	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		i(136)	

i

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	KAREN ANDREA TORRES CORREA
FACULTAD	DE INGENIERIAS
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERIA MECANICA
DIRECTOR	LISNEIDER SANCHEZ ASCANIO
TÍTULO DE LA TESIS	ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES PARA LA GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA, EN LA CIUDAD DE OCAÑA, NORTE DE SANTANDER

RESUMEN

(70 palabras aproximadamente)

ESTE TRABAJO TIENE COMO OBJETIVO EL DESARROLLO DE UN ANALISIS TECNICO Y ECONOMICO DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO ENERGETICO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES, PARA LA GENERACION DE POTENCIA ENERGETICA ADAPTADO A LAS CONDICIONES DE LA CIUDAD DE OCAÑA, EN NORTE DE SANTANDER, YA QUE ESTA REGION NO CUENTA CON UN ANALISIS DEL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS, A SU VEZ PODER PRODUCIR ENERGIA ELECTRICA DE UNA FORMA MAS SUSTENTABLE, LO CUAL FUE VALIDADO POR EL SOFTWARE ENGINEERING EQUATION SOLVER (EES), CON DATOS REPORTADOS EN LA LITERATURA, PARA LUEGO REALIZAR EL ANALISIS TERMOECONOMICO DEL PROYECTO PROPUESTA.

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 136	PLANOS:	ILUSTRACIONES: 17	CD-ROM:
---------------------	----------------	--------------------------	----------------



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
 Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88 - Fax: Ext. 104
 info@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

**ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO
ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES PARA LA
GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA, EN LA CIUDAD DE OCAÑA, NORTE
DE SANTANDER**

AUTOR:

KAREN ANDREA TORRES CORREA

Código: 181584

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Mecánico

Director:

M.Sc. LISNEIDER SANCHEZ ASCANIO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ocaña, Colombia

Mayo de 2021

Índice

Resumen	1
Introducción.....	3
Capítulo 1: Análisis técnico y económico del potencial de aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales, para la generación de potencia eléctrica, en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander	5
1.1 Planteamiento Del Problema	5
1.2 Formulación del problema.....	7
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivos generales.....	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 Justificación	8
1.5 Delimitaciones	10
1.5.1 Geográfica.	10
1.5.2 Conceptual.....	10
1.5.3 Operativa.	11
1.5.4 Temporal.....	11
Capítulo 2. Marco Referencial.....	12
2.1 Antecedentes.....	12

2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	12
2.1.2 Antecedentes Nacionales.....	18
2.2 Marco Teórico	23
2.2.1 Residuos sólidos municipales.....	23
2.2.2. Aprovechamiento Energético De Residuos.....	24
2.2.3 Simulación.....	33
2.3 Marco Legal.....	34
2.4 Marco Conceptual.....	36
Capítulo 3. Diseño Metodológico.....	38
3.1 Tipo De Investigación	38
3.2 Metodología De Investigación.....	38
Capítulo 4. Resultados.....	40
4.1 Recopilación de información de los residuos sólidos municipales	40
4.1.1 Estimación del potencial energético de los residuos sólidos municipales.....	47
4.2 Tecnologías de aprovechamiento energetico a partir de residuos solidos municipales ..	52
4.2.1 Proceso analítico jerárquico (AHP).....	54
4.2.2 Selección de la tecnología adecuada mediante el método analítico jerárquico (AHP).	60

