos arrojó que la cantidad de RSI disponibles durante el primer año en el AMB será de 368 toneladas por día (tabla 4), lo que indica que el requerimiento de la planta no estaría dentro de la cuantía de residuos disponibles.

Por dicha razón, fue necesario modificar las condiciones de operación de la planta, para encontrar el punto en que con los residuos a producir se puedan cubrir los requerimientos de operación sin modificar la potencia eléctrica y térmica proyectada, y adicionalmente, que en ese nuevo punto las condiciones halladas le brinden mayor eficiencia al sistema.

Para comprobar que se encontrará un punto más eficiente, se calculó la eficiencia del sistema bajo las condiciones actuales.

- Cálculo de la eficiencia del sistema.

$$W_{bomba} = \dot{m}_{vapor} * (h_3 - h_4)$$

$$W_{bomba} = 24,57 * (191,8 - 200,6)$$

$$W_{bomba} = -215,8$$

$$\eta_{sistema} = \frac{Q_{util} + W + W_{bomba}}{Q_{util_{caldera}}}$$

$$\eta_{sistema} = \frac{35230 + 20080 + (-215,8)}{84131}$$

$$\eta_{sistema} = 0,6549$$

$$\eta_{PCI} = \frac{Q_{util} + W + W_{bomba}}{Q_{util_{caldera}}} * \eta_{comb}$$

$$\eta_{PCI} = \frac{35230 + 20080 + (-215,8)}{84131} * 0,85$$

$$\eta_{PCI} = 0,556$$

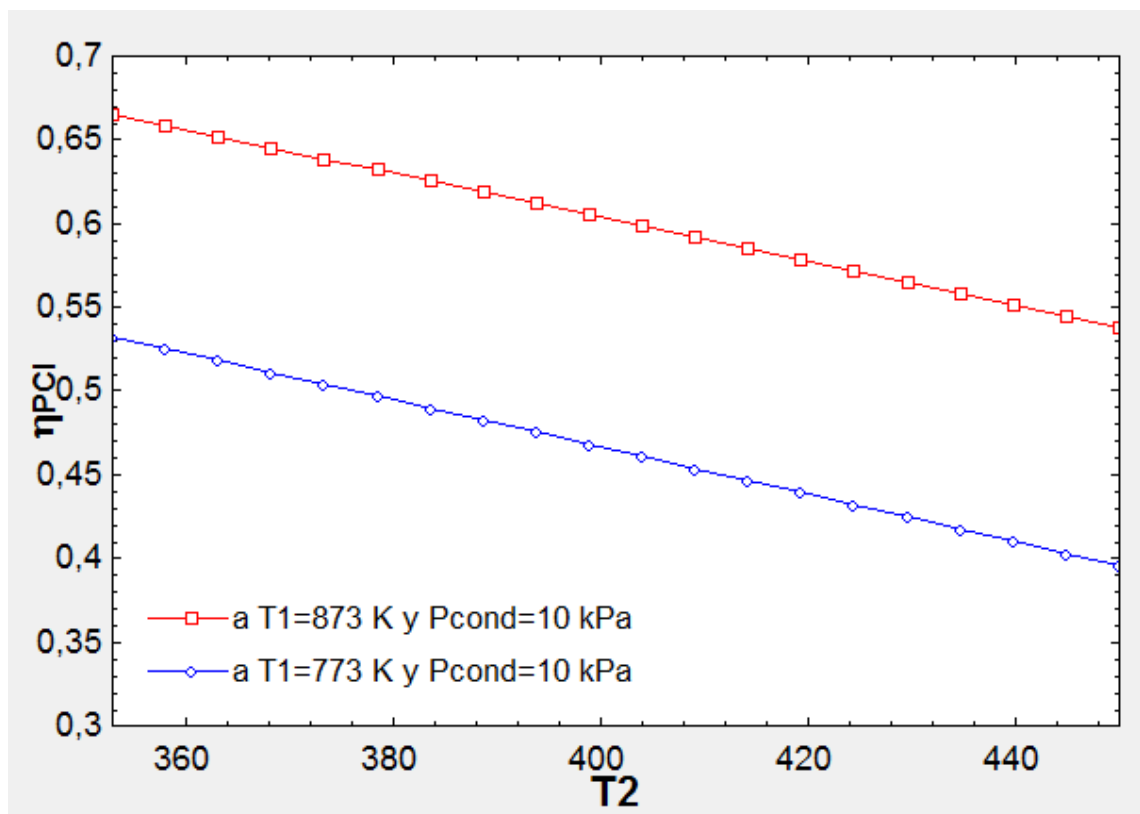
La eficiencia del sistema a condiciones asumidas de presión y temperatura en cada estado es de 55,6%.

Para encontrar los valores a los que debería rediseñarse el mecanismo se identificó de manera prueba-error el valor más sensible del sistema, es decir, el que más intervendría en la modificación de la eficiencia de la planta y la cantidad de toneladas necesarias. Se encontró que la condición más sensible del sistema es la temperatura del punto 2 (T_2).

Definido lo anterior, se parametrizó la Temperatura 2 entre los valores posibles para que mantuviese la condición de vapor saturado, cifras entre 353 y 450 K, y se observó las variaciones en la eficiencia del ciclo. Este proceso se realizó a dos temperaturas de estado 1 distintas: a $T_1= 873$ K y a $T_1= 773$ K. Las presiones no fueron modificadas para esta parametrización.

- Parametrización de la temperatura 2 (T_2) vs. eficiencia del sistema (η_{PCI})

Figura 18 Temperatura 2 vs Eficiencia del sistema



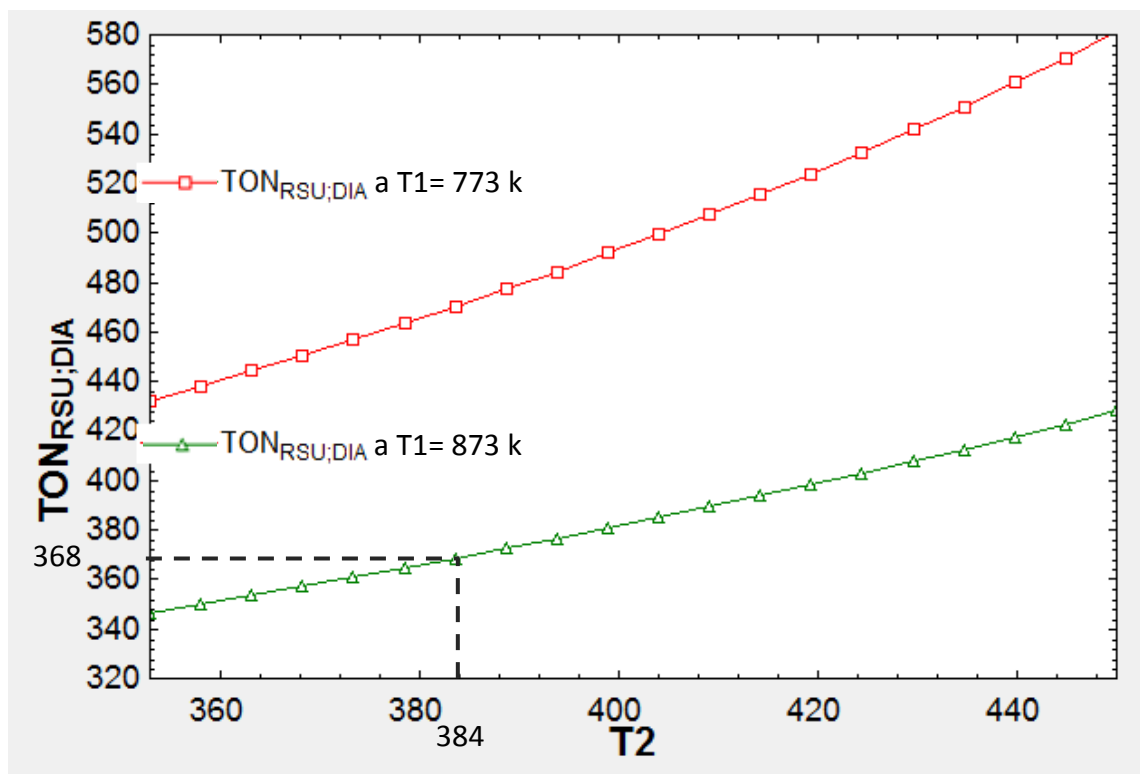
Fuente: Autor en EES

Producto de este proceso se definió que es más recomendable que la T_1 definida sea 873 K y no menor, y además, que la T_2 sea la menor posible, en este caso, se deberá modificar del valor propuesto inicialmente 436 K a 353 K.

