

Análisis de viabilidad para la instalación de una planta de incineración de residuos sólidos urbanos, para la generación de energía con bajo impacto ambiental en la ciudad de Cali

Feasibility analysis for the installation of an urban solid waste incineration plant, for the generation of energy with low environmental impact in the city of Cali.

Pablo Steven Torres Cortes
pablo.torres01@usc.edu.co

Álvaro José Medina Vargas
Alvaro.medina00@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería

Resumen

El objetivo de esta investigación fue analizar la viabilidad técnica y económica para la instalación de una planta de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) en la ciudad de Cali. Se tomó como base para el tamaño de la planta el documento del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos - PGIRS 2015 – 2027 actualizado al año 2020. En él se encuentra lo relacionado con el aumento poblacional en la ciudad además de la cantidad y caracterización de los RSU generados en Cali a través del tiempo. Teniendo en cuenta lo anterior se eligen los tipos de RSU óptimos para la incineración dado su poder calorífico. Por otro lado, se da a conocer la composición de la planta de incineración con los principales procesos hacia la generación de energía eléctrica. Seguido, se analizan los costos de inversión relacionados a la instalación de la planta de incineración, dentro de los principales costos se destacan: Maquinaria y equipos, obra civil y construcción, mano de obra administrativa y productiva, y algunos costos variables. Teniendo en cuenta los resultados anteriores se calcula el costo total de inversión para luego conocer los ingresos por venta de energía eléctrica y conocer la viabilidad económica del proyecto por medio del retorno de la inversión (Payback). Culminando, se propone un bosquejo y distribución en plan adecuada teniendo en cuenta 2 fuentes: El plano de la planta de incineración RSU ubicada en San Andrés y un Análisis de factibilidad para la implementación de una incineradora de residuos sólidos urbanos en el estado de Tlaxcala. Por último, se analiza la normativa colombiana aplicable al proceso de incineración de RSU en la ciudad de Cali, con esto se evalúa la viabilidad ambiental de acuerdo con los contaminantes (Gases) generados en la planta luego del proceso.

Palabras Clave: RSU, Incineración, Poder calorífico, Payback, Valorización energética.

Abstract

The thesis was carried out on the feasibility analysis for the installation of an urban solid waste incineration plant, for the generation of energy with low environmental impact in the city of Cali in order to know the technical, economic and environmental feasibility for the installation of a RSU incineration plant in the city of Cali. The document analyzes the generation of MSW in Cali through the years through the Comprehensive Solid Waste Management Plan - PGIRS 2015 - 2027 updated to 2020. It contains what is related to the population increase in the city in addition to the quantity and characterization of the MSW generated in Cali over time. Taking into account the above, the optimal types of MSW for incineration are chosen given their calorific power. In another way, the composition of the incineration plant with the main processes towards the generation of electrical energy is disclosed. Next, the investment costs related to the installation of the incineration plant are analyzed, among the main costs are: Machinery and equipment, civil works and construction,

administrative and productive labor, and some variable costs. Considering the previous results, the total investment cost is calculated to later know the income from the sale of electricity and know the economic viability of the project through the return on investment (Payback). At the end, a sketch and distribution in an adequate plan is proposed, considering 2 sources: The plan of the MSW incineration plant located in San Andrés and a feasibility analysis for the implementation of an urban solid waste incinerator in the state of Tlaxcala. Finally, the Colombian regulations applicable to the MSW incineration process in the city of Cali are analyzed, with this, the environmental viability is evaluated according to the pollutants (Gases) generated in the plant after the process.

Keywords: *MSW, Incineration, Calorific value, Payback, Energy recovery.*

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos en general se definen como “material sólido, semisólido, líquido o gas, cuyo generador o poseedor debe o requiere deshacerse de él, y que puede o debe ser valorizado o tratado responsablemente, o en su defecto, ser manejado por sistemas de disposición final adecuados.” (Pon, 2019). Conforme a eso, los residuos sólidos urbanos pueden describirse como cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que un generador abandona, rechaza o entrega que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final.

Se clasifican por tipo de manejo y por origen, de las cuales se destacan los residuos domiciliarios, que son aquellos generados en hogares, comercios, oficinas y servicios. Los residuos comerciales e institucionales que son generados por la actividad propia del comercio como bares, cafeterías, hotelería, oficinas y mercados. Los residuos industriales que son aquellos procesos de fabricación, transformación, utilización, consumo, limpieza y/o mantenimiento de productos.

Los residuos pueden ser catalogados como infecciosos, combustibles, inflamables, explosivos, reactivos, radiactivos, volátiles, corrosivos y/o tóxicos, la cuales pueden causar daño a la salud humana y/o al medio ambiente.

En Colombia, los residuos orgánicos son los componentes con mayor volumen y porcentaje que se presentan en el tipo de basura desechada, pues “Los residuos sólidos orgánicos urbanos constituyen cerca del 70% del volumen total de desechos generados” (Penagos Vargas et al., 2011). Esto es un indicador de que se deben realizar acciones o técnicas para contrarrestar tales índices de producción de residuos. En numerosas ocasiones el destino final de estos materiales no permite un adecuado aprovechamiento, puesto que parte de ellos pueden contener un notable poder nutritivo, un considerable potencial energético y unas características, en cuanto a su composición, que los hacen idóneos para su empleo en el sector agrícola.

Para disminuir el aumento y la acumulación de los desechos, han sido desarrollados diferentes métodos y tecnologías, incluyendo la mecánica, la biológica y los tratamientos térmicos. Entre los tratamientos térmicos se ha implementado la generación de energía a partir de la incineración de estos, proceso que se conoce generalmente como termo valorización. La incineración de Residuos para producir energía, se ha implementado ampliamente en el mundo, hay un índice de 255 millones de toneladas incineradas de residuos por año según lo menciona Reddy (2016). Según Fernández (2011) se ha implementado este mecanismo en países como Dinamarca donde el 55% de los residuos son incinerados, Suecia con un porcentaje igual al del país antes mencionado, Suiza con un valor del 45%, Holanda llevando a cabo un 48% de residuo incinerado, Francia con un 35% y finalmente Alemania con un porcentaje del 42%. Se menciona que, en promedio, el 29% de RSU gestionado en Europa en el año 2017 fue incinerado. Países como Finlandia, Suecia, Dinamarca, y Noruega incineraron más del 50% de RSU, mientras que otros nueve países incineraron entre el 30% y 50% de su RSU (CEWEP, 2019).

A través del tiempo en Europa se han aplicado diferentes metodologías de recolección y reciclaje a gran parte de los residuos sólidos urbanos, para cambiar la estrategia de minimizar el impacto a conservar los recursos y la energía, lo que se conoce como economía circular (Zero Waste Europe, 2018). Con la implementación de estas metodologías por parte de los gobiernos y los habitantes han ayudado a la selección de los RSU óptimos para la incineración mejorando los procesos de

Termo valorización.

La incineración es reconocida como el camino correcto para desviar los RSU de los vertederos y también como un recurso de energía local (Makarichi et al., 2018). Por consiguiente, la incineración de los RSU esta frecuentemente asociado con la reducción de emisiones de los gases de efecto invernadero desde que se evita las emisiones de metano de los vertederos y además contribuye a reducir el consumo de combustibles fósiles. Este es un beneficio para el clima que en muchos estudios de evaluaciones de ciclos de vida han sido óptimos (Jaunich et al., 2019).

A pesar de los beneficios que la incineración de RSU pueda tener, a otros les preocupa que una excesiva dependencia en la incineración pueda prevenir el reciclaje. Muchos reclaman que exista la posibilidad de que la incineración en grandes cantidades de RSU pueda prevenir la reubicación de los recursos económicos para el desarrollo de modelos de negocio de economía circular (Global Alliance for Incinerator Alternatives, 2013). Por lo que, la capacidad de incineración sobredimensionada en algunos países y sus necesidades para importar RSU es también visto como la obstaculización del reciclaje y el desarrollo de la infraestructura para administrar los RSU en los países que los exporta (Jofra Sora, 2013).

La mayoría de estos residuos sólidos urbanos poseen biomasa, que se define como “la fracción biodegradable de productos, deshechos y residuos de la agricultura (incluyendo substancias vegetales y animales), silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales e industriales” (Cerdá, 2012). La biomasa es la parte esencial en la producción de energía a partir de la incineración, pues es donde se origina el poder calorífico.

Cuando se habla de poder calorífico, suele referirse a “la cantidad de calor liberado durante la combustión completa de la unidad de masa de biomasa” (Lunguleasa et al., 2020) que puede explicarse como la energía liberada de un elemento o la cantidad de calor que genera al pasar por el proceso de combustión. El poder calorífico puede expresarse como superior o inferior. Arroyo Vinuesa (2016) menciona, que el poder calorífico superior es aquel que se libera al final de la combustión cuando el agua producto de la reacción de combustión está en forma líquida, y el poder calorífico inferior, es cuando el agua de los productos se encuentra en estado de vapor.

Dependiendo del tipo de residuo del que se trate y de la cantidad de biomasa que este posea, la energía derivada a partir de la incineración puede considerarse como un reemplazante de los combustibles fósiles utilizados tradicionalmente, así lo afirman Garcia et al., (2011) donde también mencionan que la recuperación de dicha energía contribuye a una reducción en las emisiones globales de dióxido de carbono en la producción de energía.

Siguiendo con la temática, en América Latina han sido poco implementadas metodologías de selección y recolección para la incineración de RSU. En San Andrés – Colombia, en el 2019 fue inaugurada la primera planta generadora de energía a partir de residuos sólidos que será auto sostenible por más de 25 años, ayudando a preservar el medio ambiente en esta isla y sus alrededores aumentando la vida útil del relleno sanitario Magic. En total, serán más de 73.000 personas las que se verán beneficiadas con la puesta en marcha de esta planta energética, entre los cuales se destacan los habitantes de la isla y los miles de turistas que la visitan a diario. (La Nota Positiva, 2019).

Se espera que México se convierta en el primer país de América Latina en tener una Planta de Termo valorización capaz de procesar 4500 toneladas de residuos por día y se generar 965 mil Mwh/año para suministrar de energía a las 12 líneas del STC-Metro, lo que significa que estará a la vanguardia en el manejo de la basura. Esto surge ante la necesidad de contrarrestar la problemática que existe en la Ciudad de México en relación con las 13 mil toneladas de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que se generan a diario, de las cuales más de ocho mil 600 se exportan a rellenos sanitarios a un precio de casi 500 pesos por tonelada (Martínez, 2017).

En Colombia se han realizado estudios similares para la reducción de residuos. La ciudad de Medellín, que además de poseer el segundo puesto en ciudad más poblada, también recibe el título del segundo centro económico más importante del país. Montiel-Bohórquez & Pérez (2019) afirman que la generación de RSU al día es en promedio de 1838 toneladas, de los cuales se destaca que el 84.74% de los residuos podría aprovecharse para generar una producción de energía estimada que varía entre los 27.7 MWe y los 44.4 MWe.

Según históricos presentados en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Santiago de Cali (2015), en el periodo

2005 – 2014, la generación de residuos sólidos aumentó en unas 97.802 toneladas, al igual que el tamaño poblacional, que se incrementó en 124.989 habitantes. De lo anterior es prudente decir, que el aumento de la producción de residuos sólidos es directamente proporcional al tamaño de la población. Además de presentar históricos, el Plan de Gestión indica que para 2027, se estima tener una población de 2.628.224 habitantes, lo que indica que aumentaría en unos 295.011 habitantes dentro del territorio.

Debido a que se reconoce que el aumento poblacional está relacionado con el aumento de los residuos, el Plan de Gestión de Santiago de Cali (2015) identifica los sectores donde más se presentan este tipo de aumentos, afirmando que el sector residencial genera una participación promedio del 78.9% en la producción de residuos sólidos, de los cuales le siguen el sector comercial y el sector de espacios públicos con 8.9% y 8.3% de participación.

En la ciudad de Cali, se posee un control deficiente en las actividades de aprovechamiento, solo se tiene dos tipos de disposición final, relleno sanitario (fuera de la ciudad) y vertederos (Rio Cauca), en el que un pequeño porcentaje es reutilizado y explotado. Solo se cuenta con el método de ósmosis invertida, utilizada para purificar el agua resultante de las basuras y mitigar la contaminación del río cauca (Diario El Tiempo, 2019), como también el proceso de compostaje para descomponer la materia orgánica y reciclaje, en el que se intenta aprovechar este tipo de recursos.

De esta forma, en este artículo se realiza un estudio en el que se caracterizan los residuos generados en la ciudad de Cali para demostrar la viabilidad de una posible solución frente a la reducción del volumen de este y el aprovechamiento de los recursos, basado en la implementación de la incineración de residuos sólidos como técnica para el aprovechamiento de las propiedades caloríficas de cada residuo para generar energía térmica, reduciendo el impacto ambiental generado por los altos volúmenes de producción de los mismos.

2. METODOLOGIA

Para la realización del análisis de viabilidad para la instalación de una planta de incineración de residuos sólidos urbanos para la generación de energía con bajo impacto ambiental en la ciudad de Cali se deberá tener en cuenta algunos requerimientos y aplicaciones en el proceso como se observa a continuación:

Requerimientos del proceso	Generación por el proceso de incineración	Aplicaciones
Caracterización de RSU en la ciudad de Cali. Tipos y Cantidades requeridas de RSU para el funcionamiento de la caldera de incineración. Poder calorífico de los RSU escogidos para el proceso. Porcentaje de humedad de los RSU para la incineración. Infraestructura (Tamaño de Planta de incineración, Cantidad de RSU procesados, ubicación optima en la ciudad de Cali, Distribución de planta, Inversión económica necesaria, insumos y materiales necesarios para la construcción de la planta de incineración). Sistema de purificación de aire.	Tipos y cantidades de gases y toxinas generados a partir de incineración de los RSU. Cantidad de energía eléctrica y térmica generada al finalizar el proceso. Cantidades de cenizas y desperdicios generados a través del proceso. Beneficios económicos generados en el proceso (Cantidad de energía generada y ver cómo se puede vender o algo para recuperar la inversión).	Con la cantidad de energía eléctrica y térmica generada al finalizar el proceso se pueden identificar aplicaciones para dar buen uso a la energía obtenida. Disposición final para las cenizas y desperdicios generados a través del proceso (Terraplenes, Carreteras Edificaciones y obras públicas, Fabricación de ladrillos) Disposición final para el agua utilizada en el proceso de incineración (Reutilización)

Normativa aplicable al proceso de incineración.		
---	--	--

Para llevar a cabo el proyecto, inicialmente se obtuvo información de las cantidades de RSU en la ciudad de Cali, en lo que se identificó cada sector donde se producen y se definió cuáles son los tipos de residuos que se generan. Para esto se obtuvo información detallada de la generación de RSU en la ciudad por medio de la comunicación directa con la alcaldía de Cali, lo cual permitió identificar y analizar cómo se lleva a cabo el Plan de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS 2015 - 2027). Con el PGIRS se obtuvo información actualizada acerca de la caracterización y cantidades de RSU por zonas en la ciudad de Cali.

