

# DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE PRODUCCIÓN DE RESIDUOS INCINERABLES PARA LA CIUDAD DE BUCARAMANGA Y SU CAPACIDAD ENERGÉTICA

Sánchez Quiroga, Karen Yaneth (1), Dr. Gómez Martínez, Miguel Ángel (2)

1 Ingeniería en Energía, Universidad Autónoma de Bucaramanga | Dirección de correo electrónico: ksanchez84@unab.edu.co

2 Departamento de Ingeniería Eléctrica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: gomezma@ugto.mx

## Resumen

En este trabajo 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 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 será de  $1,478 \times 10^9$  Kg por mes. Estos métodos permitieron calcular adicionalmente la capacidad energética con base en la cantidad y poder calorífico inferior que podría aprovecharse de dichos residuos si son tratados en un sistema de incineración. La capacidad energética de los residuos será de 2,622 MW térmicos por día, 1,573 MW eléctricos por día y se perderían diariamente 1,049 MW basados en la distribución energética típica de un sistema de cogeneración.

## Abstract

In this paper we obtain the mathematical model that describes the behavior of the amount of burnable solid waste that have occurred in the city of Bucaramanga and the metropolitan area in recent years is presented. This was done by plotting the points of history and using numerical method of least squares. Subsequently, data were projected Fourier Series and got the points of the amount of burnable waste that will occur in the next six years in Bucaramanga, whose average will  $1,478 \times 10^9$  kg per month. These methods allowed calculate the energy capacity based on the amount and Lower calorific value that could take advantage of such waste if they are treated in an incineration system. Energy capacity of waste will 2,622 MW thermal per day, 1,573 MWe per day and be lost daily 1,049 MW based on the typical energy distribution of a cogeneration system.

## Palabras Clave

Mínimos cuadrados; Poder calorífico inferior; Residuos incinerables; Series de Fourier.

## INTRODUCCIÓN

Cada día se produce 3,5 millones de toneladas de residuos sólidos en el mundo [1], cifra que aumenta constantemente debido al crecimiento 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. El Banco Mundial proyecta al 2025 una producción de 6,1 millones de toneladas de residuos sólidos diarias [1].

La disposición final de tales desechos, por el grado de contaminación que representan, se ha convertido en un reto difícil de superar.

Los rellenos sanitarios son actualmente la forma más usada de disposición de RSU en el mundo. En Colombia el 81% de los desechos va a dichos depósitos [2], situación que tiene en apuros a las autoridades ambientales del país. Bucaramanga no es la excepción, su relleno sanitario “El carrasco” debería haberse cerrado desde el año 2008 [3] por orden de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB, al ser considerado en emergencia sanitaria.

Cada tipo de residuo sólido cuenta con un poder calorífico y por tanto con un poder energético que mediante su incineración y uso del calor generado en la quema puede ser aprovechado. El uso de los humos calientes en un intercambiador de calor o en una caldera para generación de vapor acoplada a una turbina, permitirían la transformación de energía calorífica y eléctrica, respectivamente. Este sistema conllevaría a la disminución del volumen y peligrosidad de los residuos convirtiéndolos en cenizas, al tiempo que suministrarían cierto porcentaje de energía a la zona aledaña al sistema.

En este proyecto se obtiene por medio del método numérico mínimos cuadrados, el modelo matemático que describe el comportamiento de la cantidad de materia orgánica (incinerable) recibida mensualmente por la Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga desde 2010 hasta 2016, y se realiza por medio del método numérico Series de Fourier, la proyección de la cantidad de residuos

incinerables que recibirá la EMAB mensualmente durante los próximos 6 años.

Dicha proyección sienta las bases para un futuro estudio de factibilidad técnica y económica de una planta de incineración de residuos sólidos con conversión de energía. El potencial calorífico resultante de la caracterización y proyección de los residuos sólidos de la zona, su análisis térmico, exergético, las emisiones producidas por la quema con acoplamiento de mecanismos de mitigación y control, y los costos del sistema y su rentabilidad, serán las variables concluyentes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

- Matlab (Matrix Laboratory)
- Laptop

### Análisis de alternativas de manejo de residuos sólidos

#### *Vertido sin control*

Consiste en la acumulación de residuos sin ningún tipo de tratamiento a cielo abierto. 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% CO<sub>2</sub>. (Imagen 1)



IMAGEN 1: Vertido sin control

### 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 (Imagen 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.

Estos depósitos deben cumplir con una serie de requisitos, entre los que se destaca:

Necesidad de impermeabilización

Recogida de lixiviados

Recogida de gases procedentes de las fermentaciones mediante tubos perforados introducidos en la capa de residuos.