A continuación, se parametrizó las toneladas de residuos requeridas diariamente, respecto a la temperatura 2 (variable más sensible), para identificar el punto de calor en el que los residuos que se proyecta sean generados, sean suficientes para cubrir los requerimientos de operación del sistema de incineración. Este proceso se calculó también a dos temperaturas 1, 873 y 773 K para observar las variaciones.

- Parametrización de la temperatura 2 (T_2) vs. Toneladas de residuos sólidos requeridos al día ($ton_{RSU_{dia}}$)

Figura 19 Temperatura 2 vs Toneladas de residuos diarias requeridas



Fuente: Autor en EES

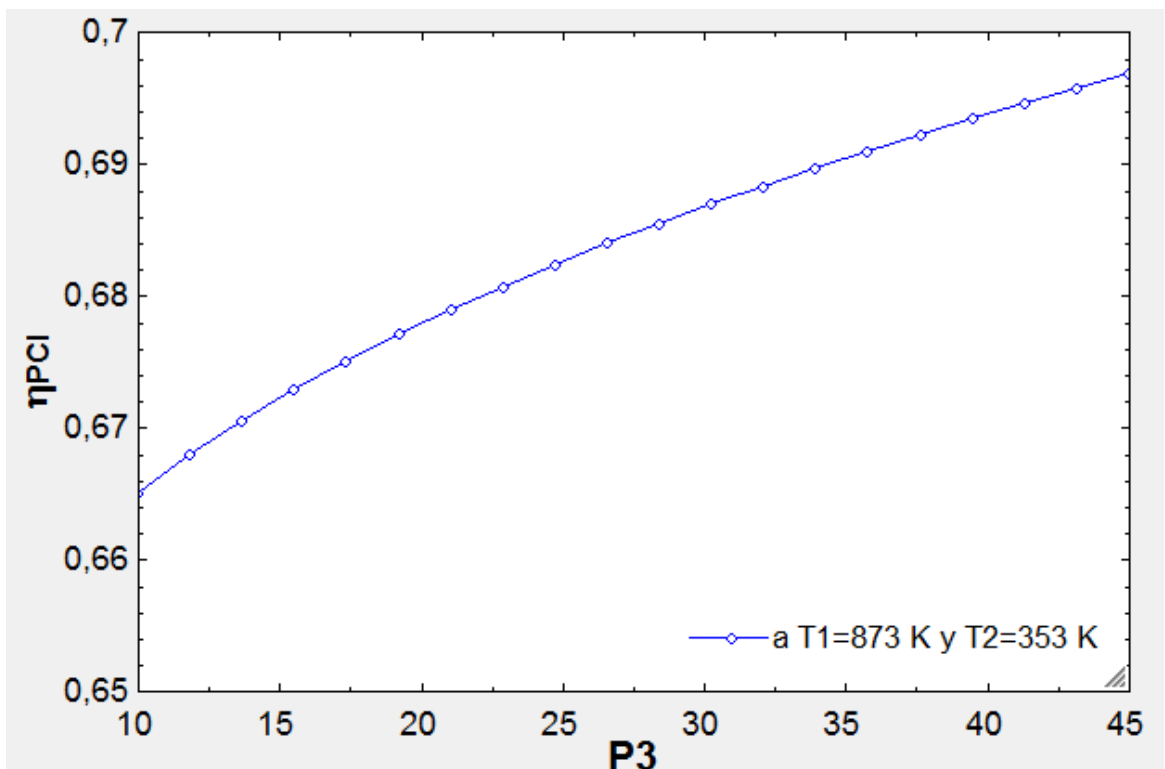
En cuanto a flujo de combustible requerido por el sistema, se observó que también a mayor T_1 , mayor deberá ser la entrada de residuos, por lo que se

confirma que es conveniente que la Temperatura a la entrada de la turbina sea 873 K. Adicionalmente, se identifica un punto fundamental a favor del posible funcionamiento real del ciclo, y es que la cantidad de residuos generados en el AMB empieza a ser suficiente para sostener el sistema y generar la potencia térmica y eléctrica proyectada, cuando la Temperatura 2 está por debajo de 384 K.

Tras definidas las mejores condiciones de temperatura y teniendo en cuenta que la presión asumida para el condensador es muy baja, se parametrizó el aumento de la presión en la etapa 3 y por tanto en la 2, para observar como variarían la eficiencia del sistema y las toneladas de residuos requeridas. La presión se parametrizó entre 10 kPa y 45 kPa.

- Parametrización de la Presión 3 (P_3) vs. eficiencia del sistema (η_{PCI})

Figura 20 Parametrización de la presión 3 vs eficiencia del sistema



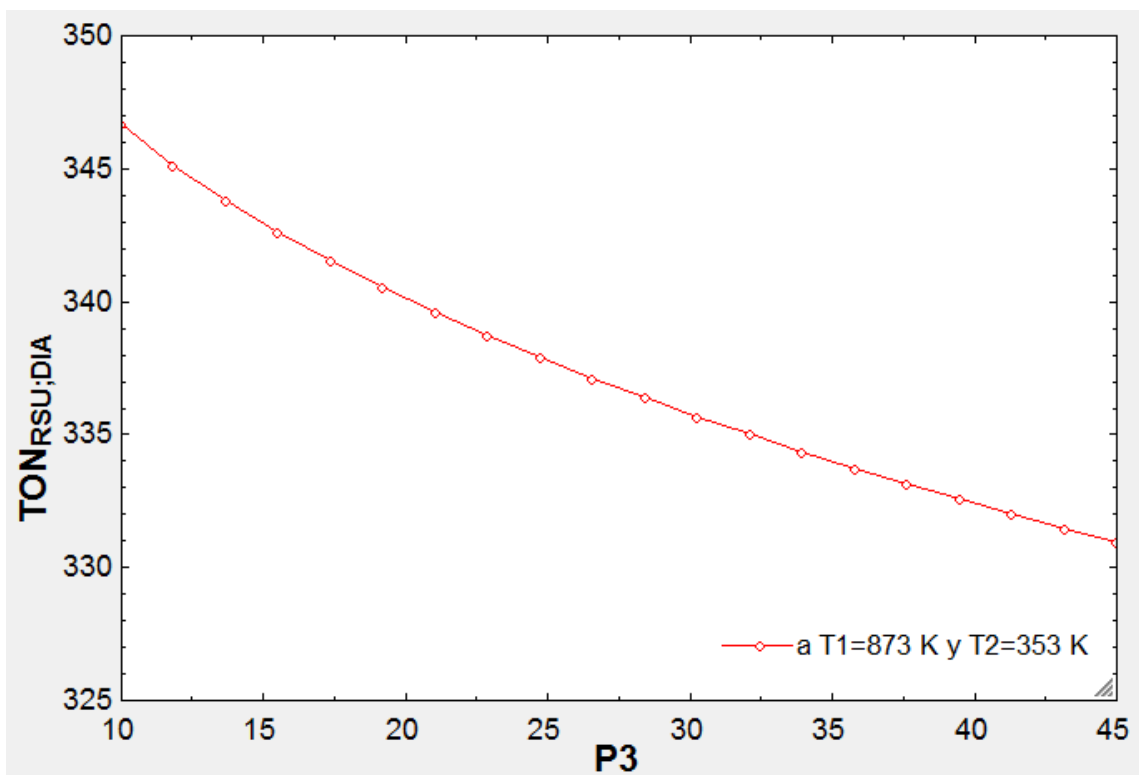
Fuente: Autor en EES

Se puede observar un leve aumento en la eficiencia del ciclo tras disminuir la restricción en la presión del condensador. Modificar de 10 a 45 kPa la presión en los estados 2 y 3, generaría un aumento de cerca de 3% en la eficiencia global.

Bajo este cambio, adicionalmente se obtendría una disminución en el requerimiento de toneladas de residuos como se observa en la figura 21, lo que es favorecedor. Pues con esta presión (45 kPa) a más residuos se tendría mayor potencia.

- Parametrización de la Presión 3 (P_3) vs. Toneladas de residuos sólidos requeridos al día ($ton_{RSU_{día}}$)

Figura 21 Parametrización de la presión 3 vs Toneladas de residuos diarias requeridas



Fuente: Autor en EES

Sin embargo, al correr el ciclo se visualizó que la temperatura de saturación en el punto 3 se eleva hasta un valor no conveniente (351 K), pues no habría diferencia significativa de temperatura entre la entrada y salida del

intercambiador de calor. Por lo tanto, manteniendo el parámetro comprobado de que a mayor presión, mayor eficiencia, se fijó un punto intermedio en el que la eficiencia haya aumentado, pero la temperatura sí sea aceptable. Dicho valor fue buscado con el método prueba-error y es una presión de 25 kPa.