Para que el proceso de obtención de energía se pueda realizar de manera eficiente, los residuos que se van a utilizar deben ser materiales combustibles. Para conocer cuales residuos son más factibles, se analizó la información recolectada de acuerdo con criterios de exclusión e inclusión para el tipo de residuos y su origen. Un ejemplo claro de criterio es, el límite máximo de humedad, el cual se fija de acuerdo con el poder calorífico del material seco. Además, se obtuvo información conforme al poder calorífico de los residuos más comunes, donde se pudo conocer cuanta energía produce un determinado material al momento de incinerarse.

Se realizó la selección de aquellos elementos RSU más factibles para el proceso de incineración, teniendo en cuenta que algunos de los residuos contaban con otra disposición final, no generaban suficiente energía en su combustión (poder calorífico bajo) o se tenía poca información acerca de él como, por ejemplo, el porcentaje de humedad. Luego de esto, fue necesario conocer y seleccionar el material a ser incinerado teniendo en cuenta los requerimientos anteriores.

Teniendo en cuenta algunos autores, se describieron los compuestos o partes de una planta de incineración de residuos con el fin de generar energía. Esta permitió conocer la distribución de una planta y las funciones que se ejecutan dentro de la misma para poder generar energía eléctrica. Además, se revisaron costos de diferentes referencias con el fin de obtener un bosquejo sobre lo que se debe tener en cuenta al momento de realizar la inversión inicial para la construcción de una planta. Se basó en obtener costos promedios de inversión, operación y mantenimiento de la planta además de la consulta de los posibles salarios a la mano de obra contratada.

Con respecto a la información de residuos factibles, se investigaron casos con referencias acerca de las eficiencias que poseen este tipo de equipos y procesos. Se analizaron dos escenarios, uno con buena eficiencia y otro con mala eficiencia de conversión de la energía del combustible a energía eléctrica. Luego se realizó un esquema sobre la distribución de la planta para el caso que se analiza y la posible ubicación de la planta, la cual se eligió de manera estratégica debido a los procesos requeridos para la generación de energía a partir de RSU.

Se tuvieron en cuenta también, las leyes a nivel nacional con respecto a la generación de energía a partir de nuevas tecnologías, junto con el rango de emisiones permitidas en el aspecto ambiental. También se dio a conocer las alternativas para la disposición final del residuo luego de ser incinerado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. INFORMACIÓN SOBRE LOS RESIDUOS

De acuerdo con la metodología, para obtener la clasificación de los residuos sólidos que se producen dentro de la ciudad, fue necesario primero analizar la cantidad de habitantes en promedio por zona, que en este caso es diferenciada por comunas; esto debido a que la producción de residuos sólidos urbanos es directamente proporcional con el tamaño de la población. En la Tabla 1 están clasificados por comunas las diferentes zonas de la ciudad, junto con el área bruta que ocupan, la densidad poblacional que presentan y el estrato predominante. Se destaca que la comuna 15 es la que más densidad posee de las 22, llegando a obtener una densidad poblacional aproximada de 415.1 habitantes, del cual se puede intuir que tienen mayor participación en la producción de residuo sólido urbano en la ciudad.

Comuna	Área de la Comuna (Ha)	Densidad Poblacional (Hab/Ha)	Estrato Moda	Comuna	Área de la Comuna (Ha)	Densidad Poblacional (Hab/Ha)	Estrato Moda
1	384,2	253.5	1	12	232,9	285,0	3
2	1131,3	106.6	5	13	473,7	377,7	2
3	370,4	126.2	3	14	454,3	391,5	1
4	452,5	115.9	2	15	406,0	415,1	1
5	419,8	273.6	3	16	427,6	257,7	2
6	501,2	388.9	2	17	1255,6	119,0	5
7	498,8	139.9	3	18	542,9	263,2	3
8	526,7	195.6	3	19	1136,7	101,9	4
9	289,9	151.7	3	20	243,9	288,5	1
10	429,8	261.0	3	21	482,9	244,3	1
11	370,0	295.0	3	22	1058,9	11,4	6

Tabla 1 Área bruta, densidad poblacional y estratos moda de las comunas de Santiago de Cali. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Además de obtener información poblacional, también fue de mucha importancia conocer hacia donde se dirigían las cantidades de residuo sólido urbano resultante y en que cantidades. En la Tabla 2 se muestran las cantidades aproximadas por año de residuos clasificados por el sitio donde proceden a cumplir su último ciclo de vida, donde se evidencia que a medida que va pasando el tiempo, aumentan el total de residuos residenciales los cuales están tomados por toneladas. Dentro del análisis y fabricación de la tabla, se llega a la conclusión que se tiene una tasa de crecimiento aproximada del 2.7%.

Descripción	Unidad	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Relleno sanitario	ton/año	26.693	28.261	32.071	34.073	35.673	38.115	46.305	
Estación de transferencia	ton/año	561.616	585.383	600.004	610.762	615.447	644.213	655.479	
Total, por año	ton/año	588.309	613.644	632.075	644.836	651.121	682.329	701.784	
Indicador por día	ton/día	1611,8	1681,2	1731,7	1766,7	1783,9	1869,4	1922,7	
Tasa de crecimiento	%	1,9%	4,1%	2,9%	2,0%	1,0%	4,6%	2,8%	
Tasa de crecimiento promedio	%	2,7%							

Tabla 2 Cuantificación de residuos sólidos generados en Santiago de Cali y reportados en disposición final. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

De manera más específica, también se clasificó la producción de los residuos a partir de los diferentes sectores que existen en la ciudad, como lo son el residencial, comercial e industrial, hospitalario, plazas de mercado, rural y recorrido de vías y mixtos. La tabla 3, muestra como la zona residencial es aquella que más porcentaje obtiene en cuanto a producción de residuos en todos los años analizados.

Sector	2012	2013	2014	Promedio
Residencial	79,9%	78,8%	78,0%	78,9%
Comercial e industrial	8,1%	8,9%	9,8%	8,9%
Hospitalaria	0,2%	0,2%	0,1%	0,2%
Plazas de mercado	1,7%	2,0%	2,1%	1,9%
Recorrido de vías o mixtos	8,2%	8,5%	8,2%	8,3%
Rural	1,8%	1,6%	1,7%	1,7%

Tabla 3 Porcentaje de participación por sector de la cantidad de residuos sólidos recolectados. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Puesto que ya se conoció que sector presentó la mayor frecuencia de producción de residuos sólidos urbanos, fue posible detallar la población de la cual se obtienen más residuos. En la tabla 4 y 5 clasifican por estrato socioeconómico, los tipos de desechos que se presentan dentro de las residencias, seleccionando los que más predominantes, obteniendo además el porcentaje de participación que poseen dentro de los residuos totales. En la tabla 4 es posible evidenciar que aproximadamente el 71,2% de los residuos sólidos urbanos que se obtienen de las residencias unifamiliares está repartido entre orgánico, papel, cartón y resinas de plástico, lo que quiere decir que aquellos son los productos que más se consumen dentro de los hogares. De manera similar se obtiene que, para las residencias multifamiliares, aproximadamente el 97.36% de los residuos proviene del tipo orgánico, resinas de plástico y otro tipo de residuos. En este caso, los porcentajes de cartón, papel y vidrio disminuyen significativamente.

Estrato	Orgánico	Papel	Cartón	Resinas plástico	Vidrio	Metálicos	Otros residuos	RESPEL	Total
1	58,21%	1,26%	2,04%	11,69%	0,60%	0,58%	25,39%	0,24%	100%
2	59,24%	1,18%	2,94%	8,15%	1,38%	0,85%	26,09%	0,18%	100%
3	50,76%	1,64%	2,24%	10,84%	2,01%	0,72%	30,96%	0,83%	100%
4	53,99%	1,49%	3,07%	10,76%	2,79%	0,66%	26,97%	0,27%	100%
5	46,31%	2,79%	2,87%	10,27%	3,18%	1,24%	32,97%	0,35%	100%
6	51,58%	2,40%	3,51%	9,50%	2,85%	0,73%	28,69%	0,74%	100%
General	52,25%	1,89%	2,79%	10,24%	2,32%	0,83%	29,21%	0,47%	100%

Tabla 4 Composición física de los residuos sólidos por categoría y estrato socioeconómico para el sector unifamiliar urbano. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Estrato	Orgánico	Papel	Cartón	Resinas plástico	Vidrio	Metálicos	Otros residuos	RESPEL	Total
1	48,00%	1,04%	0,52%	8,01%	0,00%	0,82%	41,35%	0,24%	100%
2	60,64%	1,56%	4,15%	10,25%	0,48%	0,00%	22,76%	0,16%	100%
3	44,31%	3,49%	2,95%	13,01%	3,69%	0,83%	30,92%	0,79%	100%
4	58,41%	2,20%	3,55%	10,02%	1,50%	1,26%	22,91%	0,15%	100%
5	57,09%	2,42%	3,12%	10,27%	3,96%	0,81%	21,26%	1,07%	100%
6	57,79%	2,92%	3,11%	7,84%	4,75%	0,81%	20,18%	2,60%	100%
Total	55,02%	2,68%	3,14%	10,10%	3,63%	0,87%	23,31%	1,24%	100%

Tabla 5 Composición física de los residuos sólidos por categoría y estrato socioeconómico para el sector multifamiliar urbano. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Con la intención de detallar el tipo de residuos que se producen, se obtuvo también la tipología que poseen en las zonas unifamiliares tanto urbanas como rurales. Desde la tabla 6 hasta la tabla 13 se obtienen los porcentajes de participación del tipo de residuo sobre el total. Cada tabla expresa la clasificación de un tipo de residuo, en la tabla 6 se muestra para la categoría de orgánicos, en la tabla 7 para los residuos de papel, para la tabla 8 los derivados del cartón, en la tabla 9 se presenta la tipología para resinas y plásticos, para la tabla 10 se tienen los derivados del vidrio, para la tabla 11 se encuentran los producidos por metales, en la tabla 12 para residuos mixtos y finalmente en la 13 se clasifican para RESPEL.

Tipología	Zona	
	Unifamiliar urbano	Unifamiliar rural
Alimentos preparados	30%	16%
Alimentos no preparados	64%	78%
Residuos de poda y jardín	6%	5%
TOTAL	100%	100%

Tabla 6 Consolidado de tipologías para la categoría de residuos orgánicos. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Tipología	Zona	
	Unifamiliar urbano	Unifamiliar rural
Blanco de primera	0%	0%
Archivo	51%	61%
Directorios	0%	0%
Revista	1%	14%
Periódico	48%	25%
TOTAL	100%	100%

Tabla 7 Consolidado de tipologías para la categoría de residuos de papel. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Tipología	Zona	
	Unifamiliar urbano	Unifamiliar rural
Kraft	2%	9%
Corrugado	19%	38%
Plegadiza	42%	22
Cartón Huevo	20%	23%
Tetra Pack	17%	9%
Cartón	1%	0%
TOTAL	100%	100%

Tabla 8 Consolidado de tipologías para la categoría de residuos de cartón. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Tipología	Zona	
	Unifamiliar urbano	Unifamiliar rural
Polietileno baja densidad	41%	39%
Polietileno de alta densidad	19%	22%
Policarbonato	4%	4%
Poliestireno rígido	9%	15%
Policloruro de vinilo	0%	0%
PET transparente	8%	12%
PET ámbar	1%	2%
PET verde	1%	0%
Polipropileno rígido	1%	3%
Polipropileno flexible	1%	0%
Poliestireno expandido	13%	3%
Otros Plásticos	1%	0%
TOTAL	100%	100%

Tabla 9 Consolidado de tipologías para la categoría de residuos de resinas y plásticos. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Tipología	Zona	
	Unifamiliar urbano	Unifamiliar rural
Ámbar	12%	11%
Transparente	74%	72%
Verde y colores	14%	16%
TOTAL	100%	100%

Tabla 10 Consolidado de tipologías para la categoría de residuos de vidrios. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Tipología	Zona	
	Unifamiliar urbano	Unifamiliar rural
Metálicos	0%	0%
Ferrosos	4%	3%
Aluminio	46%	36%
Plomo	0%	0%
Cobre	2%	10%
Otros metales	48%	52%
TOTAL	100%	100%

Tabla 11 Consolidado de tipologías para la categoría de residuos de metálicos. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Tipología	Zona	
	Unifamiliar urbano	Unifamiliar rural
Textiles	8%	9%
Gomas	0%	0%
Caucho	0%	0%
Cuero	0%	0%
Madera	0%	1%
Cerámicos	2%	1%
Cenizas	1%	0%
Barrido de Viviendas	43%	67%
Residuos higiénicos y sanitarios	46%	21%
TOTAL	100%	100%

Tabla 12 Consolidado de tipologías para la categoría de otros residuos o residuos mixtos. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Tipología	Zona	
	Unifamiliar urbano	Unifamiliar rural
Empaque de Mantenimiento Automotriz	4%	5%
Productos de belleza y de aseo	8%	0%
Mantenimiento hogar y limpieza	17%	0%
Lámparas	3%	10%
Baterías, pilas, eléctricos y electrónicos	10%	31%
Cortopunzante	4%	0%
Biocidas y plaguicidas	5%	0%
Medicinas y Fármacos	49%	53%
TOTAL	100%	100%

Tabla 13 Consolidado de tipologías para la categoría de RESPEL. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Cabe resaltar que, las cifras que van del periodo 2012 a 2018 tomadas del Plan De Gestión Integral De Residuos Sólidos De Santiago De Cali que se evidencian en la tabla 2, son utilizadas por la misma fuente como históricos. Como ya se mencionó, la producción de residuos sólidos urbanos está muy relacionada con el número de pobladores de una determinada zona. La función de aquellas cifras es servir de base a la hora de realizar proyecciones, donde se pueda estimar cómo se comporta el crecimiento poblacional y, por ende, como lo hace la cantidad de residuos sólidos.

Conforme a lo anterior, dentro de la información recolectada se poseen estimaciones o proyecciones sobre el comportamiento en la cantidad de habitantes de Santiago de Cali junto con los 15 corregimientos que conforman el área rural de la ciudad. La primera parte se puede ver en la tabla 14, en la cual se obtiene una proyección anual que va desde el 2018 hasta el 2027. El crecimiento es muy notorio a través de los años, debido a que se llega a obtener una proyección para el año final de 2.380.300 habitantes.

Descripción	Población									
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Valle	4.475.886	4.506.768	4.532.152	4.556.752	4.589.278	4.622.132	4.656.374	4.691.758	4.728.096	4.765.108
Cabecera	3.809.542	3.840.356	3.866.560	3.893.175	3.928.365	3.964.228	4.001.099	4.038.740	4.076.974	4.115.535
Resto	666.344	666.412	665.592	663.577	660.913	657.904	655.275	653.018	651.122	649.573
Participación cabecera	85,1	85,2	85,3	85,4	85,6	85,8	85,9	86,1	86,2	86,4
Participación resto	14,9	14,8	14,7	14,6	14,4	14,2	14,1	13,9	13,8	13,6
Cali	2.227.642	2.241.491	2.252.616	2.264.748	2.280.907	2.297.230	2.316.513	2.337.182	2.358.636	2.380.300
Cabecera	2.172.527	2.190.363	2.205.680	2.217.961	2.234.309	2.250.842	2.270.293	2.291.141	2.312.726	2.334.505
Resto	55.115	51.128	46.936	46.787	46.598	46.388	46.220	46.041	45.910	45.795
Participación cabecera	97,5	97,7	97,9	97,9	98,0	98,0	98,0	98,0	98,1	98,1
Participación resto	2,5	2,3	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9
Participación Cali/Valle %	49,8	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,8	49,9	50,0

Tabla 14 Proyección del número de habitantes en el Municipio de Santiago de Cali para un horizonte de tiempo de 12 años. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Debido al crecimiento poblacional, la acumulación de residuo sólido urbano también presenta un aumento significativo. Con base a eso, la Alcaldía de Santiago de Cali realizó las proyecciones de la generación de residuos sólidos que comprenden desde el periodo 2015 hasta el 2027 presentadas en las tablas 15 y 16, donde se tiene en cuenta el porcentaje de crecimiento resultante que se muestra en la tabla 2 que posee el nombre de tasa de crecimiento promedio.