4.3 Análisis del proceso de incineración para el aprovechamiento energético de los residuos.	67
4.3.1 Estimación de la temperatura de combustión.	71
4.3.2 Parámetros derivados de la combustión de residuos sólidos urbanos.	72
4.3.3 Simulación del Ciclo Rankine.	77
4.4 Análisis termoeconómico	85
4.4.1 La exergía del trabajo.	87
4.4.2 la exergía química.	87
4.4.3 Matriz de incidencia.	90
4.4.4 Intercambiadores de calor a contraflujo.	92
4.4.5 Análisis para los costos termo-económicos.	94
4.4.6 Matriz de costo termoeconómico	102
4.4.7 Escenario de los costos termoeconómicos.	105
4.5 Análisis de resultados	108
Conclusiones	109
Referencias	110
Apéndices	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tecnologías para el tratamiento de residuos con recuperación de energía	25
Figura 2. Incinerador de lecho fluidizado.....	28
Figura 3. Horno Rotativo.....	29
Figura 4. Métodos de decisión multicriterio.....	53
Figura 5. Estructura jerárquica del método AHP.	55
Figura 6. Selección de tecnología de aprovechamiento energético.....	63
Figura 7. Exergía	79
Figura 8. Error relativo	80
Figura 9. Ciclo Rankine propuesto.....	81
Figura 10. Matriz de incidencia.....	91
Figura 11. Intercambiador de calor a contraflujo.....	92
Figura 12. Sistema agrupado.....	100
Figura 13. Matriz de costos exergéticos.....	102
Figura 14. Matriz de costos termoeconómicos.....	104
Figura 15. Variación costo de mantenimiento.....	106
Figura 16. Variación interés anual.....	106
Figura 17. Variación vida útil de los equipos.....	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de residuos.....	23
Tabla 2 Tipo de residuos según el tipo de incinerador	30
Tabla 3. Número de usuarios	41
Tabla 4 Muestra de la población.....	42
Tabla 5 Subproductos de la semana por sectores.	43
Tabla 6 Porcentaje de los subproductos por semana.	44
Tabla 7 Proyección poblacional	45
Tabla 8 Proyección de los residuos sólidos.....	46
Tabla 9 Porcentaje de producción de residuos sólidos.	46
Tabla 10 Composición química.....	47
Tabla 11 Poder calorífico inferior de los residuos.....	48
Tabla 12 Análisis próximo y elemental (base seca libre de cenizas) de los residuos- weight fraction %.....	49
Tabla 13 Poder calórico inferior de cada residuo.	51
Tabla 14 Potencial energético.....	52
Tabla 15 Escala numérica AHP.....	56
Tabla 16 Matriz de criterios.	57
Tabla 17 Matriz normalizada.....	57
Tabla 18 Principio de valor propio.....	58
Tabla 19 Valores de índice aleatorio (RI) para diferentes tamaños de matriz.	59
Tabla 20 Matriz de priorización.	59
Tabla 21 Matriz de comparación de criterios.	64

Tabla 22 Principio de valor propio.....	64
Tabla 23 Matriz de criterio bajo impacto ambiente.....	65
Tabla 24 Matriz de criterio bajo costo.....	65
Tabla 25 Matriz de criterio de eficiencia.....	65
Tabla 26 Matriz de criterio de aspecto técnico.....	66
Tabla 27 Matriz de priorización.	66
Tabla 28 Cantidad de residuos producidos al día en Ocaña.....	67
Tabla 29 Porcentaje de composición química normalizada.	68
Tabla 30 Masa molar de los componentes.....	68
Tabla 31 Cantidad de átomos por cada compuesto.	69
Tabla 32 Masa del aire y del combustible.	73
Tabla 33 Para una cantidad de residuos determinada la masa de los gases de combustión.	73
Tabla 34 Presión de los gases de combustión y fracción molar.	74
Tabla 35 Entalpía y entropía de los gases de combustión	74
Tabla 36 Presión parcial y fracción molar en estado de referencia.....	76
Tabla 37 Entropía y entalpía de los gases de combustión en estado de referencia.	76
Tabla 38 Parámetros de operación del ciclo propuesto por (Trindade et al., 2018).....	78
Tabla 39 Parámetros de operación del ciclo Rankine.....	81
Tabla 40 Propiedades de referencia.....	84
Tabla 41 Propiedades de cada una de las corrientes del ciclo Rankine propuesto.....	84
Tabla 42 Trabajo consumido de bombas y producido de la turbina.....	85
Tabla 43 Exergía física de cada corriente.....	86
Tabla 44 Exergía de trabajo del ciclo.	87

Tabla 45 Exergía química de los gases de combustión.	88
Tabla 46 Exergía química del aire.	88
Tabla 47 Exergía total de cada una de las corrientes.	89
Tabla 48 Áreas de intercambiador de calor.	94
Tabla 49 Costos de adquisición de equipos.	95
Tabla 50 Costos de adquisición de los equipos establecidos.	95
Tabla 51 Factor lang.	96
Tabla 52 Inversión de capital de cada uno de los dispositivos.	96
Tabla 53 Costos fijos.	99
Tabla 54 Costos fijos de los equipos en USD/s.	100
Tabla 55 Datos de los costó termoeconómicos de cada corriente.	104