A continuación se realizaron los balances exergéticos del sistema.

- Cálculo de la eficiencia exergética del sistema de incineración.

Con los valores de trabajo y potencia térmica que se planea producir durante el primer año, la exergía de los residuos sólidos urbanos de Bucaramanga calculada y las temperaturas ambiente y de los estados 2 y 3 modificadas hasta el momento, se halló la eficiencia exergética del sistema de incineración.

$$\eta_{exergética} = \frac{W + Q_{util} * \left(1 - \frac{T_o}{T_{Qutil}}\right)}{m_{RSI} * \epsilon_{RSI}}$$

$$T_{Qutil} = \frac{T_2 + T_3}{2}$$

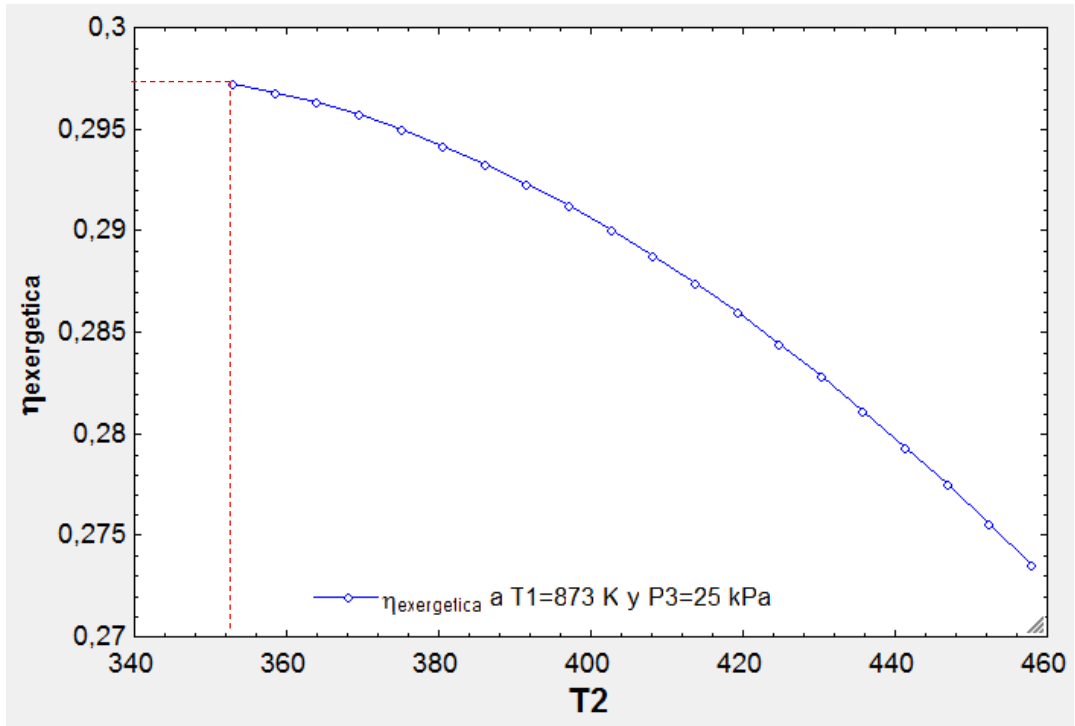
$$T_{Qutil} = \frac{353 + 338}{2} = 245,5 \text{ K}$$

$$\eta_{exergética} = \frac{20080 + 35230 * \left(1 - \frac{298}{345,5}\right)}{3,909 * 21455}$$

$$\eta_{exergética} = 0,2972 = 29,72\%$$

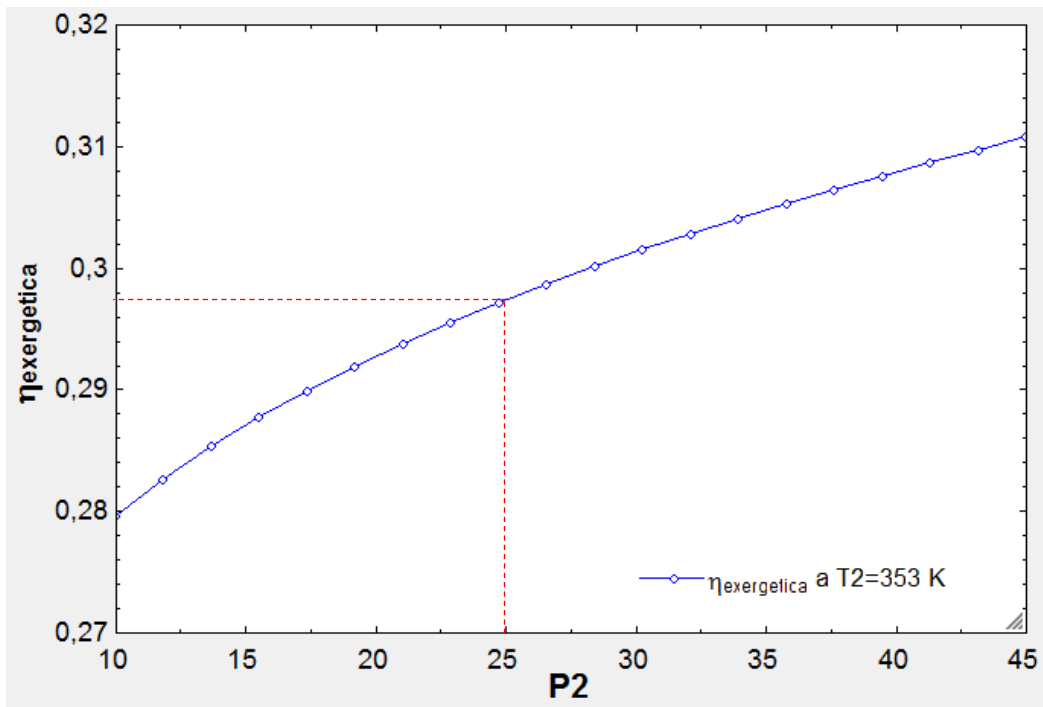
Se parametrizó la temperatura 2 respecto a la eficiencia exergética del sistema, a la temperatura 1 de mejor rendimiento (873 K) y presión 3 de 25 kPa, para observar si se mantienen los rangos de temperatura que han sido identificados como más favorables hasta el momento.

Figura 22 Temperatura 2 vs eficiencia exergética



Fuente: Autor

Figura 23 Presión del condensador vs eficiencia exergética



Fuente: Autor

Para corroborar las condiciones de presión modificadas para el condensador, se parametrizó esta variable vs la eficiencia exergética del sistema y se obtuvo el resultado mostrado en la figura 23.

La parametrización de la temperatura 2 respecto a la eficiencia exergética del sistema, respalda la tendencia identificada hasta el momento, en la que a mayor temperatura a la salida de la turbina, menor favorabilidad, en este caso, menor eficiencia exergética. De igual forma, se respalda el aumento de la eficiencia exergética a medida que aumenta la presión en el condensador, sin embargo por las razones ya mencionadas se fija 25 kPa como la más apropiada.