Descripción	UND.	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Total, por año	Ton/año	644.836	651.121	682.329	701.784	720.732	740.192	760.177
Población total Cali	habitantes	2.369.821	2.394.925	2.420.114	2.227.642	2.241.491	2.252.616	2.264.748
Cabecera	habitantes				2.172.527	2.190.363	2.205.680	2.217.961
Resto	habitantes				55.115	51.128	46.936	46.787
Indicador por día total - Cali	Ton/día	1.767	1.784	1.869	1.923	1.975	2.028	2.083
Indicador por día - Cabecera	Ton/día				1.875	1.930	1.986	2.040
Indicador por día - Resto	Ton/día				48	45	42	43
Tasa de crecimiento residuos	%					2,7%	2,7%	2,7%

Tabla 15 Proyección de la generación residuos sólidos residenciales en Santiago de Cali para el periodo 2015-2021. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Descripción	UND.	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Total, por año	Ton/año	780.702	801.781	801.781	801.781	801.781	801.781
Población total Cali	habitantes	2.280.907	2.297.230	2.316.513	2.337.182	2.358.636	2.380.300
Cabecera	habitantes	2.234.309	2.250.842	2.270.293	2.291.141	2.312.726	2.334.505
Resto	habitantes	46.598	46.388	46.220	46.041	45.910	45.795
Indicador por día total - Cali	Ton/día	2.139	2.197	2.197	2.197	2.197	2.197
Indicador por día - Cabecera	Ton/día	2.095	2.153	2.153	2.154	2.154	2.155
Indicador por día - Resto	Ton/día	44	44	44	43	43	42
Tasa de crecimiento residuos	%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%

Tabla 16 Proyección de la generación residuos sólidos residenciales en Santiago de Cali para el periodo 2022-2027. Fuente: (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Puesto que ya se mencionó que la zona residencial es el sector que más participa en la producción de residuos sólidos urbanos, fue importante detallar la composición de dichos residuos para analizar cuáles son los más factibles a la hora de realizar el proceso de generación de energía a través de su incineración, es por eso que se presenta la tabla 17, la cual posee la proyección de los residuos producido en las zonas residenciales, lo cuáles son los orgánicos, el papel, cartón, las resinas de plástico, residuos de vidrio, los metálicos, textiles, cerámicos, cenizas, barrido de viviendas y residuos de viviendas entre otros. También se proyecta el total de residuos obtenidos en los años proyectados, llegando a alcanzar una cantidad aproximada de 801.781 residuos anuales.

Tipo de Residuo	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022	Año 2023	Año 2024	Año 2025	Año 2026	Año 2027
Orgánico	354788,8	358246,8	375417,4	386121,6	396546,7	407253,6	418249,4	429542,2	441139,9	441139,9	441139,9	441139,9	441139,9
Papel	17281,6	17450,0	18286,4	18807,8	19315,6	19837,1	20372,7	20922,8	21487,7	21487,7	21487,7	21487,7	21487,7
Cartón	20247,9	20445,2	21425,1	22036,0	22631,0	23242,0	23869,6	24514,0	25175,9	25175,9	25175,9	25175,9	25175,9
Resinas Plástico	65128,4	65763,2	68915,2	70880,2	72793,9	74759,4	76777,9	78850,9	80979,9	80979,9	80979,9	80979,9	80979,9
Vidrio	23407,5	23635,7	24768,5	25474,8	26162,6	26869,0	27594,4	28339,5	29104,7	29104,7	29104,7	29104,7	29104,7
Metálicos	5610,1	5664,8	5936,3	6105,5	6270,4	6439,7	6613,5	6792,1	6975,5	6975,5	6975,5	6975,5	6975,5
Otros residuos	150311,3	151776,3	159050,9	163585,9	168002,6	172538,8	177197,3	181981,6	186895,2	186895,2	186895,2	186895,2	186895,2
TEXTILES	12767,8	12892,2	13510,1	13895,3	14270,5	14655,8	15051,5	15457,9	15875,3	15875,3	15875,3	15875,3	15875,3
CERÁMICOS	2192,4	2213,8	2319,9	2386,1	2450,5	2516,7	2584,6	2654,4	2726,1	2726,1	2726,1	2726,1	2726,1
CENIZAS	709,3	716,2	750,6	772,0	792,8	814,2	836,2	858,8	882,0	882,0	882,0	882,0	882,0
BARRIDO DE VIVIENDAS	78154,1	78915,9	82698,3	85056,2	87352,7	89711,3	92133,5	94621,1	97175,9	97175,9	97175,9	97175,9	97175,9
RESIDUOS HIGIÉNICOS	56358,7	56908,0	59635,6	61335,9	62992,0	64692,8	66439,5	68233,4	70075,7	70075,7	70075,7	70075,7	70075,7
RESPEL (Peligroso)	7996,0	8073,9	8460,9	8702,1	8937,1	9178,4	9426,2	9680,7	9942,1	9942,1	9942,1	9942,1	9942,1
Total	644836	651121	682329	701784	720732	740192	760177	780702	801781	801781	801781	801781	801781

Tabla 17 Proyección de la generación tipo de residuos sólidos Cali 2015-2027 (Ton/año). Elaboración propia teniendo en cuenta datos de (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

3.2. PODER CALORÍFICO DE LOS RESIDUOS

Dentro de los resultados ya se tiene la cantidad de habitantes o población que se tiene y la proyectada a futuro, también se posee información sobre los sectores donde más se producen residuos sólidos además de conocer qué clase de residuos son los que predominan junto con la proyección de producción para los siguientes años. Para adentrar en el tema de la generación de energía a partir de la incineración de los residuos era necesario que se obtuvieran los valores en el poder calorífico generado por los mismos, por lo que en la tabla 18, se muestra el poder calorífico de aquellos residuos más comunes en las zonas residenciales. La información está organizada para que el lector pueda corroborar el poder calorífico en diferentes unidades de medida, como lo son Giga Joules/tonelada (GJ/t), Kilovatio-hora/kilogramo (kWh/Kg), Kilocaloría/Kilogramo (kcal/Kg) y Tonelada equivalente de petróleo/Tonelada (tep/t).

Poderes caloríficos de los principales residuos

Tipo de residuo		PCI (GJ/t)	PCI (kWh/Kg)	PCI (kcal/Kg)	PCI (tep/t)
CDR – RSU	Fracción no degradable	18,14	5,04	4.344	0,4344
	Fracción degradable	9,86	2,74	2.362	0,2362
Neumáticos	Fracción no degradable	31,00	8,61	7.423	0,7423
	Fracción degradable	42,09	11,69	10.080	1,0080
De vehículos fuera de uso	Fracción no degradable	48,78	13,55	11.682	1,1682
	Fracción degradable	28,94	8,04	6.930	0,6930
Textil, calzado, artículos de piel	Fracción no degradable	38,09	10,58	9.122	0,9122
	Fracción degradable	18,47	5,13	4.422	0,4422
Plásticos	Fracción no degradable	32,71	9,09	7.834	0,7834
	Fracción degradable	34,21	9,50	8.192	0,8192
Residuos líquidos de hidrocarburo	Fracción no degradable	13,47	3,74	3.226	0,3226
Serrín impregnado o madera tratada	Fracción degradable	25,02	6,95	5.992	0,5992
Residuos orgánicos fermentables	Fracción degradable	5,50	1,53	1.317	0,1317
Lejías negras	Fracción degradable	12,53	3,48	3.000	0,3000
Papel y cartón	Fracción degradable	19,00	5,28	4.550	0,4550
Envases compuestos	Fracción no degradable	32,71	9,09	7.834	0,7834
Madera y artículos derivados	Fracción degradable	15,41	4,28	3.689	0,37
Muebles	Fracción degradable	16,70	4,64	4.000	0,4000
Residuos domésticos especiales	Fracción no degradable	16,27	4,52	3.896	0,39
Celulosa sanitaria	Fracción degradable	13,87	3,85	3.322	0,3322

Tabla 18 Poder Calorífico De Los Principales Residuos. (Hermenegildo Rodríguez, s. f.)

3.3. RESIDUOS FACTIBLES

Conforme a la información proporcionada por los pronósticos de las cantidades de residuo sólido urbano residencial realizados por el plan de gestión integral de residuos sólidos de Santiago de Cali, se escogieron aquellos residuos que eran más factibles para el proceso de incineración. La tabla 19, posee las cantidades de residuo proyectadas solamente del tipo de los desechos que no poseen otro tipo de uso después de su vida útil o que no proceden al reciclaje luego de ser desechados, junto con el total de toneladas al año con las que se contaría para producir energía a partir de la incineración de estos.

Tipo de Residuo	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022	Año 2023	Año 2024	Año 2025	Año 2026	Año 2027
Orgánico	354788,8	358246,8	375417,4	386121,6	396546,7	407253,64	418249,4	429542,24	441139,9	441139,9	441139,9	441139,9	441139,9
Papel	17281,6	17450,04	18286,42	18807,81	19315,62	19837,146	20372,74	20922,814	21487,73	21487,73	21487,73	21487,73	21487,73
Cartón	20247,85	20445,2	21425,13	22036,02	22630,98	23242,029	23869,56	24514,043	25175,92	25175,92	25175,92	25175,92	25175,92
Resinas Plástico	65128,44	65763,22	68915,23	70880,18	72793,93	74759,392	76777,88	78850,902	80979,88	80979,88	80979,88	80979,88	80979,88
Textiles	12767,75	12892,2	13510,11	13895,32	14270,49	14655,802	15051,5	15457,9	15875,26	15875,26	15875,26	15875,26	15875,26
Total	470214,4	474797,4	497554,3	511740,9	525557,8	539748,01	554321,1	569287,9	584658,7	584658,7	584658,7	584658,7	584658,7

Tabla 19 Proyección de la generación tipo de residuos sólidos aptos para incineración Cali 2015-2027 (Ton/año). Elaboración propia teniendo en cuenta datos de (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Debido a que el material que se utiliza como combustible es un producto resultante del consumo humano en su mayoría contiene cantidades variables de agua (porcentaje de humedad), el cual es importante que se conozca a la hora de ejecutar el proceso de incineración debido a que esto influye en el tiempo de combustión del tipo de residuo y en la cantidad de energía que se pueda obtener. Conforme a esto, tabla 20 se plasmaron los porcentajes de humedad por tipo de residuo, donde se les proporciona el valor de la humedad del residuo sin mezclar y mezclado con los demás. Se considera que el tipo de residuo que más porcentaje de humedad posee es el de tipo orgánico, seguido por los residuos de madera, luego papel y cartón, entre otros.

Componentes	Humedad en %	
	Sin mezclar	Mezclados
Orgánicos	68	65
Papel y cartón	12	24
Plásticos	1	2
Madera	20	24
Téxtil	12	19
Vidrio	2	3
Metales	2	2

Tabla 20 Porcentaje de humedad de los residuos sólidos urbanos. Fuente: (Ambientum, s. f.)

3.4. COMPOSICIÓN DE UNA PLANTA

La generación de energía a partir de la incineración de residuos sólidos es un proceso bastante grande pues comprende desde que se recolectan los residuos factibles para generar energía, hasta la disposición final de cenizas o residuos que se generan después de la quema. Es por eso por lo que en el trabajo se realizó una breve descripción de los subprocesos que se llevan a cabo y en qué área para poder comprender el funcionamiento de esta alternativa de obtener energía.

En las figuras 1 y 2 se muestra de manera general, en que partes está dividido el proceso de incineración de residuos sólidos, que mencionado antes se inicia desde que el residuo factible ingresa para ser incinerado, hasta la salida de cenizas o producto resultante de la incineración.

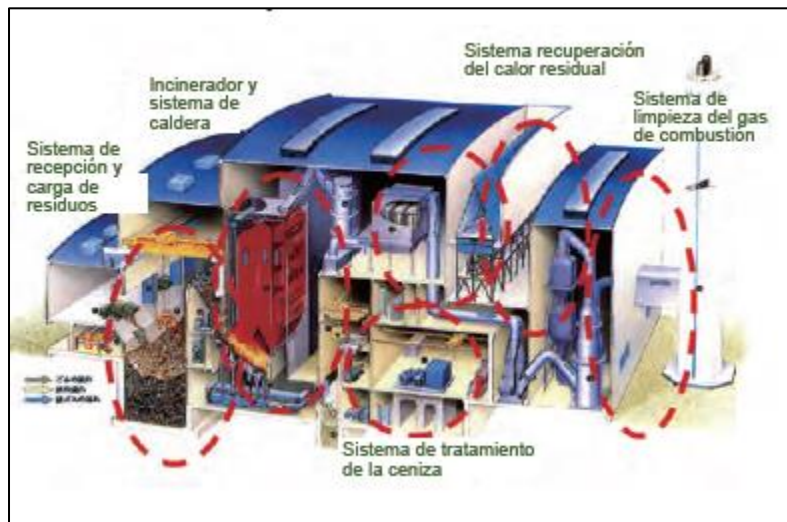


Figura 1 Descripción de la instalación de una planta incineradora de residuos sólidos. Fuente: (Zosen Corporation Hitachi, 2017)

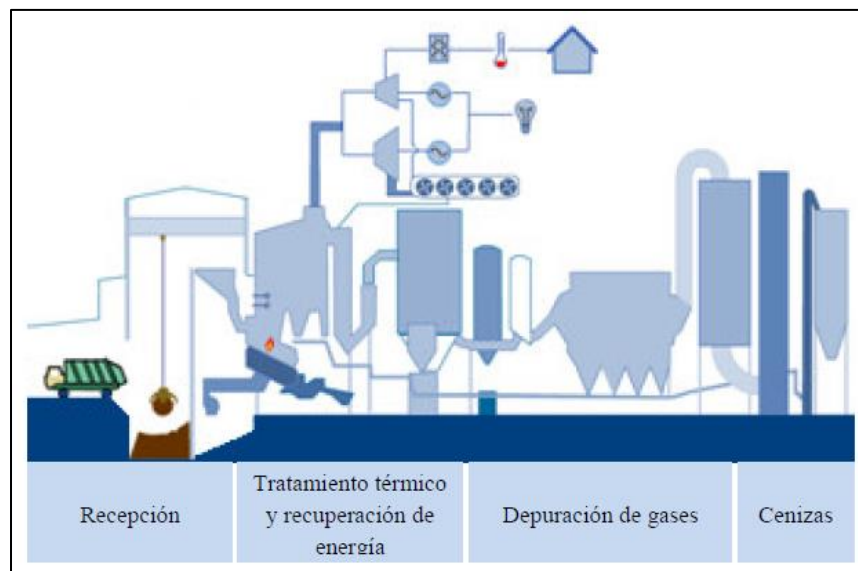


Figura 2 Esquema de una planta incineradora. Fuente: (Torre Torre, 2013)

En las figuras 1 y 2 se muestra la forma en la que es recibido el producto, que en este caso son los residuos, para luego ser tratados. Se evidencia que los subprocesos pueden definirse con nombres un poco variables, pero al final el propósito en cada uno de ellos es el mismo, por ejemplo, en la figura 2 toma el nombre de recepción y en la figura 1 toma el nombre de sistema de carga de residuos, en ambas imágenes está nombrado de diferente forma, pero su objetivo es el mismo, recolectar el residuo que se alimentará a la caldera para su combustión.