**IMAGEN 2: Relleno sanitario**

### 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 (Imagen 3). 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.



**IMAGEN 3: Producción de abono o compost**

### 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). (Imagen 4).

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 más destacan son:

- Escorias que representan un 20-25% en peso de los residuos y son aquel material que queda en el horno y no se puede quemar, como cerámicas, tierra, vidrios, objetos metálicos, entre otros.
- Las cenizas materiales volátiles representan entorno a un 2 – 6% en peso de los residuos. Son más peligrosas y contaminantes (residuos especiales) que los anteriores y se recogen por separado para llevarlos a un depósito de residuos controlado.

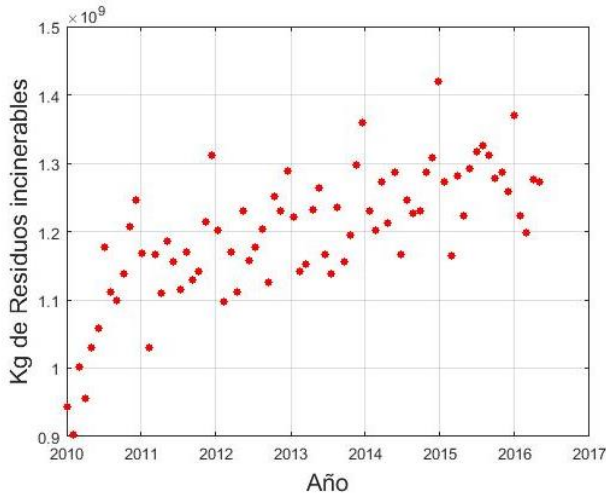


**IMAGEN 4: Incineración**

### Obtención del modelo matemático

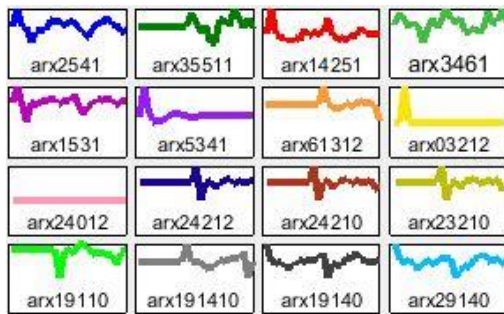
La obtención del modelo matemático, parte del uso del historial suministrado por la EMAB de cantidad en Kg de RSU recolectados y depositados mensualmente por la Empresa en el relleno sanitario El Carrasco desde enero de 2010 hasta abril de 2016.

Tras el consolidado de los datos y la tabulación de lo perteneciente a residuos incinerables, se grafica en MATLAB el historial mensual como se muestra en la Imagen 5.



**IMAGEN 5: Historial de cantidad de residuos sólidos incinerables producidos en Bucaramanga**

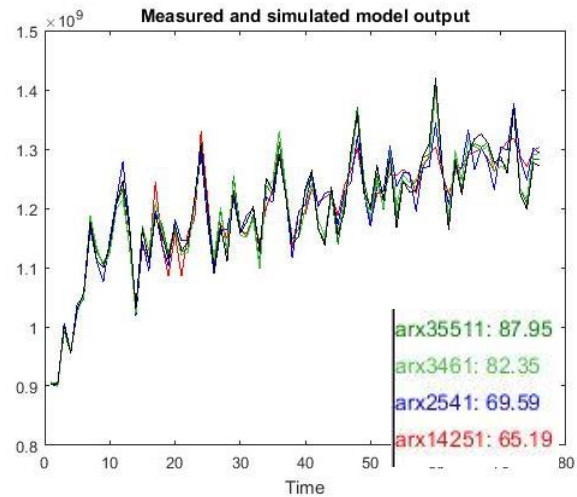
Posteriormente, en la herramienta *ident* (*System Identification Toolbox*) de Matlab, se importan los datos del historial de residuos incinerables, en el dominio del tiempo.



**IMAGEN 6: Pruebas de Orden para optimización del modelo matemático con ARX**

Seguidamente, se realizan las estimaciones pertinentes de modelos polinómicos (Polynomial Models), tomando como principio la estructura ARX (mínimos cuadrados) (Imagen 6), variando el Orden del modelo matemático (zeros y polos), hasta conseguir la curva que más se aproxima a los datos importados previamente.