Tras comprobadas y definidas las condiciones termodinámicas más convenientes para el rendimiento global del sistema, se corrieron nuevamente los cálculos del ciclo y los nuevos resultados son los siguientes:

$$\dot{m}_{vapor} = 20,53 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m}_{RSI} = 3,909 \frac{kg}{s}$$

$$ton_{RSI_{dia}} = 337,8 ton$$

$$n_{PCI} = 0,683$$

$$T_3 = 338,1 K$$

$$\eta_{exergética} = 0,2972$$

En vista de que con las nuevas condiciones de presión y temperatura el flujo de residuos diario en la planta sería de 337,8 toneladas, el indicador que relaciona la producción de residuos con la producción de potencia es el siguiente:

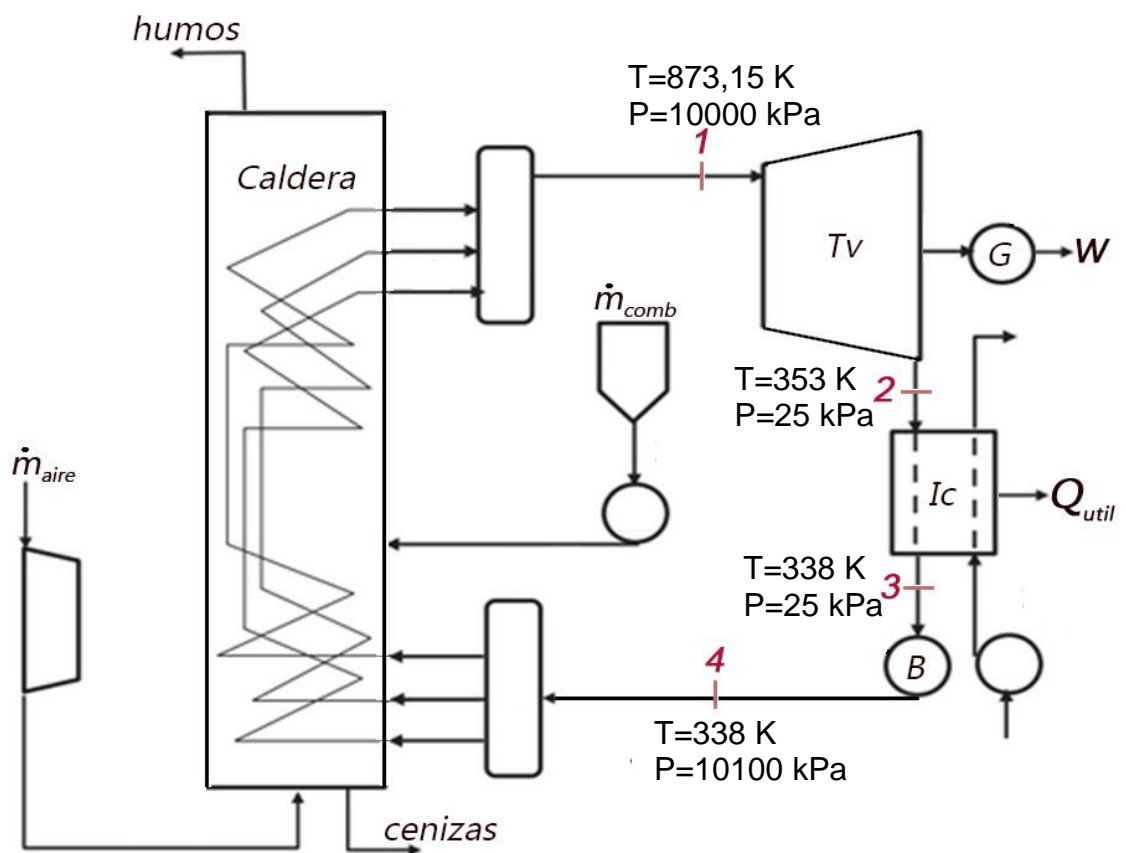
$$\frac{\text{Potencia eléctrica generada}}{\text{Entrada de residuos}} = \frac{20080 \text{ kW}}{337,8 \text{ ton}} = 59,44 \frac{\text{kW}}{\text{ton}}$$

$$\frac{\text{Potencia térmica generada}}{\text{Entrada de residuos}} = \frac{35230 \text{ kW}}{337,8 \text{ ton}} = 104,29 \frac{\text{kW}}{\text{ton}}$$

$$\frac{\text{Potencia total}}{\text{Entrada de residuos}} = \frac{55310 \text{ kW}}{337,8 \text{ ton}} = 163,7 \frac{\text{kW}}{\text{ton}}$$

Las nuevas condiciones termodinámicas fijadas para la planta de cogeneración fueron:

Figura 24 Condiciones de presión y temperatura del ciclo de incineración



Fuente: Autor

Como parte del análisis de la planta, se calcularon las irreversibilidades de cada una de las unidades a partir de la exergía en cada una de las corrientes (cuatro estados, aire, humos y residuos).

- Cálculo de la exergía de cada corriente (1,2,3 y 4)

$$\varepsilon_i = \dot{m}_{vapor} * [(h_i - h_o) - T_o * (s_i - s_o)]$$

Donde s_o y h_o corresponden a la entropía y entalpía del agua a condiciones ambiente $T=298$ K y $P=101$ kPa.

Exergía en el estado 1:

$$\dot{m}_{vapor} = 20,53 \text{ kg/s}$$

$$h_1 = 3624 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = 6,902 \text{ kJ/kgK}$$

$$\varepsilon_1 = 32277 \text{ kJ/s}$$

Exergía del estado 2:

$$h_2 = 2646 \text{ kJ/kg}$$

$$s_2 = 7,913 \text{ kJ/kgK}$$

$$\varepsilon_2 = 6008 \text{ kJ/s}$$

Exergía del estado 3:

$$h_3 = 272 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = 0,8933 \text{ kJ/kgK}$$

$$\varepsilon_3 = 211,9 \text{ kJ/s}$$

Exergía del estado 4:

$$h_4 = 282,2 \text{ kJ/kg}$$

$$s_4 = 0,8933 \text{ kJ/kgK}$$

$$\varepsilon_4 = 422 \text{ kJ/s}$$

- Cálculo de las irreversibilidades de cada unidad: turbina de vapor, intercambiador de calor, bomba y caldera.

Irreversibilidades de la turbina de vapor:

$$Irreversibilidad_{turbina} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - W$$

$$Irreversibilidad_{turbina} = 6189 \text{ kJ/s}$$

Irreversibilidades del intercambiador de calor o condensador:

$$Irreversibilidad_{condensador} = \varepsilon_2 - \varepsilon_3 - Q_{util} * \left(1 - \frac{T_o}{T_{qutil}}\right)$$

$$Irreversibilidad_{condensador} = 947,2 \text{ kJ/s}$$

Irreversibilidades de la bomba:

$$Irreversibilidad_{bomba} = \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + W_{bomba}$$

$$Irreversibilidad_{bomba} = 947,2 \text{ kJ/s}$$

Para calcular las irreversibilidades en la caldera es necesario sumar las exergías de las corrientes de entrada: vapor (estado 4), aire, y residuos, y restar las exergías de las corrientes de salida: humos y vapor (estado 1). Para ello se realizaron los siguientes cálculos:

Se demostró previamente que la relación aire combustible es igual a 22,59 y la entrada de residuos 3,9 kg/s, así que:

$$m_{aire} = AC * m_{RSi}$$

$$m_{aire} = 22,59 * 3,9$$

$$m_{aire} = 88,26 \frac{kg}{s}$$

Cálculo de la masa de humos:

$$m_{cenizas} = 0,5 * m_{RSI}$$

$$m_{cenizas} = 1,954 \frac{kg}{s}$$

$$m_{humos} = m_{aire} + m_{RSI} - m_{cenizas}$$

$$m_{humos} = 90,22 \frac{kg}{s}$$

Cálculo de la exergía del aire a condiciones ambiente:

$$h_{o_{aire}} = 282,2 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{o_{aire}} = 0,8933 \text{ kJ/kgK}$$

$$h_{aire} = 282,2 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{aire} = 0,8933 \text{ kJ/kgK}$$

$$\varepsilon_{aire} = \dot{m}_{aire} * [(h_{aire} - h_{o_{aire}}) - T_o * (s_{aire} - s_{o_{aire}})]$$

$$\varepsilon_{aire} = 0 \text{ kJ/s}$$

Cálculo de la exergía de los humos:

- En primer lugar se debe calcular la temperatura de los humos:

Para ello se requiere de la temperatura de combustión que previamente se definió en el presente informe como $1200\text{ }^{\circ}\text{C} = 1473\text{ K}$ y del C_p del aire a una temperatura promedio entre los humos y el aire que será definida como 600 K .

$$C_{p_{\text{aire}}} = 1,051$$

$$m_{\text{humos}} * C_{p_{\text{aire}}} * (T_{\text{comb}} - T_{\text{humos}}) = Q_{\text{caldera}}$$

$$T_{\text{humos}} = 749,3\text{ K}$$

A dicha temperatura se calculó la entalpía y entropía de los humos para hallar con ellos y la entalpía y entropía del aire a condiciones ambientales la exergía de los humos.

$$h_{\text{humos}} = 766,9\text{ kJ/kg}$$

$$s_{\text{humos}} = 6,647\text{ kJ/kgK}$$

$$\varepsilon_{\text{humos}} = \dot{m}_{\text{humos}} * [(h_{\text{humos}} - h_{o_{\text{aire}}}) - T_o * (s_{\text{humos}} - s_{o_{\text{aire}}})]$$

$$\varepsilon_{\text{humos}} = 16701\text{ kJ/s}$$

Seguidamente, la exergía másica de los residuos sólidos fue calculada por el flujo de residuos ingresando por unidad de tiempo:

$$\varepsilon_{xRSI} = 21455\text{ kJ/kg}$$

$$m_{RSI} = 3,909\text{ kg/s}$$

$$\varepsilon_{RSI} = \varepsilon_{xRSI} * m_{RSI} = 83830 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Teniendo ya las exergías en los estados 1 y 2, en los humos, los residuos y el aire, se calculó la irreversibilidad de la caldera:

Irreversibilidades de la caldera

$$Irreversibilidad_{caldera} = \varepsilon_4 + \varepsilon_{aire} + \varepsilon_{RSI} - \varepsilon_1 - \varepsilon_{humos}$$

$$Irreversibilidad_{caldera} = 422 + 0 + 83830 - 32277 - 16701$$

$$Irreversibilidad_{caldera} = 35275 \text{ kJ/s}$$

Finalmente, cifras compiladas de plantas de incineración reales, evidencian que del 10 al 15% de la energía eléctrica producida en dichos sistemas es destinada al auto sostenimiento de la planta [34], y que el porcentaje restante es el útil para otros procesos o usos.