En efecto, el trabajo muestra un esquema general de cómo está constituida una planta de residuos sólidos, además de eso, se tuvo en cuenta el flujo de proceso que cumple el residuo una vez que es ingresado al lugar, pues este debe pasar por las estaciones o componentes que antes se mencionaban en las figuras 1 y 2. Luego de que se recibe el residuo factible para la incineración, pasa a la recámara donde se le ejecutara el primer proceso que es el de la quema, que se realiza en la caldera donde además de la ceniza, se genera aquel vapor esencial para producir la energía, a través de un sistema de extracción superior el cual se conecta con la turbina generadora de energía eléctrica. Las cenizas también son extraídas del lugar para luego realizar los distintos procesos de disposición final antes mencionados. Como se conoce que la quema de aquellos residuos produce gases de efecto invernadero, estos pueden reducir o eliminar su impacto a través de filtros, los cuales

están ubicados a un lado de la caldera, un poco apartados de la turbina de generación de energía eléctrica. Todo lo antes descrito se puede evidenciar en la figura 3, donde se muestra el proceso por el cual pasa el residuo para poder ser convertido en energía eléctrica.

La figura 3 describe también aquellos componentes que cumplen sus funciones dentro de la planta para que pueda ejecutarse el proceso de generación de energía.

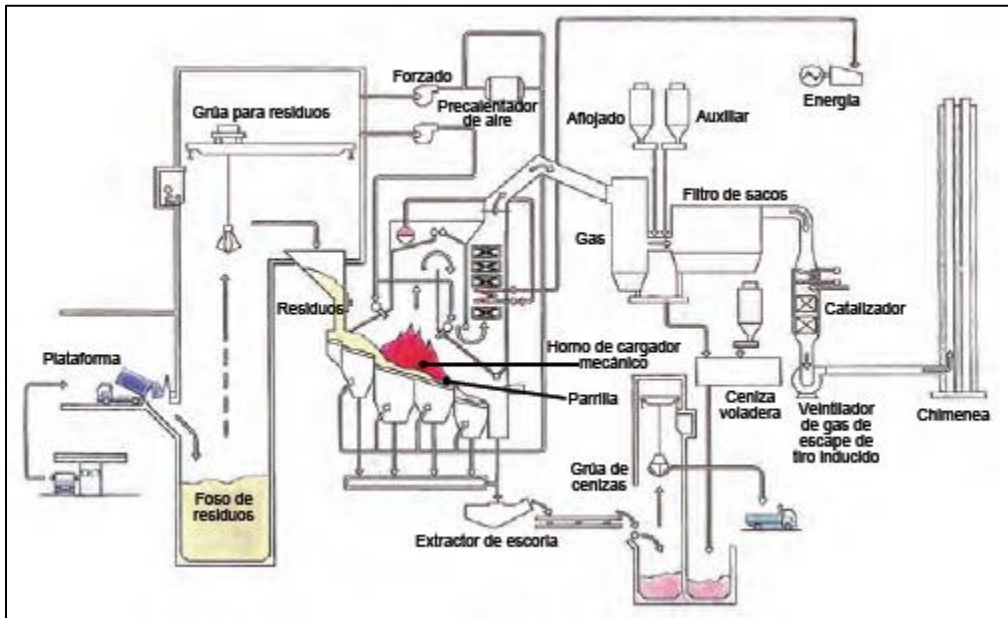


Figura 3 Flujo básico de la generación por incineración de residuos. Fuente: (Zosen Corporation Hitachi, 2017)

En primer lugar, se encuentra la plataforma, que es el lugar donde se acercan aquellos camiones destinados a realizar recorridos en la región de estudio y depositan el material factible. Luego se encuentra el foso de residuos que es donde se disponen aquellos residuos seleccionados para la incineración que luego son recogidos por la grúa mecánica controlada. Estos residuos proceden a ser incinerados en el horno de cargador mecánico o caldera, donde son puestos en una parrilla rotatoria que ayuda a la circulación de los residuos dentro del horno. Los gases generados por efectos de la incineración son redirigidos a una recámara de gases donde serán tratados por aquellos filtros destinados a reducir o eliminar su impacto hacia la atmosfera. El vapor generado es aquel que sirve como impulso a la turbina generadora de energía que se encuentra en un conducto antes de llegar a la cámara de gases.

Luego de que los gases cumplen el proceso de filtrado son enviados a un catalizador, que cumple las veces de regulador de emisiones que luego serán expulsadas por la chimenea. Algunas de las cenizas que se producen en la incineración tienen la característica de ser volátiles, es por eso por lo que luego de pasar por la cámara de gases, se cuenta con un conducto encargado de extraer dicha ceniza volátil y depositarla a través de un conducto a la zona donde el extractor de escoria deposita el resto de las cenizas, las cuales serán trasladadas a otro lugar para iniciar su proceso de disposición final.

3.5. COSTOS

Puesto que se conoce los componentes de una planta incineradora, es muy importante saber también los costos de aquellos componentes. Revisando la literatura, se pueden obtener un sin número de costos para la fabricación de plantas a nivel mundial como se muestra en la tabla 21, muchos de estos estudios sirvieron de base para estimar los costos del caso a tratar.

Costos	Referencia
<p>En este trabajo se presentan los costos de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costo operacional para base de rejilla: Va desde los \$16 hasta \$32 (USD) por tonelada de RSU. • Costo de inversión promedio para base de rejilla: Aquí se mencionan dos costos, el primero es el valor que se le otorga si la tecnología utilizada es importada, la cual toma un valor desde \$73.350 hasta \$81.500 (USD) por tonelada. El segundo costo es si se consigue la fabricación de la tecnología en la misma región (En el caso de estudio es China) que va desde los \$48.900 hasta \$57.050 (USD) por tonelada 	(Zhao et al., 2016)
<p>En este artículo se mencionan varios costos en los apartados de inversión y operación, debido a que los autores los tomaron referenciados de distintos informes, por ende, los costos se expresan de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costos de inversión: Estos pueden tomar valores como netos como 68.750.492 euros, 99.433.621 euros, 102.085.182 euros y 136.019.606 euros. • Costos de operación y mantenimiento: Los cuales poseen valores de 19.916.176 euros y 12.992.000 euros. 	(Mayer et al., 2020)
<p>Se consideran los costos de capacidad de la planta y de operación de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costo de capacidad: 2.18 USD por tonelada de RSU. • Costo de operación: 67 USD por tonelada de RSU. 	(Tan et al., 2015)
<p>Los autores exponen los costos de manera que son similares tanto para el capital como para los de operación, se muestran a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costo de capital: 0.2708 USD por tonelada de RSU. • Costo de operación: 0.2708 USD por tonelada de RSU. 	(Khan & Kabir, 2020)
<p>Se menciona que el coste total de la inversión nacional se estima entre unos 580 y 730 millones de euros, según las opciones técnicas. Los costes de inversión, por instalación, varían entre 0,04 euros y 25 euros o entre 0,01 euros y 2,3 euros por tonelada/hora. El coste medio de inversión, por instalación, se estima entre 5,2 y 6,7 millones de euros.</p>	(Autret et al., 2007)
<p>Aquí se menciona que las plantas de generación de energía implican una inversión de capital de aproximadamente de \$40,000 US por tonelada diaria de capacidad, junto con un costo total de la planta de \$3990 US/kW (kilovatio) y un costo de operación y mantenimiento fijo de \$116,9 US/kW-año.</p>	(Escamilla-García et al., 2020)

Tabla 21 Revisión bibliográfica de costos para la construcción de una planta incineradora de residuos sólidos. Fuente: Elaboración propia

Luego de revisar la literatura antes mencionada referente a los costos de inversión, se llegó a obtener información acerca de una planta similar, con las mismas funciones y tecnologías. Dicho estudio fue realizado para una planta de incineración situada México, el cual sirvió de mucha ayuda para el análisis de costos, pues se tuvieron en cuenta los insumos para la inversión inicial que da pie a la construcción de la planta. Aquellos insumos se pueden evidenciar en las tablas desde la 22 hasta la 27, donde se referencia el trabajo realizado por Bahena Paniagua, (2018) a la hora de seleccionar los insumos y sus costos.

Inversión Inicial del activo

INVERSIÓN FIJA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	MONTO TOTAL
Terreno	300000 m2	\$2,618197	\$785.459,10
Obra civil y servicios	1	\$ 209,482.87	\$ 209,482.87
Instalación mecánica	1	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00
Sistema eléctrico	1	\$ 131,536.39	\$ 131,536.39
Infraestructura	1	\$ 158,344.79	\$ 158,344.79
Estructura metálica	1	\$ 48,713,184.00	\$ 48,713,184.00
Sistema de tratamiento de agua	1	\$ 9,753.41	\$ 9,753.41
SUBTOTAL			\$ 50.057.760,56

Tabla 22 Costos fijos de inversión (USD). Fuente: (Bahena Paniagua, 2018)

Maquinaria y equipo para producción				INFLACION MONTO TOTAL		
				2019	2020	2021
MAQUINARIA Y EQUIPO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	MONTO TOTAL	1.80%	0.60%	1.70%
Sistema de agua vapor	1	\$ 46,650.12	\$ 46,650.12	\$47,489.82	\$47,774.76	\$48,586.93
Turboalternador	1	\$ 168,071.27	\$ 168,071.27	\$171,096.55	\$172,123.13	\$175,049.23
Sistema de cenizas y escoria	1	\$ 28,020.85	\$ 28,020.85	\$28,525.23	\$28,696.38	\$29,184.22
Instrumentación y control	1	\$ 97,426.37	\$ 97,426.37	\$99,180.04	\$99,775.12	\$101,471.30
Sistemas auxiliares	1	\$ 17,055.00	\$ 17,055.00	\$17,361.99	\$17,466.16	\$17,763.09
Tolva de alimentación de residuos	1	\$ 130,000.00	\$ 130,000.00	\$132,340.00	\$133,134.04	\$135,397.32
Horno incinerador	1	\$ 113,268.94	\$ 113,268.94	\$115,307.78	\$115,999.63	\$117,971.62
Caldera	1	\$ 129,111.50	\$ 129,111.50	\$131,435.51	\$132,224.12	\$134,471.93
Puente grúa y Pulpo	1	\$ 7,301.57	\$ 7,301.57	\$7,433.00	\$7,477.60	\$7,604.72
Bascula	1	\$ 1,212.43	\$ 1,212.43	\$1,234.25	\$1,241.66	\$1,262.77
Destrozador de elementos voluminosos	1	\$ 85,000.00	\$ 85,000.00	\$86,530.00	\$87,049.18	\$88,529.02
Chimenea	1	\$ 24,356.59	\$ 24,356.59	\$24,795.01	\$24,943.78	\$25,367.82
Celdas catalíticas	2	\$ 240,000.00	\$ 480,000.00	\$488,640.00	\$491,571.84	\$499,928.56
Tratamiento de gases	1	\$ 81,610.76	\$ 81,610.76	\$83,079.75	\$83,578.23	\$84,999.06
Foso de almacenamiento	1	\$ 13,000.00	\$ 13,000.00	\$13,234.00	\$13,313.40	\$13,539.73
Filtro de mangas	1	\$ 35,000.00	\$ 35,000.00	\$35,630.00	\$35,843.78	\$36,453.12
Aerocondensador	1	\$ 65,768.18	\$ 65,768.18	\$66,952.01	\$67,353.72	\$68,498.73
SUBTOTAL			\$ 1,522,853.58	TOTAL		\$1,586,079.17

Tabla 23 Costo de maquinaria y equipo (USD). Fuente: (Bahena Paniagua, 2018)

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	MONTO TOTAL	AÑO 1
Botas industriales	30	\$ 689.00	\$ 20,670.00	\$ 248,040.00
Guantes de carnaza	10	\$ 40.00	\$ 40.00	\$ 480.00
Overol	20	\$ 186.00	\$ 3,720.00	\$ 44,640.00
Lentes de seguridad	20	\$ 300.00	\$ 300.00	\$ 3,600.00
Cubrebocas con filtro	20	\$ 499.00	\$ 499.00	\$ 5,988.00
SUBTOTAL			\$ 302,748.00	

Tabla 24 Costo de Equipos de protección personal (USD). Fuente: (Bahena Paniagua, 2018)

EQUIPO DE OFICINA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	MONTO TOTAL
Escritorios	5	\$ 2,507.00	\$ 12,535.00
Sillas	8	\$ 450.00	\$ 3,600.00
Archivero	3	\$ 3,500.00	\$ 10,500.00
Equipo de computo	8	\$ 6,000.00	\$ 48,000.00
Impresora multifuncional	2	\$ 3,899.00	\$ 7,798.00
SUBTOTAL			\$ 82,433.00

Tabla 25 Costos de equipos de oficina (USD). Fuente: (Bahena Paniagua, 2018)

COSTOS VARIABLES

COSTOS VARIABLES	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	MONTO TOTAL	AÑO 1
Agua	1	\$ 3.68	\$ 3.68	\$ 44.16
Aditivos	1	\$ 150.00	\$ 150.00	\$ 1,800.00
Gasóleo (Diesel)	1	\$ 18.76	\$ 18.76	\$ 225.12
Materiales y artículos de limpieza	1	\$ 1,100.00	\$ 1,100.00	\$ 13,200.00
SUBTOTAL			\$ 1,272.44	\$ 15,269.28

Tabla 26 Costos variables (USD). Fuente: (Bahena Paniagua, 2018)

COSTOS VARIABLES	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	MONTO TOTAL	AÑO 1
Pala	3	\$ 370.00	\$ 1,110.00	\$ 13,320.00
Rastrillo	1	\$ 890.00	\$ 890.00	\$ 10,680.00
Carretilla	1	\$ 1,690.00	\$ 1,690.00	\$ 20,280.00
Pinzas de chofer	3	\$ 475.00	\$ 1,425.00	\$ 17,100.00
Llaves mixtas	1	\$ 470.00	\$ 470.00	\$ 5,640.00
Juego de desarmadores	1	\$ 131.00	\$ 131.00	\$ 1,572.00
Martillo de bola	1	\$ 194.00	\$ 194.00	\$ 2,328.00
Cinzel	1	\$ 279.00	\$ 279.00	\$ 3,348.00
Stilson (Llave tuberías)	1	\$ 206.00	\$ 206.00	\$ 2,472.00
Perico (Llave)	1	\$ 270.00	\$ 270.00	\$ 3,240.00
Grasa para chasis	20	\$ 900.00	\$ 900.00	\$ 10,800.00
Estopa	50	\$ 1,150.00	\$ 1,150.00	\$ 13,800.00
Caja de herramientas	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00	\$ 18,000.00
SUBTOTAL			\$ 10,215.00	\$ 122,580.00

Tabla 27 Costos de otras herramientas (USD). Fuente: (Bahena Paniagua, 2018)

Puesto que se conocen los insumos, se procedió a realizar un resumen de costos de inversión con el fin de conocer el monto total necesario para iniciar la construcción de la planta de incineración. Dicho resumen se ve en la tabla 28, donde están las diferentes secciones de costos, junto con su monto total.