Algunas de las curvas matemáticas obtenidas se muestran en la Imagen 7 y la elegida por mayor aproximación a los datos es la arx35511 (87,95%) que se expone en color verde pino. El tiempo se imprime por número de meses y los porcentajes de certeza de cada modelo matemático se muestran en la parte inferior derecha del cuadro.



**IMAGEN 7: Curvas de los modelos matemáticos más aproximados**

La representación matemática obtenida por el método de mínimos cuadrados de Matlab que describe con mayor exactitud el comportamiento del historial de residuos incinerables de Bucaramanga, es la siguiente:

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

Donde,

- $A(z) =$

$$1 - 0.2253 z^{-1} + 0.6632 z^{-2} - 0.2913 z^{-3} + 0.7436 z^{-4} + 0.5959 z^{-5} + 0.2442 z^{-6} + 0.4119 z^{-7} + 0.2865 z^{-8}$$

$$\begin{aligned}
 &+ 0.4322 z^{-9} + 0.3481 z^{-10} - 0.1227 z^{-11} - 0.0909 z^{-12} \\
 &+ 0.2446 z^{-13} + 0.6963 z^{-14} \\
 &- 0.01237 z^{-15} + 0.3454 z^{-16} - 0.08912 z^{-17} + 0.4891 \\
 &z^{-18} + 0.2605 z^{-19} + 0.5958 z^{-20} - 0.01712 \\
 &z^{-21} + 0.7832 z^{-22} + 0.2465 z^{-23} + 0.2881 z^{-24} + \\
 &0.4278 z^{-25} + 0.0301 z^{-26} + 0.619 z^{-27} + 0.1331 z^{-28} \\
 &+ 0.1595 z^{-29} + 0.08898 z^{-30} - 0.234 z^{-31} + 0.3139 z^{-32} \\
 &- 0.3446 z^{-33} + 0.2185 z^{-34} \\
 &+ 0.254 z^{-35}
 \end{aligned}$$

•  $B(z)=$

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

### Elaboración de la proyección

Para obtener la proyección de lo que será la cantidad de residuos sólidos incinerables recolectados en Bucaramanga en los próximos 6 años, se usó la herramienta *Curve Fitting* de Matlab.

Tras importar en la *toolbox* los datos históricos y elegir el método numérico de series de *Fourier* con 8 términos, se ajustan 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 (76) fue reemplazado por el número de meses que se espera ver graficado (152); de esta manera, se obtiene la curva, no sólo de los datos históricos (6 años y 4 meses), sino también de la proyección por medio del método numérico de Series de Fourier para los próximos 6 años.

El resultado del historial y la proyección se muestra en la Imagen 8.

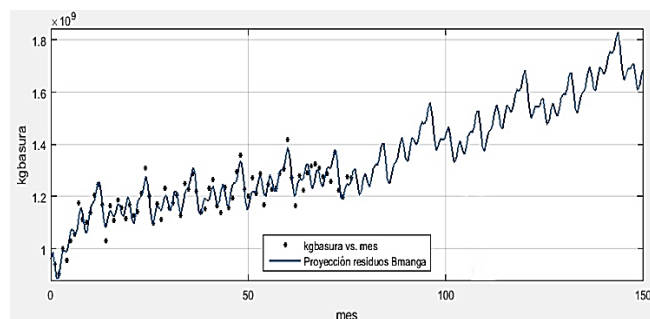


IMAGEN 8: Proyección de los residuos sólidos incinerables de Bucaramanga

Tras optimizada la proyección de los datos, se toman siete parejas de los puntos obtenidos para calcular la media de los residuos que estarán arrojándose en Bucaramanga y el área metropolitana en los próximos seis años. Las parejas de puntos extraídas de la proyección son las de la tabla 1.