Por tanto, tomando una cifra promedio de 12,5% para auto sostenimiento, a continuación se cuantifica la potencia eléctrica que anualmente se estaría a partir de la planta de incineración del AMB.

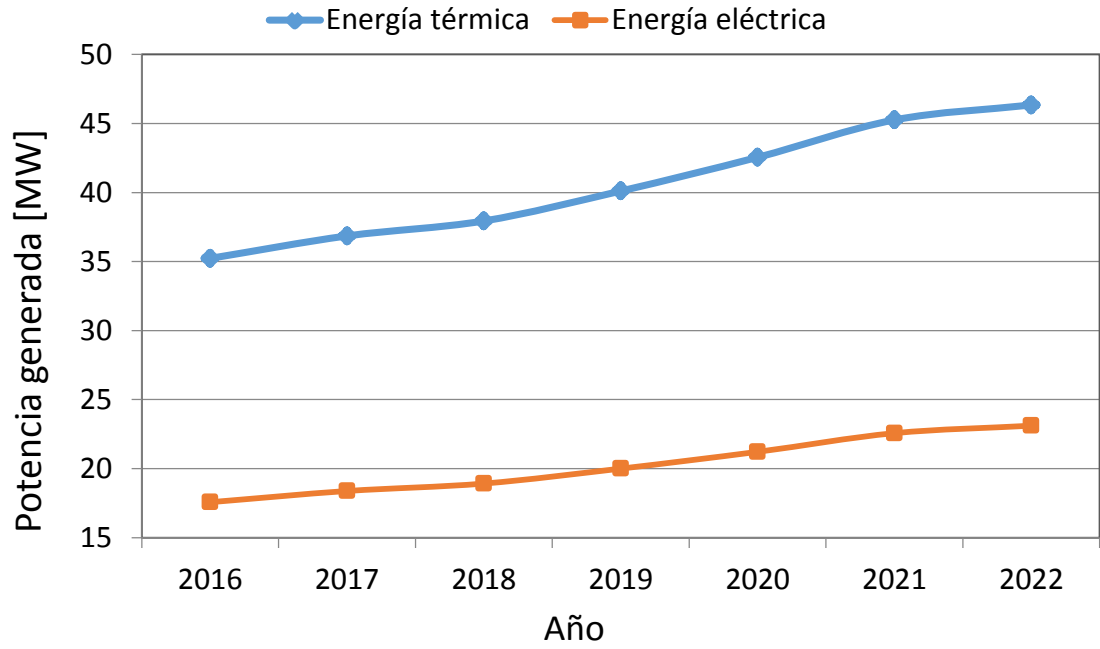
Tabla 12 Proyección de potencia eléctrica útil entregada anualmente a partir de la planta de incineración del AMB.

	Energía eléctrica generada [MW]	Energía eléctrica útil [MW]
2016	20,081	17,570
2017	21,007	18,381
2018	21,625	18,921
2019	22,861	20,003
2020	24,251	21,219
2021	25,796	22,571
2022	26,413	23,111

Fuente: Autor

En la figura 25 se presenta gráficamente la energía que podría ser entrega por la planta de incineración de residuos tanto térmica como eléctrica, según la configuración de potencia-calor propuesta en el presente informe, descontando la energía eléctrica que sería invertida en el sostenimiento de la planta, es decir, la que podría ser entregada a los usuarios de la zona o a otros procesos.

Figura 25 Proyección de potencia útil entregada anualmente a partir de la planta de incineración del AMB.



Fuente: Autor

CONCLUSIONES

1. Según la proyección realizada de cantidad de residuos orgánicos producidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga durante los próximos seis años, la cantidad de residuos sólidos incinerables disponibles continuará siendo ascendente. Además, se prevé que la cuantía de estos desechos generados en el área en mención, se incrementará 22,5 toneladas diarias en promedio cada año.
2. Se establecieron las condiciones termodinámicas más adecuadas para el ciclo de incineración de residuos sólidos urbanos propuesto para el Área Metropolitana de Bucaramanga en el que por cada parte de energía eléctrica se estaría generando 1,66 partes de energía térmica. Los valores de temperatura [K] y presión [kPa] para cada uno de los estados del ciclo fueron asumidos, parametrizados y ajustados termodinámicamente, llevando el diseño del sistema de incineración de una eficiencia inicial de aprovechamiento energético de 55,6% a 68,3%.
3. Se definieron las condiciones para alcanzar la mayor eficiencia en el ciclo: Entre 773 K y 873 K para el vapor que sale de la caldera y entra a la turbina, por eficiencia se definió $T=873$ K y $P=10000$ kPa; la temperatura del vapor que sale de la turbina y entra al intercambiador de calor se modificó de 453 K a 353 K y la presión de 10 kPa a 25 kPa; las condiciones del líquido saturado que sale del intercambiador se modificaron de 319 K a 338 K y de 10 kPa a 25 kPa; el líquido comprimido saldrá de la bomba a $T=338$ K y $P=10100$ kPa; condiciones que requerirán de un suministro de 3,909 kg/s de residuos y no de 4,791 kg/s para generar la misma potencia.

4. Se halló que la variable más sensible del ciclo en relación con la eficiencia del sistema es la temperatura a la salida de la turbina. A menor temperatura en este punto, mayor eficiencia global. Se encontró que esta condición podrá variar entre 353 K hasta un límite máximo de 384 K para que el vapor mantenga sus propiedades y la cantidad de residuos sólidos producidos proyectada sea suficiente para producir potencia bajo la relación de calor-trabajo (1,66) propuesta.
5. Tras definido y estudiado el ciclo se concluye que por cada tonelada (1) de residuos sólidos que ingresa a la planta se estaría generando 59,4 kW de energía eléctrica y 104,29 kW de energía térmica, para un total de 163,7 kW de potencia por tonelada de residuos.
6. Si la cantidad de residuos orgánicos que se proyecta serán producidos en el AMB se tratasen en un sistema de incineración con aprovechamiento de energía con las condiciones termodinámicas definidas en el presente proyecto, se generarían 20 MW eléctricos y 35 MW térmicos en 2016, y por el aumento de materia prima esta cifra ascendería a 26 MW eléctricos y 46 MW térmicos en 2022. Teniendo en cuenta que el porcentaje promedio de potencia eléctrica necesaria para el auto sostenimiento de la planta es del 12,5% de la producida, la cantidad de energía eléctrica útil entregada por la planta sería de 17,5 MW en 2016 y 23 MW en 2022.
7. Se le atribuye la baja eficiencia exergética del sistema de incineración (29,7%) a la alta temperatura calculada a la salida de los humos de la caldera (749,3 K) la cual genera alta irreversibilidad en la misma. Se identifican altas irreversibilidades en el sistema en general, que podrían ser corregidas para aumentar la eficiencia exergética y de combustión del ciclo ajustando las condiciones que permitan disminuir la temperatura de humos.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar posteriormente un análisis exergo económico del sistema de incineración de residuos sólidos para el Área Metropolitana de Bucaramanga propuesto, con el que se pueda determinar el costo que de producción de cada kWh y la rentabilidad económica de esta inversión.
2. El AMB no es un consumidor potencial de energía térmica para calefacción (este producto podría ser usado en subprocesos industriales), pero el consumo de energía eléctrica si es un bien de uso común en el área, por lo que se podría realizar un estudio de factibilidad técnica como el descrito en este informe para una planta de incineración configurada sólo para la generación de potencia eléctrica y evaluar los resultados de eficiencia que tendría el ciclo.
3. Aun cuando existen sistemas de tratamientos de humos para mitigar la contaminación producida por las plantas de incineración de residuos sólidos, se recomienda realiza un análisis ambiental de este proyecto que permita determinar su factibilidad desde este punto de vista.