Lista de Apéndices

Apéndice 1 .Método de decisión multicriterio	120
Apéndice 2 .Método de decisión multicriterio (continuación)	121
Apéndice 3 .Método de decisión multicriterio (continuación)	122
Apéndice 4 .Método de decisión multicriterio (continuación)	123
Apéndice 5 .Método de decisión multicriterio (continuación)	124

Resumen

la recogida y el transporte de los residuos sólidos siempre han sido temas difíciles para la modelización de los sistemas integrados de MSWM considerando parámetros medioambientales y energéticos, Cuando se trata (recogido y depositados en instalaciones de tratamiento de desechos), los desechos sólidos urbanos producen grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero Así pues, la importante huella de carbono de los DSM hace que este sector sea un contribuyente clave al cambio climático, Además, dado el alto valor calórico medio de los residuos sólidos urbanos, los residuos a la energía es de creciente interés, en particular a través de la incineración. En línea con la sostenibilidad ambiental, la minimización de los residuos como, así como la conversión de los residuos en energía son estrategias clave para transferir los residuos de una economía. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo realizar un análisis técnico y económico del aprovechamiento energético de los residuos sólidos para generación de energía de la ciudad de Ocaña- Norte de Santander.

El estudio comenzó con una recopilación de información de la cantidad de residuos sólidos que se produce en la ciudad de Ocaña, de lo cual se encontró la cantidad de energía que podría ser aprovechado con datos verificación de datos encontrados en la literatura, luego se procedió a una revisión exhaustiva de la literatura de las tecnologías de aprovechamiento energético que se están utilizando actualmente y que tienen muy buenos resultados de las cuales encontramos incineración, gasificación, pirolisis, la tecnología con mejores resultados medio ambientales,

técnico y eficiencia del sistema fue incineración, siendo una de las tecnologías más utilizadas en el mundo.

Teniendo ya la tecnología selección se procedió a seleccionar un ciclo Rankine para la generación de energía de lo cual se tuvo como resultado 1974 kW.

Para considerarlos los costos termoeconómicos, se tuvo en cuenta las exergías del proceso para hallar costos de mantenimiento, adquisición de equipos, costos de operación y una inversión inicial de planta, de la cual se obtuvo muy buenos resultados.

Introducción

Actualmente, uno de los problemas que aquejan a nivel mundial, es el aumento de los residuos sólidos, suceso que está directamente relacionado con el aumento de la población. Cada vez, más personas se desplazan a las zonas urbana buscando mejores oportunidades y calidad de vida. Este desplazamiento acrecienta la formación de residuos, así como el consumo de energía eléctrica. Por otro lado, el tratamiento inadecuado que se le da a los residuos sólidos municipales, produce ciertas consecuencias en la calidad de vida, donde se ven afectados el medio ambiente, suelo, agua, y las personas que se encuentra alrededor de los vertederos donde estos residuos son depositados.

El abastecimiento de energía eléctrica en el mundo, es considerada como una de las preocupaciones más grandes, ya que los combustibles fósiles son una opción insostenible en el futuro. Por esta razón es importante buscar alternativas que puedan satisfacer la demanda energética, y a su vez ayudar a mitigar el impacto ambiental que se genera por mala gestión de los residuos.

Este trabajo tiene como objetivo, realizar un análisis técnico y económico del potencial energético de los residuos sólidos municipales, para la generación de potencia eléctrica en el municipio de Ocaña Norte de Santander. El aprovechamiento energético de los residuos sólidos es una práctica bien establecida en países desarrollados, convirtiéndose es una de las mejores opciones para el tratamiento de los residuos, claro está que no es opción definitiva al problema. En algunos países de Latinoamérica esta opción es un poco difícil de implementar, puesto que los

recursos financieros son limitados, y construir una cultura amigable de reciclaje es difícil, siendo los rellenos sanitarios la opción más económica, pero inestable con el tiempo. En este sentido, el presente trabajo tiene como finalidad, realizar un análisis técnico y económico del potencial de aprovechamiento energético desde los residuos municipales de la ciudad de Ocaña. En primer lugar, y de acuerdo a la literatura, se determinó la tecnología más adecuada para el aprovechamiento energético, de acuerdo a la fuente de energía considerada. Seguido, se desarrolla la simulación del sistema seleccionado, con el fin de determinar la capacidad de aprovechamiento de energía, teniendo en cuenta las restricciones del proceso y de la tecnología a emplear. Finalmente, mediante el empleo de la termoeconomía, se realizó la evaluación económica del sistema, con el fin de determinar el costo del producto final y la viabilidad del proceso.