ITEM	COSTO TOTAL INSUMO
INVERSION FIJA	\$ 50.057.760,56
MAQUINARIA Y EQUIPO	\$1,586,079.17
EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL	\$ 302,748.00
EQUIPO DE OFICINA	\$ 82,433.00
COSTOS VARIABLES	\$ 15,269.28
OTROS MATERIALES	\$ 122,580.00
COSTOS IMPREVISTOS (8%)	\$ 126,886.33
COSTO DE MANTENIMIENTO	\$ 91,668.91
COSTO TOTAL DE INVERSION	\$ 52.385.425,25

Tabla 28 Costo Total de inversión para la planta de incineración (USD). Fuente: Elaboración propia basada en (Bahena Paniagua, 2018)

Para este análisis se consideró prudente utilizar un porcentaje de costos para imprevistos del 8% sobre el total de maquinaria y equipos. Para determinar el costo mantenimiento se procede a tomar los porcentajes como se menciona en Agriculture an Rural Development Depertament (2005), de esta forma, la composición del costo de mantenimiento procede de tomar el 5% del costo de maquinaria y equipos y sumarlo con el 15% del costo de equipos de oficina.

Todos los costos antes mencionados sirven para conocer con cuanto capital inicial estimado se debe contar para iniciar un proyecto de esta manera, sin embargo, a la hora de poner en funcionamiento la planta, también se poseen otros costos. Uno de ellos es el costo en la mano de obra, el cual se tuvo en cuenta para la elaboración de la tabla 29, donde se indican los cargos dentro de la planta, junto con sus salarios los cuales contienen insumos por parafiscales y recargos, donde N representa Recargo Nocturno, F significa Recargo Festivo y FN significa Recargo Festivo Nocturno. Al final se obtuvo en total un costo de mano de obra de 31480.66 USD

CARGO	MODALIDAD	CANTIDAD REAL	SALARIO BASE	PARAFISCALES	RECARGO PROMEDIO (N/F/FN)	TOTAL
Jefe de Turno	1 Por Turno	3	\$ 937.66	\$ 225.04	\$ 35.983333	\$ 3,596.05
Analista de Calidad	1 Por Turno	3	\$ 890.50	\$ 213.72	\$ 35.983333	\$ 3,420.60
Basculista	1 Por Turno	3	\$ 374.95	\$ 89.99	\$ 35.983333	\$ 1,502.75
Intendente	2 Por Turno día / 1 Turno noche	5	\$ 343.70	\$ 82.49	\$ 35.983333	\$ 2,310.86
Vigilante	3 Por turno	9	\$ 468.68	\$ 112.48	\$ 35.983333	\$ 5,554.35
Jefe de Mantenimiento	1 Por Turno	3	\$ 937.37	\$ 224.97	\$ 35.983333	\$ 3,594.95
Montador Mecanico	1 Por Turno	3	\$ 781.14	\$ 187.47	\$ 35.983333	\$ 3,013.78
Montador Electrico	1 Por Turno	3	\$ 781.14	\$ 187.47	\$ 35.983333	\$ 3,013.78
Encargado de Almacen	1 Por Turno	3	\$ 421.81	\$ 101.24	\$ 35.983333	\$ 1,677.10
Gerente	Horario Administrativo	1	\$ 1,562.28	\$ 374.95	\$ 35.983333	\$ 1,973.21
Director Tecnico	Horario Administrativo	1	\$ 990.48	\$ 237.72	\$ 35.983333	\$ 1,264.18
Secretaria	Horario Administrativo	1	\$ 421.81	\$ 101.24	\$ 35.983333	\$ 559.03
TOTAL		38	\$ 8,911.52	\$ 2,138.77	\$ 431.800000	\$ 31,480.66
TOTAL MANO DE OBRA ANUAL						\$ 377,767.91

Tabla 29 Costo de Mano de obra para la planta de incineración (USD). Fuente: Elaboración propia basado en (Bahena Paniagua, 2018)

3.6. ENERGÍA PRODUCIDA

Al realizar este análisis se consideró utilizar un porcentaje de capacidad de procesamiento de residuos del 61.15% para los residuos generados por la ciudad que son más factibles para la incineración, del cual se obtiene una capacidad de procesamiento aproximada de 1100 toneladas de residuo por día. La cantidad de residuo a tratar por año se puede ver en la tabla 30.

Tipo de Residuo	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Orgánico	216953.3311	219067.9024	229567.7498	236113.332	242488.3354	249035.5999	255759.4992	262665.08
Papel	10567.70134	10670.70117	11182.14412	11500.97655	11811.50016	12130.41453	12457.93271	12794.30052
Cartón	12381.56052	12502.23943	13101.46736	13475.02476	13838.84721	14212.50061	14596.23459	14990.33717
Resinas Plástico	39826.03861	40214.20964	42141.66253	43343.23252	44513.48942	45715.36821	46949.67179	48217.32657
Textiles	7807.480837	7883.577732	8261.434833	8496.990137	8726.406836	8962.022678	9203.995063	9452.505605
Total	287536.1124	290338.6304	304254.4586	312929.5559	321378.579	330055.9059	338967.3333	348119.5499

Tabla 30 Proyección de la cantidad de residuos sólidos factibles para incineración procesados considerando el 61.15% de capacidad, periodo 2015 - 2022 (Ton/año). Fuente: Elaboración propia basado en (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Luego de tener las cantidades reales con las que se van a trabajar, se procedió a convertir las cantidades de residuo solido factible de toneladas a kilogramos, con el fin de que fuera compatible con las unidades que se presentan en la tabla 18 en la sección de poder calorífico inferior con unidades de Kilovatio-hora/kilogramo (kWh/Kg). De esta forma, las cantidades en kilogramo son mostradas en la tabla 31.

Tipo de Residuo	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Orgánico	216953331.1	219067902.4	229567749.8	236113332	242488335.4	249035599.9	255759499.2	262665080
Papel	10567701.34	10670701.17	11182144.12	11500976.55	11811500.16	12130414.53	12457932.71	12794300.52
Cartón	12381560.52	12502239.43	13101467.36	13475024.76	13838847.21	14212500.61	14596234.59	14990337.17
Resinas Plástico	39826038.61	40214209.64	42141662.53	43343232.52	44513489.42	45715368.21	46949671.79	48217326.57
Textiles	7807480.837	7883577.732	8261434.833	8496990.137	8726406.836	8962022.678	9203995.063	9452505.605
Total	287536112.4	290338630.4	304254458.6	312929555.9	321378579	330055905.9	338967333.3	348119549.9

Tabla 31 Proyección de la cantidad de residuos sólidos factibles para incineración procesados considerando el 61.15% de capacidad, periodo 2015 - 2022 (Kg/año). Fuente: Elaboración propia basado en (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Luego de que se tuvieran todas las toneladas en kilogramos, se pudo calcular el poder calorífico aproximado de los residuos sólidos factibles, dando como resultado lo que se puede evidenciar en la tabla 32. La conversión se realizó tomando los datos de la tabla 31 y multiplicándolo por el poder calorífico inferior de cada tipo de residuo, de esta manera, los residuos orgánicos obtienen un 1.53 (kWh/Kg), el papel con un 5.28 (kWh/Kg) al igual que el cartón, las resinas de plástico poseen un 9.09 (kWh/Kg) y los textiles un 5.13 (kWh/Kg) aproximadamente.

Tipo de Residuo	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Orgánico	331938596.6	335173890.7	351238657.1	361253397.9	371007153.2	381024467.8	391312033.7	401877572.4
Papel	55797463.05	56341302.19	59041720.94	60725156.18	62364720.86	64048588.74	65777884.72	67553906.73
Cartón	65374639.54	66011824.21	69175747.67	71148130.75	73069113.24	75042003.23	77068118.66	79148980.27
Resinas Plástico	362018691	365547165.6	383067712.4	393989983.6	404627618.8	415552697	426772516.5	438295498.5
Textiles	40052376.69	40442753.76	42381160.69	43589559.4	44766467.07	45975176.34	47216494.67	48491353.76
Total	855181766.9	863516936.5	904904998.9	930706227.8	955835073.2	981642933.1	1008147048	1035367312

Tabla 32 Proyección de la energía generada considerando el 61.15% de capacidad de procesamiento de los residuos sólidos factibles para la incineración, periodo 2015 - 2022 (kWh). Fuente: Elaboración propia (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Con el motivo de que el análisis se apegara más a la realidad, se procedió a consultar los porcentajes de eficiencia que se obtiene al ejecutar este tipo de practica para la generación de energía. Maghmoumi et al., (2020) mencionan que la eficiencia energética proviene de la turbina que se utilice pues afirman que la tecnología en su caso alcanza un porcentaje aproximado de eficiencia del 28% donde el 15% es consumida por la propia planta de generación obteniendo una eficiencia de energía neta del 21%. En el caso de Escamilla-García et al., (2020) indican que las eficiencias de la recuperación de energía mediante la incineración se estiman en un 30% aproximadamente. Para Mayer et al., (2020) la eficiencia de generación eléctrica bruta varía aproximadamente entre el 16% y el 28.5%. Finalmente, afirma Zhao et al., en (2016) que las eficiencias en torno a la generación de energía por este método oscilan entre el 17% y 27% aproximadamente.

Debido a que las eficiencias en la generación de energía son variadas, para el análisis se tomaron dos casos. En el primer caso es el peor, donde se muestra el menor porcentaje de eficiencia posible, el cual se tomó como el 10%. En el segundo caso que es el mejor, se consideró una eficiencia del 17%. Los resultados con respecto a la energía generada mediante las eficiencias estimadas de procesamiento para los residuos factibles se pueden evidenciar en la tabla 33 y tabla 34.

Tipo de Residuo	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Orgánico	33193859.66	33517389.07	35123865.71	36125339.79	37100715.32	38102446.78	39131203.37	40187757.24
Papel	5579746.305	5634130.219	5904172.094	6072515.618	6236472.086	6404858.874	6577788.472	6755390.673
Cartón	6537463.954	6601182.421	6917574.767	7114813.075	7306911.324	7504200.323	7706811.866	7914898.027
Resinas Plástico	36201869.1	36554716.56	38306771.24	39398998.36	40462761.88	41555269.7	42677251.65	43829549.85
Textiles	4005237.669	4044275.376	4238116.069	4358955.94	4476646.707	4597517.634	4721649.467	4849135.376
Total	85518176.69	86351693.65	90490499.89	93070622.78	95583507.32	98164293.31	100814704.8	103536731.2

Tabla 33 Proyección de la energía generada considerando una eficiencia de generación del 10%, periodo 2015 - 2022 (kWh). Fuente: Elaboración propia basado en (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

Tipo de Residuo	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Orgánico	56429561.43	56979561.42	59710571.71	61413077.65	63071216.04	64774159.53	66523045.73	68319187.31
Papel	9485568.718	9578021.372	10037092.56	10323276.55	10602002.55	10888260.09	11182240.4	11484164.14
Cartón	11113688.72	11222010.12	11759877.1	12095182.23	12421749.25	12757140.55	13101580.17	13455326.65
Resinas Plástico	61543177.47	62143018.16	65121511.11	66978297.21	68786695.2	70643958.49	72551327.81	74510234.75
Textiles	6808904.038	6875268.14	7204797.318	7410225.098	7610299.402	7815779.978	8026804.094	8243530.138
Total	145380900.4	146797879.2	153833849.8	158220058.7	162491962.4	166879298.6	171384998.2	176012443

Tabla 34 Proyección de la energía generada considerando una eficiencia de generación del 17%, periodo 2015 - 2022 (kWh). Fuente: Elaboración propia basado en (Alcaldía de Santiago de Cali, 2020)

A partir de las proyecciones de los dos casos, se realizó la comparación con la empresa TERMOEMCALI S.A E.S.P. Esta empresa ubicada en la vereda Piles, corregimiento de La Dolores en el municipio de Palmira y se dedica a la generación de energía eléctrica a partir de gas natural y alterno ACPM utilizada como respaldo en periodos de escasez hídrica. Según la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales en su resolución 01600 de 2016 realizada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013) indica que la capacidad de generación de energía con la que cuenta dicha planta es de 235 MW (Megavatios), equivalentes a 235000 kW (Kilovatios) que según la revista Semana en (2015), el costo por producir energía en Colombia promediaba los \$140 kWh para las termoeléctricas.

3.7. INGRESOS POR VENTA DE ENERGÍA

El costo por producir energía ha aumentado al pasar el tiempo. Según el Observatorio de Minas y Energía de Colombia (s. f.), en el Valle del Cauca se obtuvo en el último mes de 2016 un precio de \$463.9 kWh (COP) para la energía, luego en 2017 el precio asciende a \$484.3 kWh (COP). Para el 2018 el precio de la energía alcanza un valor de \$517.7 kWh (COP) y finalmente para el 2019, se obtuvo un valor de \$532 kWh (COP). Actualmente, se menciona que el precio promedio para la energía en el Valle del Cauca se encuentra aproximadamente en unos \$535.64 kWh (COP).

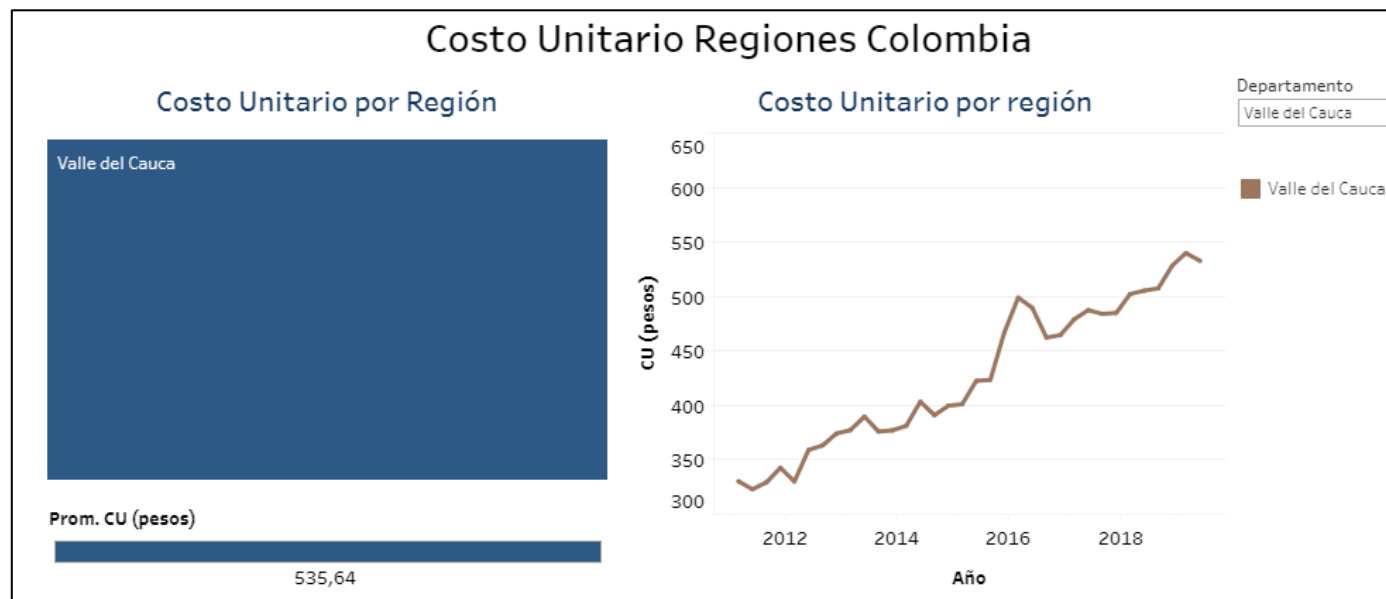


Figura 4 Comportamiento anual del costo unitario de la energía en el Valle del Cauca. Fuente: (Observatorio de Minas y Energía, s. f.)