REFERENCIAS

- [1] Pacific Heat and Power, *Heat Recovery*, disponible en http://www.pacificheatandpower.com/index.php/organic_rankine_cycle_turbines, último acceso en mayo 2016.
- [2] BANCO MUNDIAL. “Dos planetas más para poder vivir en este” agosto, 2016.
- [3] SABALZA, Otoniel., VILLAMIZAR, Oscar. Evaluación del potencial energético de los residuos sólidos orgánicos urbanos provenientes de las plazas de mercado y diseño conceptual de una planta de digestión anaerobia para su aprovechamiento industrial en Colombia, Ingeniería química, 2009.
- [4] BANCO MUNDIAL. “Los residuos sólidos en el epicentro del Desarrollo Sostenible”. Marzo, 2016.
- [5] AVENDAÑO ACOSTA, Edwin; “Panorama actual de la situación mundial, nacional y distrital de los residuos sólidos. Análisis del caso Bogotá D.C. Programa basura Cero” Bogotá, 2015
- [6] SSPD. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Disposición final de Residuos Sólidos. Informe Nacional 2015
- [7] EL CARRASCO. Problemática ambiental El Carrasco Bucaramanga. Disponible en: <http://carrascobucaramanga.blogspot.mx>
- [8] CARVALHO PARO, André de. Estudo comparativo para o tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitarios x incineração. Revista Brasileira de Energia, Vol. 14, No. 2, 2o Sem. 2008.

- [9] SOUZA-SANTOS, Marcio. Technical evaluation of a power generation process consuming municipal solid waste. Campinas 2013.
- [10] MORATORIO, Diego. ROCCO, Ignacio. CASTELLI, Marcelo. Converting Municipal Solid Waste into energy. 2012
- [11] HONG KUO, Jia. Emission of carbon dioxide in municipal solid waste incineration in Taiwan: A comparison with thermal power plants. 2011
- [12] THEMELIS, N.J.; Díaz Barriga, M.E. Estudio De Pre-Factibilidad Técnica Y Económica Para La Instalación De Capacidad De Generación De Energía A Partir De Residuos (WTE) en Uruguay, Themelis Associates, Enero 2012.
- [13] RESTREPO, Álvaro. Exergetic and environmental analysis of a pulverized coal power plant.2012
- [14] OCDE Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.Disponible en: <http://www.oecd.org/centrodemexico/laocde/>
- [15] Cheng, H.; Hu, Y. *Municipal Solid Waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China*, Bioresource Technology, 2010. 101: 3816-3824.
- [16] SANCHEZ, Laura. Formulación para el manejo integral de los residuos sólidos urbanos generados en el departamento de Santander. Universidad Industrial de Santander. 2007.
- [17] FERNÁNDEZ, J. *La Basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México*, Boletín del Instituto de Investigaciones, Enero – Marzo 2011.
- [18] Plan de Gestión Integral de Residuos sólidos del área Metropolitana de Bucaramanga. UIS. <http://www.bucaramanga.gov.co/documents/dependencias>

- [19] SANCHEZ, Karen. Determinación del perfil de producción de residuos incinerables para la ciudad de Bucaramanga y su capacidad energética. UG. Jóvenes en la ciencia. México, 2016.
- [20] COGERSA. Vertedero de residuos no peligrosos. Disponible en: <http://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19172>. 2011
- [21] DEFINICION.DE. Definición de relleno sanitario. Disponible en: <http://definicion.de/relleno-sanitario/>
- [22] BIOFUTURA. Gestión de biomasa y residuos, octubre, 2011. Disponible en: <http://biofuturacr.com/%C2%BFque-es-el-em-compost/>
- [23] ENT. Innovación ambiental al servicio de la sociedad. Gestión de residuos. 2016
- [24] Lund, H.; Muenster, M. *Comparing Waste-to-Energy technologies by applying energy system analysis*, Waste Management, 2010. 30: 1251-1263.
- [25] NIESSEN, Walter, R. Combustion and incineration processes. Applications in environmental engineering. 4th Edition. 2010.
- [26] Gidarakos, E.; Havas, G.; Ntzamilis, P. *Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete*, Waste Management, 2006. 26: 668-679.
- [27] MORATORIO, Diego. *Converting Municipal Solid Waste into energy*. Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica. ISSN 1510-7450 • ISSN (en línea) 1688-9584. 2012.
- [28] Xavier Castells, «CAPITULO: LOS RESIDUOS COMO COMBUSTIBLE, Tratamiento y valorización energética de los residuos», Madrid, 2012.

- [29] Saidur, R. et al. *A review on biomass as a fuel for boilers*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(5): 2262-2289.
- [30] EBOH, Francis. Estimating the specific chemical exergy of municipal solid waste. Article in Energy Science and Engineering · May 2016
- [31] Jara millar, Hector. BIOMASA Y SUS PROPIEDADES COMO COMBUSTIBLE ATCP. Chile.
- [32] KOTAS T J. The exergy method of thermal plant analysis. London 2012.
- [33] DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE - UK. Combined Heat and Power Focus - What is Combined heat and power?, <http://chp.decc.gov.uk/cms/what-is-chp>
- [34] CENGEL, Yunus. Termodinamica. 2010.
- [35] Greenenergy Solutions, inc., *Sistema cBOS*, disponible en <http://www.greenenergyph.com/cbos.html>, último acceso en mayo 20126.
- [36] Sheepbridge Resource Park Limited. Determination of an application for an environmental permit under the environmental permitting (England & Wales) regulations 2010. <http://www.againstincineration.org.uk/wp-content/uploads/2010/09/Sheepbridge-FINAL-DD-09-September-10.pdf>
- [37] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, *Recursos movilizados por el PNUD para la ejecución de proyectos de desarrollo* Período 2007 – 2011, disponible en <http://www.undp.org.uy/pnudUruguay.asp>, último acceso en mayo 2016.
- [38] VELÁZQUEZ DE CASTRO, Federico; Educación ambiental en las ciencias de la vida. Narcea Ediciones, 1998. 86p.

ANEXOS

ANEXO A - Historial mes a mes de la cantidad de residuos sólidos urbanos depositados en el botadero El Carrasco de 2010 a 2016

RESIDUOS SÓLIDOS ARROJADOS EN LA CELDA DE DISPOSICIÓN FINAL AÑO 2010 – EMAB													
<u>Cliente</u>	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total año
Bucaramanga	12.320.295	12.117.715	13.518.170	13.028.715	13.930.520	14.267.945	16.744.140	15.213.680	14.980.025	15.704.665	16.636.280	16.836.815	18.595.795
Floridablanca	4.451.365	4.056.735	4.501.155	4.203.520	4.622.205	4.706.015	4.861.390	4.862.930	4.824.910	4.878.105	5.119.560	5.647.820	56.735.710
Girón	2.207.210	2.065.375	2.288.855	2.141.350	2.325.145	2.404.355	2.494.330	2.544.280	2.507.870	2.533.155	2.728.475	2.795.395	29.035.795
Piedecuesta	1.643.100	1.543.135	1.667.240	1.600.610	1.682.600	1.755.245	1.797.850	1.805.630	1.812.040	1.887.305	2.040.600	2.147.310	21.382.665
Lebrija	311.230	288.915	334.090	301.670	328.960	358.565	356.160	362.130	368.945	361.470	386.660	407.680	4.166.475
Rionegro	138.190	133.385	153.755	140.955	158.255	175.655	180.630	167.545	157.420	175.660	187.550	134.760	1.903.760
El Playón	75.125	48.400	32.285	22.990	32.315	23.920	16.855	22.155	33.480	0	0	14.525	322.050
Suratá	6.135	7.570	8.760	0	14.585	7.590	5.585	9.380	2.495	8.290	4.420	0	74.810
Charta	6.490	5.585	6.545	6.700	5.840	7.585	6.570	10.130	6.325	6.665	6.010	6.200	80.645
Ruitoque	61.575	58.490	65.930	58.790	62.080	68.625	52.220	56.360	53.955	68.680	95.790	99.495	801.990
Mesa de los Santos	0	1.280	785	0	1.225	0	465	0	620	0	0	0	4.375
Municipio de Tona	29.080	32.540	44.655	44.020	31.715	39.295	39.200	40.525	46.610	30.410	20.205	42.985	441.240
California	11.850	15.725	18.395	13.760	19.165	19.360	14.370	16.930	18.990	15.730	21.145	19.755	205.175
Matanza	7.965	15.160	7.825	15.775	19.155	0	19.600	12.440	28.505	22.005	20.075	3.790	172.295
Sabana de Torres	0	0	2.185	0	6.795	2.995	3.065	3.580	3.855	7.235	4.605	1.205	35.520
Vijagual	8.450	10.005	6.015	7.650	10.015	12.145	12.630	10.510	11.680	12.090	12.680	14.710	128.580
Vetas	7.375	8.740	7.525	11.630	9.840	0	12.385	10.875	13.450	11.620	12.440	13.420	119.300
Zapatoca	139.935	94.350	109.315	110.700	104.045	0	123.155	116.240	110.030	128.755	120.615	135.320	1.292.460
La Mariana	730	0	3.145	775	0	0	0	1.020	815	0	0	895	7.380
Suaita	0	0	0	0	9.055	0	0	0	12.810	3.150	0	0	25.015
San Gil	0	0	0	0	24.995	0	0	0	0				24.995
Barranca Bermeja	0	0	0	0	0	188.340	0	0	0				188.340
Total Mes	21.426.100	20.503.105	22.776.630	21.709.610	23.398.510	24.037.635	26.740.600	25.266.340	24.994.830	25.854.990	27.417.110	28.322.080	