TABLA 1: Datos de la proyección por series de Fourier

| X   mes | Y   Kg residuos [x10 <sup>9</sup> ] |
|---------|-------------------------------------|
| 75      | 1,3                                 |
| 87,5    | 1,42                                |
| 100     | 1,42                                |
| 112,5   | 1,47                                |
| 125     | 1,5                                 |
| 137,5   | 1,49                                |
| 150     | 1,75                                |

La sumatoria de los puntos Y sobre X revela la pendiente o índice de crecimiento de la variable dependiente:

$$\sum \frac{y_n}{X_n} = \sum \frac{10,35x10^9}{787,5} = 13,14x10^6$$

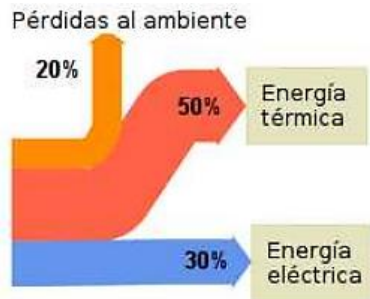
Y el promedio de los Kg incinerables proyectados es el siguiente:

$$\sum \frac{y_n}{n} = 1,4785x10^9 \text{ Kg/mes}$$

### Cálculo de la capacidad energética

Conociendo la cantidad de residuos sólidos a incinerar y el poder calorífico inferior de los mismos, es posible prever el total de MW que se generarían dentro de una típica planta diseñada para este tipo de proceso de disposición de residuos.

La Imagen 9 muestra el Diagrama energético de un ciclo de cogeneración típico [4]. Termodinámica y exergéticamente, es así como se distribuye el posible aprovechamiento de la energía en una planta de incineración de residuos sólidos urbanos.



**IMAGEN 9:** Diagrama energético de un ciclo de cogeneración típico

Para la aplicación de este sistema de tratamiento (incineración) es necesario que los residuos a tratar, posean un poder calorífico inferior (PCI), superior a las 1400 kcal/kg, a fin de asegurarse la auto-combustión [5]. El PCI de los despojos de Bucaramanga, es en promedio de 9,25 MJ/kg, lo que equivale a 2210,803 kcal/kg, cifra positivamente superior a la necesaria.

Partiendo de que el promedio diario de residuos incinerados, según la proyección, será de  $49 \times 10^6$  ( $1,4785 \times 10^9$  Kg/mes /30) y que el poder calorífico inferior de los RSU incinerables de Bucaramanga es de 9,25 MJ/kg, los MW generados para cada fin serán los siguientes:

- Energía térmica:

$$\frac{49 \times 10^6 \text{ kg}}{\text{día}} * \frac{9,25 \text{ MJ}}{\text{kg}} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} * 0,5 = 2,6229 \frac{\text{MW term}}{\text{día}}$$

- Energía eléctrica

$$\frac{49 \times 10^6 \text{ kg}}{\text{día}} * \frac{9,25 \text{ MJ}}{\text{kg}} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} * 0,3 = 1,5737 \frac{\text{MW elec}}{\text{día}}$$

- Energía perdida

$$\frac{49 \times 10^6 \text{ kg}}{\text{día}} * \frac{9,25 \text{ MJ}}{\text{kg}} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} * 0,2 = 1,0491 \frac{\text{MW perd}}{\text{día}}$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento de la cantidad de residuos sólidos incinerables, recolectados en Bucaramanga y el área metropolitana a través del tiempo, será aunque sinusoidal, de carácter

ascendente. La proyección no fue posible por medio del método mínimos cuadrados, razón por la cual se usó Series de Fourier. El cálculo de la energía aprovechable de los residuos en un sistema de incineración se realizó con base en porcentajes típicos, un cálculo más real sería posible si se tuviesen datos porcentuales de una planta ya existente.

## CONCLUSIONES

La cantidad de residuos sólidos incinerables producidos y recolectados en Bucaramanga continuará siendo ascendente según la proyección.

Habrà materia prima suficiente para generar 4,1966 MW de energía térmica y eléctrica diariamente, si se dispusiera de una planta de incineración de residuos sólidos en la ciudad.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, la UNAB y la Universidad de Guanajuato por hacer posible esta inolvidable experiencia. Al Dr. Miguel Ángel Gómez por su valioso asesoramiento durante este proceso de aprendizaje.

## REFERENCIAS

- [1] Banco Mundial (2016). Basura Cero - Los residuos sólidos en el epicentro del Desarrollo Sostenible. <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2016/03/03/waste-not-want-not---solid-waste-at-the-heart-of-sustainable-development>
- [2] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2015) Disposición final de Residuos Sólidos. Informe Nacional 2015. <http://www.superservicios.gov.co/content/download/10760/88380>
- [3] El Carrasco (2008) Problemática ambiental El Carrasco Bucaramanga <http://carrascobucaramanga.blogspot.mx/>
- [4] 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>
- [5] Plan de Gestión Integral de Residuos sólidos del área Metropolitana de Bucaramanga. UIS. <http://www.bucaramanga.gov.co/documents/dependencias/>