Con motivo de conocer cuanto en ingreso produce la planta, tomamos como referencia las tablas 33 y 34 en las que se hayo la eficiencia tanto en el mejor caso, como en el peor, de esta forma pudimos estimar la cantidad de ingreso que genera la planta al vender energía a la red eléctrica, considerando un precio de venta de 0.15 USD kWh. Las tablas 35 y 36 reflejan lo antes mencionado, siendo el peor caso en la tabla 35, la venta de la energía con una eficiencia del 10% y el mejor caso en la tabla 36 con una eficiencia del 17%. Cabe resaltar que, para este tipo de análisis, se consideró que la planta consume aproximadamente un 15% de la energía producida, lo que hace que la energía dirigida a la red eléctrica disminuya.

Tipo de Residuo	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Orgánico	\$ 4,979,079	\$ 5,027,608	\$ 5,268,580	\$ 5,418,801	\$ 5,565,107	\$ 5,715,367	\$ 5,869,681	\$ 6,028,164
Papel	\$ 836,962	\$ 845,120	\$ 885,626	\$ 910,877	\$ 935,471	\$ 960,729	\$ 986,668	\$ 1,013,309
Cartón	\$ 980,620	\$ 990,177	\$ 1,037,636	\$ 1,067,222	\$ 1,096,037	\$ 1,125,630	\$ 1,156,022	\$ 1,187,235
Resinas Plástico	\$ 5,430,280	\$ 5,483,207	\$ 5,746,016	\$ 5,909,850	\$ 6,069,414	\$ 6,233,290	\$ 6,401,588	\$ 6,574,432
Textiles	\$ 600,786	\$ 606,641	\$ 635,717	\$ 653,843	\$ 671,497	\$ 689,628	\$ 708,247	\$ 727,370
Total	\$ 12,827,727	\$ 12,952,754	\$ 13,573,575	\$ 13,960,593	\$ 14,337,526	\$ 14,724,644	\$ 15,122,206	\$ 15,530,510
Total Con Consumo Planta (15%)	\$ 10,903,568	\$ 11,009,841	\$ 11,537,539	\$ 11,866,504	\$ 12,186,897	\$ 12,515,947	\$ 12,853,875	\$ 13,200,933

Tabla 35 Ingreso aproximado (USD) por venta de energía eléctrica considerando una eficiencia del 10%. Fuente: Elaboración propia

Tipo de Residuo	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Orgánico	\$ 8,464,434	\$ 8,546,934	\$ 8,956,586	\$ 9,211,962	\$ 9,460,682	\$ 9,716,124	\$ 9,978,457	\$ 10,247,878
Papel	\$ 1,422,835	\$ 1,436,703	\$ 1,505,564	\$ 1,548,491	\$ 1,590,300	\$ 1,633,239	\$ 1,677,336	\$ 1,722,625
Cartón	\$ 1,667,053	\$ 1,683,302	\$ 1,763,982	\$ 1,814,277	\$ 1,863,262	\$ 1,913,571	\$ 1,965,237	\$ 2,018,299
Resinas Plástico	\$ 9,231,477	\$ 9,321,453	\$ 9,768,227	\$ 10,046,745	\$ 10,318,004	\$ 10,596,594	\$ 10,882,699	\$ 11,176,535
Textiles	\$ 1,021,336	\$ 1,031,290	\$ 1,080,720	\$ 1,111,534	\$ 1,141,545	\$ 1,172,367	\$ 1,204,021	\$ 1,236,530
Total	\$ 21,807,135	\$ 22,019,682	\$ 23,075,077	\$ 23,733,009	\$ 24,373,794	\$ 25,031,895	\$ 25,707,750	\$ 26,401,866
Total Con Consumo Planta (15%)	\$ 18,536,065	\$ 18,716,730	\$ 19,613,816	\$ 20,173,057	\$ 20,717,725	\$ 21,277,111	\$ 21,851,587	\$ 22,441,586

Tabla 36 Ingreso aproximado (USD) por venta de energía eléctrica considerando una eficiencia del 17%. Fuente: Elaboración propia

3.8. DISTRIBUCIÓN DEL LA PLANTA DE INCINERACIÓN

En este apartado se realizó un bosquejo sobre cómo debería estar distribuida la planta según las funciones que se cumplen dentro de la misma. Realizar una buena distribución muy importante, porque como lo indica (Cárdenas Moraga, 2017), ayuda a determinar la mejor disposición de los elementos necesarios para llevar a cabo las actividades dentro de la organización, de forma que ayuden a alcanzar los objetivos establecidos de la mejor forma posible. Mencionan también que para tener una buena distribución de la planta se debe tener en cuenta el espacio requerido para cada procedimiento o actividad productiva junto con el espacio para las actividades de apoyo, así como también el espacio de circulación de materiales, personas e información.

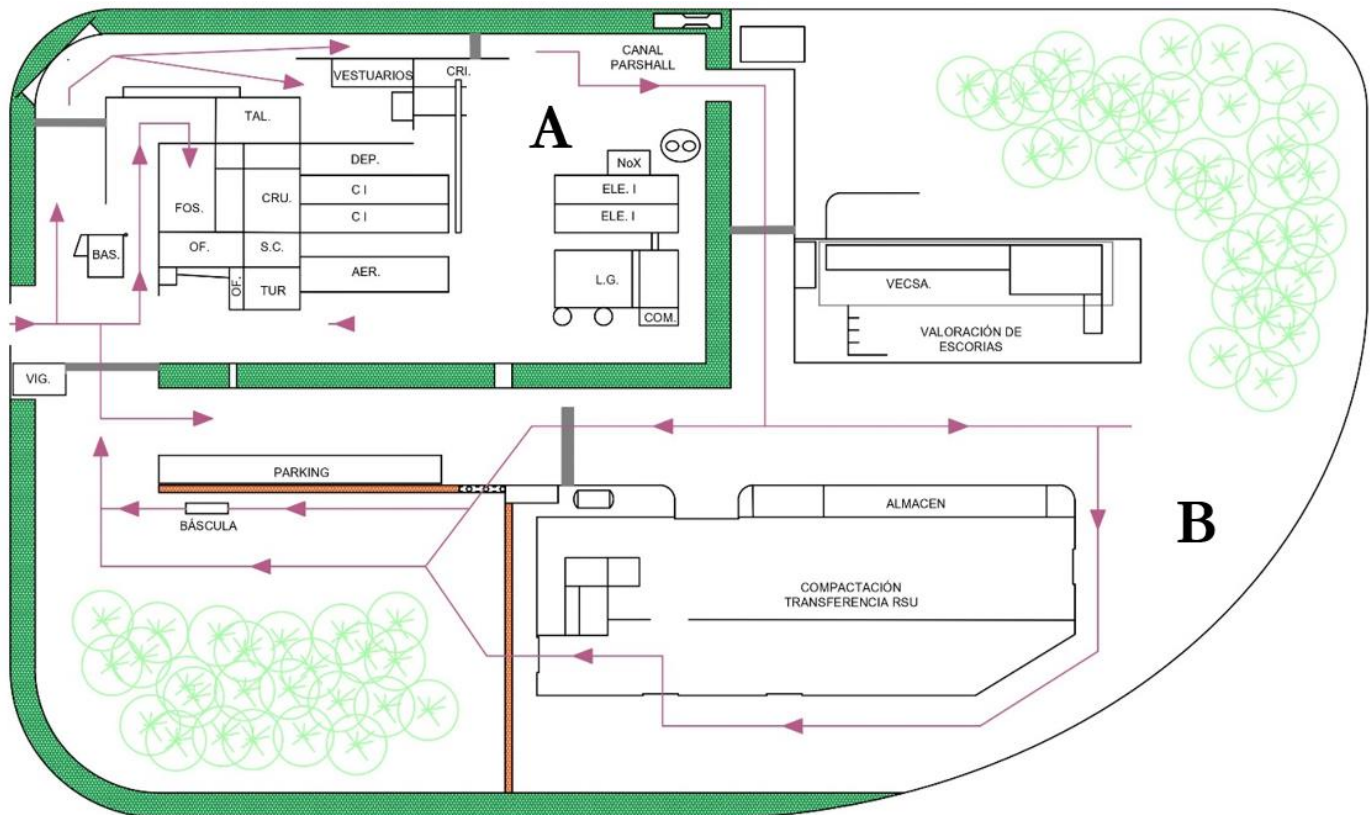


Figura 5 Distribución de la planta incineradora de RSU. Fuente: Elaboración propia basado en (Bahena Paniagua, 2018)

En la figura 5 se puede observar la distribución de la planta de incineración RSU, por medio de las indicaciones de flechas se puede analizar el flujo de proceso comenzando por la llegada de RSU a la planta y terminando por un lado con la generación de energía eléctrica por medio de la turbina de vapor y por la generación de escorias después de la incineración. En la sección A están los procesos de incineración de RSU comenzando con la llegada a la báscula y luego al foso. En la zona B están los procesos relacionados con el tratamiento de la escoria resultante del proceso de incineración, se puede identificar la valoración de las escorias y la compactación y transferencia RSU para terminar con un pesaje de ese desperdicio para una disposición final adecuada.

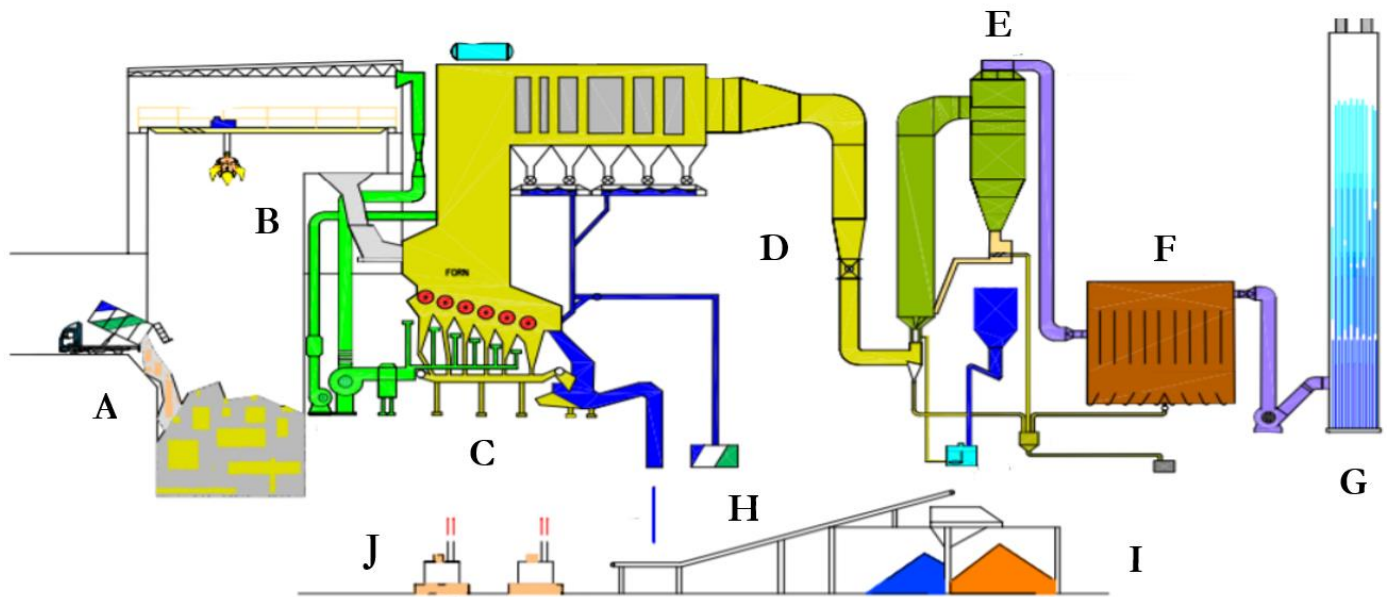


Figura 6 Bosquejo planta incineradora de RSU. Fuente: Elaboración propia basado en (Bahena Paniagua, 2018)

Teniendo en cuenta la distribución de planta se realizó un bosquejo general de la planta de incineración de RSU. Para mayor facilidad de interpretación se agruparon los procesos con letras como se observa a continuación:

- A:** Proceso de llegada de RSU a la planta de incineración
- B:** Proceso de foso RSU y grúa
- C:** Proceso de incineración RSU (Caldera y ventiladores)
- D:** Paso de gases de combustión
- E:** Proceso de generación de energía eléctrica (Turbina de vapor)
- F:** Proceso de limpieza de gases de combustión (Filtros de mangas)
- G:** Proceso de expulsión de gases por medio de chimenea
- H:** Proceso de extracción de escorias
- I:** Proceso de tratamiento de escorias
- J:** Centrales hidráulica alimentador y extractor

Este bosquejo se logró gracias a los análisis anteriormente mencionados sobre una buena distribución de planta, además de tener en cuenta las investigaciones realizadas a través de la elaboración del trabajo. Una investigación que fue clave para la realización del bosquejo y distribución de la planta fue acerca de la planta de incineración en San Andrés y Providencia. En Colombia, existe ya una planta dedicada a la incineración de residuos sólidos urbanos. Dicha planta está ubicada en la isla de San Andrés. Con la intención de reflejar como sería gráficamente una buena distribución de la planta, se muestran en la figura 5 y 6 la forma en la que la empresa Sociedad Productora de Energía de San Andrés y Providencia S.A. E.S.P. (SOPESA S.A. E.S.P.) posee las secciones de su maquinaria junto con un modelo 3D donde se representa de mejor manera la ubicación de los equipos.