RESIDUOS SÓLIDOS ARROJADOS EN LA CELDA DE DISPOSICIÓN FINAL AÑO 2011 - EMAB

Cliente	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total año
Bucaramanga	15.732.340	13.937.155	15.644.640	14.727.940	16.088.520	15.512.380	14.778.550	15.494.940	14.948.530	15.341.820	15.872.555	17.378.845	185.458.215
Floridablanca	5.266.150	4.638.545	5.242.200	5.058.875	5.241.005	5.223.120	5.055.615	5.273.585	5.094.790	5.189.255	5.490.155	5.991.145	62.764.440
Girón	2.662.175	2.281.880	2.702.505	2.605.625	2.703.100	2.679.875	2.617.725	2.794.165	2.720.990	2.697.760	3.267.135	3.239.565	32.972.500
Piedecuesta	2.038.255	1.772.425	1.992.710	1.963.125	2.047.955	1.923.430	1.931.660	2.038.645	1.962.145	2.031.200	2.168.535	2.366.555	24.236.640
California	21.645	27.280	25.970	21.720	16.830	30.965	31.850	35.340	25.245	25.135	35.615	21.915	319.510
Charta	6.830	6.670	5.660	5.780	4.545	5.545	5.470	7.040	5.525	4.085	7.490	3.665	68.305
Lebrija	358.040	327.830	368.650	365.625	369.575	366.830	371.255	367.260	364.350	348.080	386.305	427.435	4.421.235
Matanza	25.825	20.305	11.230	12.945	8.525	25.495	10.770	16.300	4.495	6.715	18.350	15.635	176.590
Mesa de los santos	670	0	0	0	1.290	1.695	0	650	360	0	0	0	4.665
El Playón	0	0	17.850	14.640	22.625	45.850	76.915	90.650	100.350	0	0	0	368.880
Rionegro	158.570	140.775	179.410	166.195	159.315	163.375	170.455	167.205	158.435	127.940	170.900	164.070	1.926.645
Ruitoque	94.560	85.205	98.605	88.530	95.580	104.170	99.635	99.380	96.565	36.600	0	0	898.830
Sabana de Torres	885	6.680	2.150	1.250	365	295	0	6.015	205	0	0	0	17.845
Suaita	0	0	0	3.730	9.470	0	0	0	0	0	0	0	13.200
Surata	3.335	8.850	19.610	12.855	12.770	0	7.485	18.395	7.950	6.725	2.785	9.130	109.890
Municipio de Tona	32.445	48.010	45.125	32.310	41.940	37.385	34.285	40.640	35.555	12.180	42.550	22.580	425.005
Vetas	10.560	11.185	13.050	9.960	13.615	14.830	13.280	14.505	13.185	8.235	13.300	22.005	157.710
Vijagual	11.075	15.370	13.045	11.065	13.590	14.980	12.625	14.100	16.650	4.550	0	0	127.050
Zapatoca	124.725	99.345	113.240	113.850	111.385	117.525	113.490	114.155	98.700	120.100	124.370	124.270	1.375.155
Total Mes	26.548.085	23.427.510	26.495.650	25.216.020	26.962.000	26.267.745	25.331.065	26.592.970	25.654.025	25.960.380	27.600.045	29.786.815	

RESIDUOS SÓLIDOS ARROJADOS EN LA CELDA DE DISPOSICIÓN FINAL AÑO 2012 - EMAB

Cliente	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total año
Bucaramanga	15.433.545	14.398.070	15.488.580	14.674.455	16.109.845	15.100.660	15.323.700	15.883.985	14.870.915	16.309.460	16.244.335	16.617.510	186.455.060
Floridablanca	5.502.940	4.932.255	5.162.440	4.942.100	5.506.610	5.328.610	5.492.080	5.409.040	5.008.615	5.617.270	5.446.880	5.942.495	64.291.335
Girón	2.988.070	2.699.790	2.894.560	2.789.490	3.104.095	2.851.195	2.837.280	2.943.650	2.766.115	3.109.810	2.936.800	3.246.610	35.167.465
Piedecuesta	2.297.035	2.084.595	2.206.810	2.163.410	2.426.410	2.215.260	2.187.200	2.231.955	2.125.040	2.431.325	2.407.770	2.569.775	27.346.585
Lebrija	383.700	338.815	361.090	367.010	388.620	376.210	406.240	399.635	365.290	441.000	429.830	444.200	4.701.640
Rionegro	176.795	148.590	153.260	121.720	154.750	152.235	157.095	164.430	154.405	172.040	167.710	156.970	1.880.000
El Playón	247.910	78.750	90.780	0	5.385	52.700	109.760	94.805	77.645	110.820	86.730	82.610	1.037.895
Surata	7.950	14.100	12.450	5.695	6.720	12.530	0	0	0	0	0	0	59.445
Charta	9.110	5.370	5.730	5.355	14.150	0	7.465	7.400	6.030	8.240	6.800	7.600	83.250
Santa Bárbara	4.635	3.770	8.390	2.980	5.745	4.005	4.485	5.555	4.360	5.410	4.140	4.920	58.395
California	44.285	47.840	43.295	29.700	84.535	62.430	50.375	47.285	47.650	39.500	45.960	36.100	578.955
Matanza	18.615	19.605	18.750	0	0	6.175	22.285	16.255	16.440	17.000	18.480	21.490	175.095
Tona	44.910	29.920	37.685	34.030	29.665	34.160	32.015	31.685	31.560	31.890	36.770	30.700	404.990
Vetas	13.795	13.490	17.150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44.435
Zapatoca	143.520	110.200	106.535	107.050	116.560	118.115	109.230	125.365	116.980	126.830	112.060	131.340	1.423.785
Mesa de los santos													0
Ruitoque													0
Sabana de Torres													0
Suaita													0
Vijagual													0
Total Mes	27.316.815	24.925.160	26.607.505	25.242.995	27.953.090	26.314.285	26.739.210	27.361.045	25.591.045	28.420.595	27.944.265	29.292.320	

RESIDUOS SÓLIDOS ARROJADOS EN LA CELDA DE DISPOSICIÓN FINAL AÑO 2013 - EMAB

Cliente	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total año
Bucaramanga	15.606.700	14.984.675	14.821.725	16.018.380	16.389.680	14.904.985	14.593.240	16.085.600	15.153.410	15.605.940	16.566.040	17.585.080	188.315.455
Floridablanca	5.714.920	5.030.545	5.259.410	5.518.595	5.709.450	5.432.645	5.167.540	5.475.720	5.078.550	5.237.010	5.984.610	6.268.740	65.877.735
Girón	3.153.640	2.858.770	3.039.025	3.150.070	3.253.040	3.008.180	3.020.160	3.046.870	2.851.450	2.949.790	3.317.690	3.352.720	37.001.405
Piedecuesta	2.412.870	2.243.050	2.258.360	2.450.500	2.456.910	2.274.595	2.083.910	2.373.850	2.119.610	2.407.240	2.573.000	2.661.900	28.315.795
Lebrija	412.550	397.880	400.830	416.910	438.680	400.090	419.810	425.300	405.140	395.770	438.750	475.480	5.027.190
Rionegro	173.670	144.320	154.715	156.850	166.660	144.020	167.700	155.670	143.760	154.090	165.090	162.280	1.888.825
El Playón	49.580	92.290	85.690	89.210	98.880	124.430	70.200	107.790	101.570	52.390	115.750	114.910	1.102.690
Surata	0	0	0	0	10.930	0	0	0	20.940	0	0	0	31.870
Charta	10.030	6.380	7.290	8.130	6.750	6.510	3.940	2.740	5.120	0	0	0	56.890
Santa Bárbara	5.340	3.350	3.800	3.590	5.490	4.250	3.670	2.870	2.490	2.370	3.210	3.590	44.020
California	29.750	31.690	20.620	22.680	20.030	19.070	15.400	14.560	13.200	12.970	11.360	16.840	228.170
Matanza	21.970	13.580	14.110	20.910	12.850	22.950	9.710	8.810	19.420	11.130	2.510	0	157.950
Tona	35.870	31.490	24.500	41.830	52.800	44.820	41.650	29.830	40.300	27.870	32.080	38.350	441.390
Vetas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zapatoca	145.280	100.820	97.230	110.270	115.160	118.570	117.350	114.330	91.860	91.410	102.860	104.280	1.309.420
Retorno Bello													
Renacer	0	0	0	0	0	0	53.960	125.880	101.980	98.220	72.600	52.650	505.290
Retorno Coopreser	0	0	0	0	0	0	90.590	114.780	118.850	100.610	80.500	61.500	566.830
Total Mes	27.772.170	25.938.840	26.187.305	28.007.925	28.737.310	26.505.115	25.858.830	28.084.600	26.267.650	27.146.810	29.466.050	30.898.320	

RESIDUOS SÓLIDOS ARROJADOS EN LA CELDA DE DISPOSICIÓN FINAL AÑO 2014 - EMAB

Ciente	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total año
Bucaramanga *	15.632.830	16.241.680	16.620.610	15.772.440	16.551.600	14.993.020	16.152.420	15.583.570	15.752.520	16.798.540	16.873.330	17.957.510	194.930.070
Floridablanca	5.618.110	4.994.810	5.749.390	5.484.540	5.742.030	5.234.650	5.411.590	5.553.100	5.477.960	5.479.100	5.867.540	6.663.930	67.276.750
Girón	3.130.950	2.930.570	3.288.120	3.127.280	3.478.600	3.121.400	3.283.000	3.411.750	3.316.370	3.443.470	3.503.530	3.722.610	39.757.650
Piedecuesta	2.568.790	2.332.270	2.346.140	2.308.770	2.537.190	2.304.840	2.505.550	2.452.110	2.502.800	2.580.100	2.568.020	2.857.170	29.863.750
Lebrija	449.420	401.910	453.700	435.040	471.610	438.640	432.400	442.070	441.580	451.610	441.920	498.120	5.358.020
Rionegro	161.960	132.560	141.280	125.490	122.800	119.120	164.900	154.380	154.030	157.660	153.420	164.010	1.751.610
El Playón	133.410	74.980	99.080	101.600	122.580	101.220	118.550	102.590	107.470	121.230	97.680	127.430	1.307.820
Surata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Charta	0	0	0	0	0	0	4.100	5.160	5.970	5.300	15.000	21.880	57.410
Santa Bárbara	2.800	2.160	2.590	3.430	2.290	2.440	3.260	2.500	3.050	2.960	3.230	4.300	35.010
California	11.890	8.900	10.410	11.000	10.830	9.970	11.550	12.550	9.900	12.680	10.860	10.130	130.670
Matanza	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.970	2.970
Tona	33.690	27.030	33.220	29.220	45.360	31.680	43.160	27.330	33.480	41.290	29.860	35.160	410.480
Vetas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zapatoca	137.760	94.450	102.500	122.790	110.320	105.010	118.170	107.740	97.760	114.200	107.330	137.790	1.355.820
Retorno Bello													
Renacer	25.970	29.900	28.490	25.690	25.210	31.490	24.270	17.570	24.000	21.620	21.110	20.740	296.060
Retorno Coopreser	38.390	25.740	46.520	23.020	28.670	34.030	28.740	17.550	28.430	22.280	21.980	19.160	334.510
Total Mes	27.945.970	27.296.960	28.922.050	27.570.310	29.249.090	26.527.510	28.301.660	27.889.970	27.955.320	29.252.040	29.714.810	32.242.910	

RESIDUOS SÓLIDOS ARROJADOS EN LA CELDA DE DISPOSICIÓN FINAL AÑO 2015 - EMAB

Cliente	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total año
Bucaramanga *	15.998.680	14.807.740	15.947.690	15.383.620	16.207.260	16.721.360	16.750.660	16.380.270	16.092.690	16.291.170	15.708.590	16.980.520	193.270.250
Floridablanca	5.842.110	5.360.020	6.111.850	5.704.100	6.019.470	6.054.790	6.094.830	6.113.010	5.894.190	5.856.990	5.831.570	6.294.500	71.177.430
Girón	3.423.160	3.060.570	3.462.600	3.288.570	3.427.620	3.469.660	3.612.210	3.599.810	3.561.650	3.533.580	3.488.340	3.970.434	41.898.204
Piedecuesta	2.669.660	2.353.140	2.699.030	2.536.700	2.763.490	2.766.320	2.704.200	2.748.650	2.623.960	2.676.220	2.667.450	2.881.290	32.090.110
Lebrija	457.430	411.680	437.810	427.860	461.400	462.220	454.390	453.290	413.110	433.580	445.410	459.880	5.318.060
Rionegro	162.740	131.280	139.570	144.070	157.090	157.650	163.790	143.560	152.080	162.550	182.620	185.970	1.882.970
El Playón	134.980	105.780	108.510	112.830	113.430	101.270	118.490	130.840	112.090	114.600	120.820	128.810	1.402.450
Surata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Charta	7.760	6.360	7.210	7.870	5.610	8.410	5.500	7.210	5.760	7.490	7.680	8.980	85.840
Santa Bárbara	3.010	3.720	4.040	4.000	4.100	5.840	5.510	5.010	5.850	4.400	6.150	5.400	57.030
California	12.930	9.280	9.090	10.730	11.140	12.340	12.460	9.400	9.780	13.040	11.040	15.490	136.720
Matanza	14.250	18.170	13.240	13.810	11.490	17.990	14.920	15.180	16.530	12.920	16.040	13.990	178.530
Tona	32.420	34.590	38.830	31.350	33.680	37.320	29.960	36.760	33.380	33.020	35.270	35.000	411.580
Vetas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zapatoca	141.670	100.600	96.220	118.370	111.450	107.060	123.640	117.230	68.820	82.580	66.490	124.240	1.258.370
Retorno Bello													
Renacer	19.610	25.110	20.270	11.110	16.000	12.360	15.760	15.690	28.610	15.720	13.910	8.780	202.930
Retorno													
Coopreser	17.940	20.090	7.450	11.450	17.980	12.240	18.420	12.890	13.960	12.620	8.090	10.760	163.890
Total Mes	28.938.350	26.448.130	29.103.410	27.806.440	29.361.210	29.946.830	30.124.740	29.788.800	29.032.460	29.250.480	28.609.470	31.124.044	

DISPOSICIÓN FINAL - MUNICIPIOS - AÑO 2016.

Ciente	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total año
Bucaramanga	14.990.440	15.004.240	15.765.680	15.960.040									61.720.400
Floridablanca	5.605.690	5.452.110	5.667.850	5.710.790									22.436.440
Girón	3.629.310	3.437.130	3.752.410	3.657.580									14.476.430
Piedecuesta	2.647.780	2.535.230	2.963.650	2.706.990									10.853.650
Lebrija	410.440	393.930	414.760	427.980									1.647.110
Rionegro	130.370	105.650	114.950	126.030									477.000
El Playón	134.250	116.620	107.590	121.920									480.380
Charta	7.330	7.400	7.240	5.760									27.730
Santa Bárbara	4.510	4.200	6.040	4.270									19.020
California	13.620	10.850	11.530	12.150									48.150
Matanza	13.660	16.070	9.170	12.300									51.200
Tona	36.780	44.090	44.220	34.240									159.330
Zapatoca	156.470	100.450	121.620	112.480									491.020
Retorno Bello													
Renacer	11.020	10.740	10.360	12.250									44.370
Retorno													
Coopreser	8.500	7.560	4.680	8.320									29.060
Total Mes	27.800.170	27.246.270	29.001.750	28.913.100	0	0	0	0	0	0	0	0	