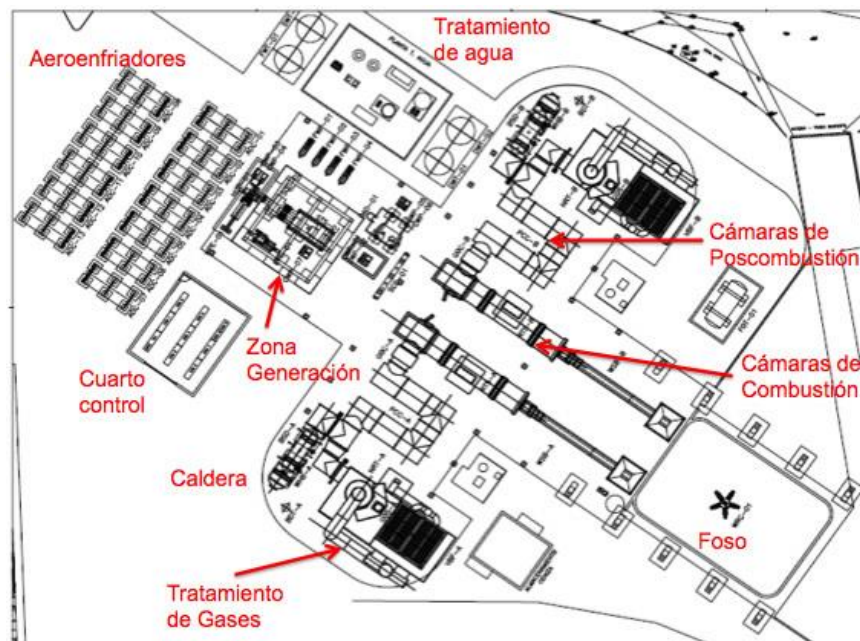


Figura 7 Distribución de la planta de incineración de RSU SOPESA S.A. E.S.P. Fuente: (Reyes Hernández & Castillo Forero, 2017)

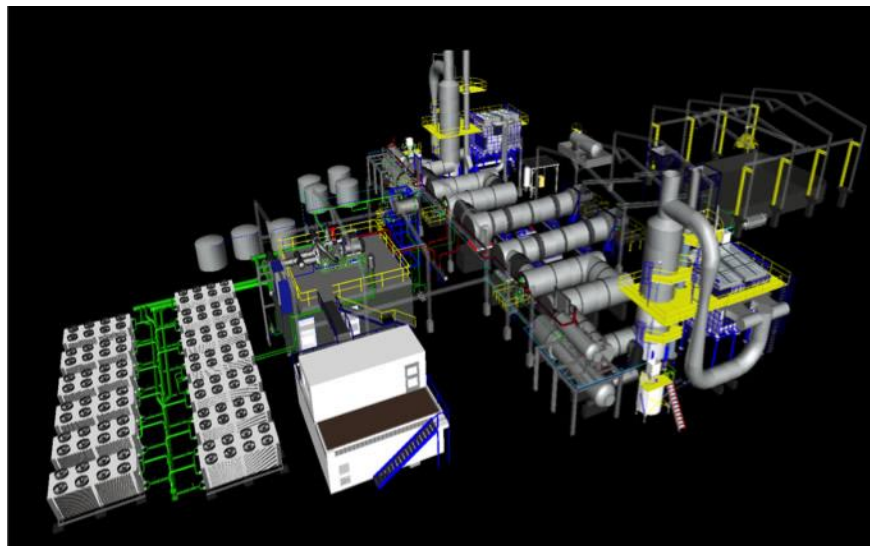


Figura 8 Modelo 3D de la planta de incineración de RSU SOPESA S.A. E.S.P. Fuente: (Reyes Hernández & Castillo Forero, 2017)

3.9. UBICACIÓN

Dentro de los criterios de selección de la ubicación óptima para la instalación de la planta de incineración de RSU en Cali fueron: Fuente hídrica potencial, Vías de acceso y lejanía del sector poblado.

Los procesos realizados dentro de la planta pueden de alguna forma afectar a la población que habita cerca al lugar, por tal motivo se consideró determinar una ubicación que estuviera alejada de la comunidad. En la figura 5 se muestra las coordenadas en las que se sitúa el posible lugar de instalación de la planta. Navarro es un corregimiento ubicado en el suroriente de la ciudad de Cali donde limita al norte y al occidente con el área urbana de Cali, al oriente con el municipio de Candelaria y al sur con el corregimiento El Hormiguero. En las funciones de la planta está la de utilizar el recurso hídrico al momento de generar vapor, por esta razón se consideró ubicar el sitio cerca de una fuente de obtención de agua, como lo es el Rio Cauca.

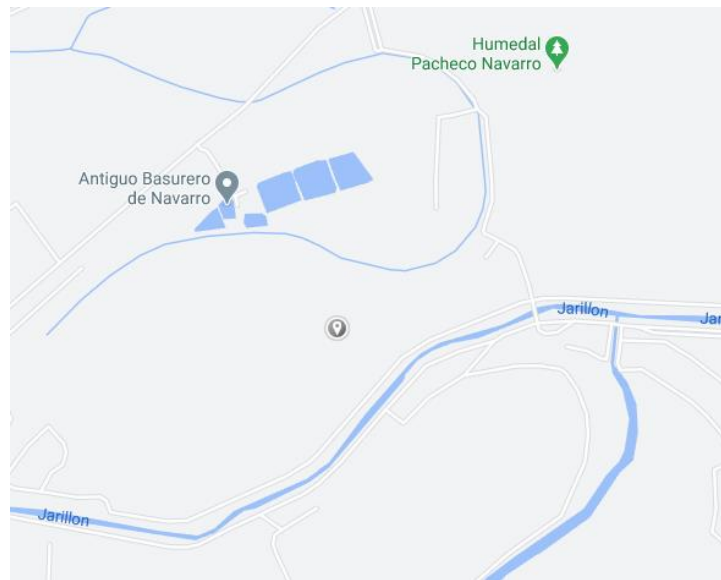


Figura 9 Ubicación de la planta incineradora de RSU con recuperación energética, Coordenadas (3.377910, -76.484768). Fuente: Aplicación Google Maps

Además de seleccionar geográficamente cual es la mejor ubicación para la planta, también se debe tener en cuenta los principios de la ley 12/2000 que menciona Máñez Amutio, (2019) las cuales son, protección de las zonas de interés medio ambiental, suelos geológicamente aptos, condiciones de transporte y planeamiento urbanístico.

3.10. RETORNO DE LA INVERSIÓN

Debido a que para este momento del análisis ya se conocían los costos a cabalidad y las estimaciones en los ingresos por energía producida, se realizaron los cálculos para estimar el tiempo en el que la inversión inicial retornaría. Como se hizo el análisis en dos situaciones, una buena y una mala, también se procedió a realizar de igual forma el retorno de la inversión, dejando plasmado en la tabla 38 el tiempo en el que se retorna la inversión en el peor de los casos y en la tabla 39 el retorno de la inversión en el mejor de los casos.

AÑO	COSTO	INGRESO	DIFERENCIA	ACUMULADO
1	-\$ 52.293.756,34	\$ 12.515.947	-\$ 39.777.808,94	-\$ 39.777.808,94
2	-\$ 40.247.245,76	\$ 12.515.947	-\$ 27.731.298,36	-\$ 27.731.298,36
3	-\$ 28.200.735,18	\$ 12.515.947	-\$ 15.684.787,78	-\$ 15.684.787,78
4	-\$ 16.154.224,60	\$ 12.515.947	-\$ 3.638.277,20	-\$ 3.638.277,20
5	-\$ 4.107.714,02	\$ 12.515.947	\$ 8.408.233,38	\$ 8.408.233,38
6	\$ 7.938.796,56	\$ 12.515.947	\$ 20.454.743,96	\$ 20.454.743,96
7	\$ 19.985.307,14	\$ 12.515.947	\$ 32.501.254,54	\$ 32.501.254,54

Tabla 37 Payback de la inversión inicial de la planta incineradora con eficiencia energética del 10%. Fuente: Elaboración propia

AÑO	COSTO	INGRESO	DIFERENCIA	ACUMULADO
1	-\$52.293.756,34	\$ 21.277.111	-\$ 31.016.645,76	-\$ 31.016.645,76
2	-\$ 31.137.498,89	\$ 21.277.111	-\$ 9.860.388,31	-\$ 9.860.388,31
3	-\$ 10.053.528,52	\$ 21.277.111	\$ 11.223.582,06	\$ 11.223.582,06
4	\$ 11.114.150,06	\$ 21.277.111	\$ 32.391.260,64	\$ 32.391.260,64
5	\$ 32.164.194,41	\$ 21.277.111	\$ 53.441.304,98	\$ 53.441.304,98

Tabla 38 Payback de la inversión inicial de la planta incineradora con eficiencia energética del 17%. Fuente: Elaboración propia

En los dos casos se consideró que en el primer año no se tiene en cuenta el costo de mantenimiento por la razón de que en esa instancia recién se trabaja la construcción de la planta, pero si se considera a partir del año 2 en adelante junto con los costos por mano de obra. En el caso donde se posee la eficiencia más baja se obtiene un periodo de payback aproximadamente de 5 años a diferencia del caso donde la eficiencia es mejor, que se obtiene el payback en un menor tiempo, aproximadamente de 3 años.

3.11. CANTIDAD DE CENIZA PRODUCIDA

Si bien es cierto, incinerar los RSU puede ayudar a disminuir las cantidades, pero también es causante de generar otros residuos. Según Sánchez Toloza, (2012) la incineración puede llegar a reducir hasta un 70% la acumulación de residuos, sin embargo, a partir de dicha operación, se produce ceniza de fondo como residuo. En la tabla 39, se plantearon los porcentajes promedio de cenizas obtenidos por el tipo de desecho incinerado a partir del trabajo realizado por Poletto & Da Silva, (2009).

Componente	Ceniza
Residuo de Comida	1.50%
Papel	4.70%
Plástico	9.80%
Textiles	2.20%
Goma	9.80%
Madera	3.60%

Tabla 39 Porcentaje de ceniza por tipo de RSU. Fuente: Elaboración propia basada en (Poletto & Da Silva, 2009)

A partir de la tabla 39, se pudo realizar la estimación de las cantidades en kilogramos de las cenizas que se obtienen luego de efectuar el proceso de incineración. En la tabla 40 aparece el cálculo del total de ceniza producida por tipo de residuo como efecto de la incineración. En este se consideró tomar el porcentaje de ceniza del cartón con un 5% puesto que no aparece mencionado en la referencia, pero se conoce que tiene igual origen de fabricación que el papel.

Tipo de residuo	Porcentaje de ceniza	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Orgánico	1.5%	3254299.97	3286018.54	3443516.25	3541699.98	3637325.03	3735534	3836392.49	3939976.2
Papel	4.7%	496681.963	501522.955	525560.774	540545.898	555140.508	570129.483	585522.837	601332.124
Cartón	5.0%	619078.026	625111.972	655073.368	673751.238	691942.36	710625.031	729811.73	749516.859
Resinas Plástico	9.8%	3902951.78	3940992.54	4129882.93	4247636.79	4362321.96	4480106.08	4601067.83	4725298
Textiles	2.2%	171764.578	173438.71	181751.566	186933.783	191980.95	197164.499	202487.891	207955.123
Total		8444776.32	8527084.72	8935784.88	9190567.69	9438710.81	9693559.1	9955282.78	10224078.3

Tabla 40 Cantidad de ceniza producida por tipo de residuo (Kg). Fuente: Elaboración propia

3.12. GASES Y COMPONENTES

En la incineración, luego que se produce el vapor que va dirigido al turbo generador para producir energía, también se producen gases y otros componentes. Dichos gases deben pasar por el sistema de limpieza de emisiones para reducir su efecto en la atmosfera, debido a que tienen elementos nocivos. En el trabajo realizado por Vergini et al., (2018) donde se le realiza un análisis a una planta de incineración controlada de RSU con valoración energética, se poseen datos sobre las cantidades de gases y componentes extraídos por tonelada de residuo en una hora de trabajo del residuo incinerado, dicha información se tiene plasmada en la tabla 41.

Componente	Porcentaje
CO ₂ (Dióxido de carbono)	30%
CO (Monóxido de carbono)	6%
HCl (Ácido clorhídrico)	3%
HF (Fluoruro de hidrógeno)	3%
SO ₂ (Dióxido de azufre)	6%
Nox (Óxidos de nitrógeno)	5%
H ₂ O (Agua)	40%
Hg (Mercurio)	2%
Ni (Níquel)	0.50%
Mn (Manganeso)	0.50%
Pb (Plomo)	0.40%
Cu (Cobre)	0.50%
Cr (Cromo)	0.40%
Cd (Cadmio)	0.50%
As (Arsénico)	0.70%
Co (Óxido de carbono)	0.20%
V (Vanadio)	0.30%
Al (Aluminio)	0.60%
Dioxinas	0.20%
Furanos	0.20%

Tabla 41 Porcentaje de componentes extraídos por el sistema de limpieza de gases. Fuente: (Vergini et al., 2018)

Aplicando los porcentajes antes mencionados al caso a tratar, se realizaron los cálculos para conocer cuanta cantidad de gas por tonelada de residuo tratado en una hora de trabajo se podría obtener. Para realizar ese cálculo, se tuvo en cuenta el total de toneladas por hora obtenidas en el año 2020 por tipo de residuo, el cual se puede evidenciar en la tabla 42. Finalmente se puede obtener la cantidad de gas producido en una hora de trabajo por tipo de componente como se muestra en la tabla 43.

Tipo de Residuo	Año 2020
Orgánico	34.5882778
Papel	1.6847798
Cartón	1.97395842
Resinas Plástico	6.3493567
Textiles	1.24472537
Total	45.841098

Tabla 42 Tonelada de residuos producida por hora del año 2020. Fuente: Elaboración propia

Componente	Toneladas/hora del componente
CO2 (Dióxido de carbono)	13.75
CO (Monóxido de carbono)	2.75
HCl (Ácido clorhídrico)	1.38
HF (Fluoruro de hidrógeno)	1.38
SO2 (Dióxido de azufre)	2.75
Nox (Óxidos de nitrógeno)	2.29
H2O (Agua)	18.34
Hg (Mercurio)	0.92
Ni (Níquel)	0.23
Mn (Manganeso)	0.23
Pb (Plomo)	0.18
Cu (Cobre)	0.23
Cr (Cromo)	0.18
Cd (Cadmio)	0.23
As (Arsénico)	0.32
Co (Óxido de carbono)	0.09
V (Vanadio)	0.14
Al (Aluminio)	0.28
Dioxinas	0.09
Furanos	0.09

Tabla 43 Cantidad de componente extraído por tonelada de residuo (Tonelada/hora). Fuente: Elaboración propia

3.13. NORMATIVA

Debido a que el proceso de incineración de residuos además de generar energía, también resulta ser un generador de emisiones y partículas que son nocivas a la salud si no se controlan adecuadamente, es por eso por lo que Colombia posee un margen legal donde se establecen todo tipo de condiciones para el buen manejo de las industrias incineradoras. Dentro de esta normativa se destacan:

LEY 99 DE 1993 (DICIEMBRE 22)	Donde 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. En su Artículo 5 menciona que regula las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente y el uso, manejo, aprovechamiento, conservación, restauración y recuperación de los recursos naturales, con motivo de impedir, reducir o mitigar el impacto de las actividades contaminantes del entorno o patrimonio cultural.
RESOLUCIÓN 058 2002 (ENERO 21)	Esta resolución establece las normas y límites máximos permisibles de emisión para incineradores y hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos. El artículo 2 en su contenido indica aquellos residuos que se pretenden incinerar, como ejemplo los residuos líquidos y sólidos no explosivos, residuos de aditivos de aceites lubricantes, madera o retal de ésta, residuos domiciliarios, entre otros.
DECRETO 948 DE 1995 (JUNIO 5)	Contiene el reglamento de protección y control de la calidad del aire, del alcance general y aplicable en todo el territorio nacional, mediante el cual se establecen normas y principios generales para la protección atmosférica, los mecanismos de prevención, control y atención de episodios por contaminación del aire generada por fuentes contaminantes tanto fijas como móviles, entre otras funciones del decreto.

LEY 1541 DE 1978	Ley que menciona que toda persona natural o jurídica pública o privada, requiere del permiso del Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de medio Ambiente, Inderena para el uso de aguas públicas o causes en funciones diferentes al consumo humano, bañarse, abrevar animales, lavar ropas cualesquiera u otros objetos similares, entre otras.
DECRETO 3930 DE 2010	En caso de que la practica ocasione el vertimiento de aguas residuales estas deben someterse a permisos, tramites y otorgamientos establecidos por este decreto donde se mencionan las condiciones que debe cumplir las aguas residuales antes de ser vertidas junto con el ordenamiento del recurso hídrico, los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y alcantarillados.
LEY 143 DE 1993	Se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, donde se conceden las autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética.
LEY 697 DE 2001	Mediante esta ley se promueve el uso racional y eficiente de la energía. También se impulsa la utilización de energía alternativas junto con otras disposiciones.
LEY 1715 DE 2014	Por medio de esta ley se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.
LEY 388 DE 1997	Establece como uno de los determinantes del ordenamiento, el señalamiento y la localización de las infraestructuras básicas relativas al saneamiento y suministro de energía, así como las directrices de ordenamientos para sus áreas de influencia.
DECRETO 1077 DE 2015	Indica que no podrán exigirse licencias urbanísticas de construcción en ninguna de sus modalidades para el desarrollo de infraestructura y sistemas de saneamiento y suministro de energía.

3.14. TRATAMIENTO DE CENIZAS

Es cierto que la incineración de cualquier residuo solido urbano además de generar energía también produce un residuo luego de la combustión del material (cenizas), por eso es muy importante definir su destino final. Conforme a esto, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en el informe de Escorias y Cenizas de Incineradora de Residuos Sólidos Urbanos (2007) informa sobre los diferentes usos que poseen estas cenizas luego de ser producidas, con el fin de reducir o inmovilizar su impacto en el ambiente. Estos mecanismos consisten en:

- **Terraplenes:** Es un proceso por el cual se adecua la tierra o se rellena con el fin de levantar su nivel y formar una base de apoyo. Este proceso en lo general trata de absorber la mayor cantidad de escoria producida por la incineración de los residuos. Esto puede verse reflejado en los movimientos de tierra y en las construcciones.
- **Carreteras:** Las escorias o cenizas de los residuos también pueden destinarse a las capas que se destinan a la elaboración de carreteras. Estas sirven de soporte debido a que estas cenizas con el tiempo empiezan a endurecerse lo cual mejora su comportamiento a largo plazo. Muchas de estas cenizas, son estabilizadas al mezclarse con cemento debido a que presenta aspectos positivos conforme a la capacidad de soporte y mejor control de lixiviados.
- **Edificaciones y obras públicas:** Donde se aplica la sustitución de los áridos del hormigón por residuos de la incineración de los RSU. Al hacer esto no se producen variaciones en las características ni en la durabilidad del hormigón.

Otra de las funciones en las que se aplican dichas cenizas, es en la elaboración de bloques de hormigón prefabricado, donde se indica que con hasta un 65% de cenizas se puede fabricar dicho producto. Este se somete a un tratamiento para obtener un tamaño máximo en el árido adecuado. Debido a que las cenizas poseen una

densidad muy fina, suele mezclarse con arena, con el fin de aumentar la resistencia de los bloques aumentando la ergonomía al trabajar.

- **Fabricación de ladrillos:** Las cenizas producidas por la incineración también pueden ser utilizadas en el proceso de fabricación de ladrillos, siendo un sustituto de la arena. Si se añaden pequeñas cantidades de cemento (entre 4% y 10%) se mejoran las resistencias tanto en compresión como en flexión de los ladrillos, por lo que resulta una mayor resistencia a la compresión. Además de eso, los ladrillos fabricados en estas condiciones presentan una mayor resistencia a la abrasión y una mejor absorción de agua.

4. CONCLUSIONES

El aumento en las cantidades de residuo sólido urbano es directamente proporcional a la cantidad de habitantes en una determinada localidad, afirmación que puede corroborarse mediante las estadísticas las cuales mencionan que el sector donde más se producen este tipo de residuos es el sector residencial. Si se quiere detallar, también puede concluirse que la causa de que este sector sea el que más produce residuos es el aumento en la necesidad de consumir, debido a que, si se tiene más población, más van a ser los insumos necesarios para suplir las necesidades de esta.

La técnica de incinerar el residuo sólido urbano para transformarlo en energía eléctrica funciona muy bien como alternativa para reducir la acumulación de este, debido a que se hace en grandes cantidades lo cual lo hace eficiente, sin embargo, no hay que olvidar que de esta práctica también se producen resultantes, a los cuales se les debe dar el debido proceso para no generar de nuevo otra acumulación de estos residuos. Para el caso de la ceniza resultante, hay muchas técnicas que se utilizan para poder inmovilizarlas; las más utilizadas se mencionan en la parte final del artículo donde en alguno de los casos las plantas incineradoras reciben remuneraciones por venta de este material. En el caso de gases, se poseen distintas tecnologías que ayudan a purificar ese tipo de resultante con el fin de reducir las emisiones proyectadas a la atmósfera.

Otro de los aspectos más importantes a considerar a la hora de empezar a trabajar en el proyecto de la incineración con valorización energética es el costo de la inversión, debido a que se tiene maquinaria específica la cual posee un costo elevado y en algunas ocasiones es difícil de conseguir, también se deben revisar que las otras áreas como mano de obra, administración, seguridad y mantenimiento cumplan con buenas características y detalles para su buen funcionamiento, sin embargo, a la hora de tener todos estos insumos estipulados de la mejor manera junto con el ingreso por ventas de energía se pueden obtener resultados prudentes en cuanto al retorno en el costo de la inversión.

Este tipo de técnica es muy bien acogida por la mayoría de los países puesto que además de presentar una alternativa a la hora de generar energía para determinada región, también es fuente de empleo para muchos de los habitantes. Esto ayuda también al desarrollo dentro del territorio pues se puede obtener un nuevo mecanismo para tratar el residuo sólido urbano acumulado el cual sirve como nueva fuente de producción energética para el consumo de la propia planta y la red territorial.

5. RECOMENDACIONES

Al realizar el Análisis de viabilidad para la instalación de una planta de incineración de residuos sólidos urbanos, para la generación de energía con bajo impacto ambiental en la ciudad de Cali, al momento de estimar costos fijos y costos variables no se tuvo en cuenta el costo de transporte del residuo hacia la planta y tampoco el costo por emisión de gases, puesto que si se desea realizar un análisis mucho más detallado se considera anexar estos costos.

En muchas de las plantas de incineración se obtienen ingresos por bonos de carbono el cual se utiliza como mecanismo para reducir las emisiones de contaminantes. El bono se le otorga aquellas tecnologías que aplican en los reglamentos de emisiones mínimas. En este análisis no se considera el ingreso por bonos de carbono, puesto que si se desea detallar en ese

punto se considera añadir dicha información en próximas investigaciones

REFERENCIAS

- Agriculture an Rural Development Depertament. (2005). *Formulación y Empleo de Perfiles de Proyecto* (Vol. 2). <http://www.fao.org/3/a0322s/a0322s00.htm#Contents>
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2015). *Plan De Gestión Integral De Residuos Solidos De Santiago De Cali*. 733.
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2020). Plan de Gestión Integral del Residuos Sólidos - PGIRS 2015 - 2027. *Departamento Administrativo de Planeación Distrital*, 2, 555. <https://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/157990/plan-de-gestion-integral-de-residuos-solidos-pgirs/>
- Ambientum. (s. f.). *Características físicas de los residuos sólidos urbanos*. La Enciclopedia del Medio Ambiente Urbano. Recuperado 8 de abril de 2021, de https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/caracteristicas_fisicas.asp
- Arroyo Vinuesa, J. S. (2016). *Aprovechamiento Del Recurso Biomasa a Partir De Los Desechos De Madera Para Una Caldera De Vapor*. 75. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11994/3/UPS-KT01220.pdf>
- Autret, E., Berthier, F., Luszezanec, A., & Nicolas, F. (2007). Incineration of municipal and assimilated wastes in France: Assessment of latest energy and material recovery performances. *Journal of Hazardous Materials*, 139(3), 569–574. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.065>
- Bahena Paniagua, E. (2018). “Análisis de factibilidad para la implementación de una incineradora de residuos solidos urbanos en el estado de Tlaxcala”. *Tecnologo Nacional de Mexico*.
- Camacho García, A., Gómez Abellán, J., García Fernández, M. C., & Lopez Hernandez, M. D. (2011). Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos. En Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (Ed.), *Ingeniería Química* (Vol. 33, Número 379).
- Cárdenas Moraga, D. I. (2017). Propuesta De Distribución De Planta Y De Ambiente De Trabajo Para La Nueva Instalación De La Empresa Mv Contruccioness Ltda De La Comuna De Llanquihue. *Universidad Austral de Chile*, 169–172.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). (2007). *Escorias Y Cenizas De Incineradora De Residuos Sólidos Urbanos (RSU)*. 2, 1–20.
- Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos Económicos de ICE*, 83. <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6036>
- CEWEP. (2019). *Latest Eurostat Figures: Municipal Waste Treatment 2017*. CEWEP. <https://www.cewep.eu/municipal-waste-treatment-2017/>
- Diario El Tiempo. (2019, marzo 12). Crecimiento de basuras de Cali, bajo la lupa de entes de control. *EL TIEMPO*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/crecimiento-de-basuras-de-cali-esta-bajo-la-lupa-de-los-entes-de-control-336892>
- Escamilla-García, P. E., Camarillo-López, R. H., Carrasco-Hernández, R., Fernández-Rodríguez, E., & Legal-Hernández, J. M. (2020). Technical and economic analysis of energy generation from waste incineration in Mexico. *Energy Strategy Reviews*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100542>
- Fernández Arvizu, J. L. (2011). La basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México. *Ingeniería Civil*, 496, 36–44. <https://www.ineel.mx/boletin012011/inves.pdf>
- Global Alliance for Incinerator Alternatives. (2013). *Waste Incinerators : Bad News for Recycling and Waste Reduction*. October, 1–9. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Bad-News-for-Recycling-Final.pdf>
- Hermenegildo Rodríguez, G. (s. f.). *Tablas de Poder Calorífico*. https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html
- Jaunich, M. K., Levis, J. W., Decarolis, J. F., Barlaz, M. A., & Ranjithan, S. R. (2019). Solid Waste Management Policy Implications on Waste Process Choices and Systemwide Cost and Greenhouse Gas Performance. *Environmental Science and Technology*, 53(4), 1766–1775. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04589>
- Jofra Sora, M. (2013). *Incineration overcapacity and waste shipping in Europe: the end of the proximity principle?* January, 23. https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Overcapacity_report_2013.pdf
- Khan, I., & Kabir, Z. (2020). Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria

- analysis for sustainability assessment. *Renewable Energy*, 150, 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.132>
- La Nota Positiva. (2019). *San Andrés estrena la primera Planta Generadora de Energía a partir de residuos sólidos*. Actualidad.
- Lunguleasa, A., Spirchez, C., & Zeleniuc, O. (2020). Evaluation of the calorific values of wastes from some tropical wood species. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 22(3), 269–280. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000302>
- Maghmoumi, A., Marashi, F., & Houshfar, E. (2020). Environmental and economic assessment of sustainable municipal solid waste management strategies in Iran. *Sustainable Cities and Society*, 59(March), 102161. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102161>
- Makarichi, L., Jutidamrongphan, W., & Techato, K. (2018). The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91(April), 812–821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.088>
- Máñez Amutio, C. (2019). DISEÑO DE UNA PLANTA DE VALORIZACIÓN DE RESIDUOS URBANOS PARA EL ÁREA DE GESTIÓN A6 DE LA COMUNITAT VALENCIANA. *Universitat Politècnica de València*, 4(3), 57–71. <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>
- Martínez, E. (2017). México será el primer país de América Latina en tener una planta de Termovalorización. *PetroQuiMex La revista de la industria Energética*, 88(0), 4.
- Mayer, F., Bhandari, R., Gäth, S. A., Himanshu, H., & Stoberneck, N. (2020). Economic and environmental life cycle assessment of organic waste treatment by means of incineration and biogasification. Is source segregation of biowaste justified in Germany? *Science of the Total Environment*, 721, 137731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137731>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA. *Resolución 822, 3382*, 65. http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/res_1600_d_19122016_ct_3527_m_1.pdf
- Montiel-Bohórquez, N. D., & Pérez, J. F. (2019). Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas. *Información tecnológica*, 30(1), 273–284. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000100273>
- Observatorio de Minas y Energía. (s. f.). *Precios Energía eléctrica - comparación países*. Recuperado 15 de abril de 2021, de <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/precios-energia-electrica-comparacion-paises.aspx>
- Penagos Vargas, J. W., Adarraga Buzón, J., Aguas Vergara, D., & Molina, E. (2011). Reducción de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia por medio del Compostaje Líquido. *Ingeniare*, 11, 37–44. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.11.643>
- Poletto, J. A., & Da Silva, C. L. (2009). Influencia de la separación de residuos sólidos urbanos para reciclaje en el proceso de incineración con generación de energía. *Informacion Tecnológica*, 20(2), 105–112. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4062it.08>
- Pon, J. (2019). Instrumentos para la implementación efectiva y coherente de la dimensión ambiental de la agenda de desarrollo. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*, 102.
- Reddy, P. J. (2016). *Energy Recovery from Municipal Solid Waste by Thermal Conversion Technologies*. <https://www.routledge.com/Energy-Recovery-from-Municipal-Solid-Waste-by-Thermal-Conversion-Technologies/Reddy/p/book/9781138612112>
- Revista Semana. (2015, agosto 13). ¿Por qué es tan cara la energía eléctrica en Colombia? *Semana*, 1. <https://www.semana.com/pais/articulo/costos-energia-colombia/212216/#:~:text=Lo interesante es que en,precio razonable para la industria.>
- Reyes Hernández, A. M., & Castillo Forero, M. Á. (2017). ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE FUENTES ALTERNAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA. *Universidad Católica de Colombia*, 53(4), 130.
- Sánchez Toloza, J. L. (2012). MODELACIÓN DE LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS COMO ALTERNATIVA COMPLEMENTARIA AL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN BOGOTÁ. *Pontificia Universidad Javeriana*, 66, 37–39. <http://hdl.handle.net/10554/8977>
- Tan, S. T., Ho, W. S., Hashim, H., Lee, C. T., Taib, M. R., & Ho, C. S. (2015). Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. *Energy Conversion and Management*, 102, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>
- Torre Torre, N. (2013). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU). *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación*.

- Vergini, S., Melano, B., & Saccon, S. (2018). Planta generadora de energía mediante la incineración controlada de RSU. *Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata*.
- Zero Waste Europe. (2018). *Comunicado sobre la incineración de residuos en Europa en relación a la situación en América Latina*.
- Zhao, X. gang, Jiang, G. wu, Li, A., & Wang, L. (2016). Economic analysis of waste-to-energy industry in China. *Waste Management*, 48, 604–618. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.014>
- Zosen Corporation Hitachi. (2017). Generación de Energía por Incineración de Residuos. *Productos y Tecnologías de Energía Inteligente en Japón*.