Capítulo 1: Análisis técnico y económico del potencial de aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales, para la generación de potencia eléctrica, en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander

1.1 Planteamiento Del Problema

Actualmente, la generación de electricidad en casi todo el mundo emplea combustibles fósiles, opción que cada vez es más insostenible ya que estos recursos, como el carbón, gas, petróleo, entre otros, son limitados y sumamente contaminantes. Por esta razón se vienen incorporando tecnologías con menor impacto ambiental, las cuales permiten la generación eléctrica a partir de fuentes renovables y/o alternativas de energía, cubriendo la gran demanda que existe de ésta (Colomer Mendoza et al., 2019).

Los residuos sólidos urbanos (RSU) generalmente llamados desechos, ocasionan serios problemas a nivel mundial. Su crecimiento está relacionado directamente con el aumento de la población en las zonas urbanas, ya que las personas continuamente se desplazan a las ciudades con el objetivo de lograr mejores oportunidades económicas. Esto causa una mayor concentración de residuos en las grandes ciudades, relacionado a hábitos de consumo que van cambiando año a año, siendo desfavorables para el medio ambiente, lo que deja en evidencia la incapacidad de controlar estos residuos por las autoridades competentes. Así mismo, estos desechos pueden ocupar un gran volumen de espacio, lo que se conoce como vertedero, el cual corresponde al lugar donde estos residuos son depositados (Montiel-Bohórquez & Pérez, 2019).

Aproximadamente 3000 millones de personas generan en promedio 1.2 kg/día de Residuos Sólidos Municipales (RSU), lo que representa una generación aproximada de 1300 millones de toneladas/año. América Latina, produce alrededor de 160 millones de toneladas/año, los cuales en su mayoría se depositan en rellenos sanitarios, contribuyendo a la contaminación de los suelos y aguas que se encuentran cerca de estas regiones, afectando a las poblaciones cercanas y causando problemas de salud en la sociedad por el aumento de plagas (Alejandro & Sepúlveda, 2016).

Los vertederos empleados para tal fin, son la forma más fácil de deshacerse de los residuos, ya que presentan un bajo costo de operación y muy fácil de manejar. No obstante, contribuyen al aumento del nivel de emisiones de gases de efecto invernadero, ya que liberan metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O) a la atmosfera. Las emisiones generadas en dichos vertederos, afectan a la población mundial, principalmente en aquellas ciudades que no cuentan con sistemas eficiente de reciclaje y recogida de residuos (Yaman et al., 2020).

Por otro lado, haciendo referencia al departamento Norte de Santander, el 92.1 % de los residuos sólidos son llevados a rellenos sanitarios y solo el 7.9 % son aprovechados en prácticas como el reciclaje (*El Manejo Integral*, 2018).

A nivel departamental se cuenta con tres rellenos sanitarios, Guayabal, ubicado en Cúcuta, al cual se le proyecta una vida útil hasta el año 2025 y se depositan un promedio de 25257.3 toneladas mensuales de residuos; La Madera ubicado en Ocaña, el cual cuenta con una vida útil hasta 2043 y reporta un promedio de 2659.9 toneladas mensuales de residuos y La Cortada, ubicado en Pamplona, estima una vida útil hasta 2026 y que en promedio acapara 296.2 toneladas mensuales (UPME, 2015). Este hecho se encuentra muy relacionado a la falta de cultura que se

evidencia con el tema del manejo de los residuos sólidos municipales, a la falta de políticas de vigilancia y al control frente a los responsables de sus manejos. Todo esto trayendo como consecuencia un fenómeno que puede apreciar a nivel internacional, nacional y local, como es el aumento en los niveles de contaminación (Bello & R, 2014).

Los tratamientos térmicos de avanzada no son una solución total al problema de los residuos sólidos municipales, por el contrario, son un método de apoyo que deben ir de la mano, promoviendo la recuperación de material para reciclaje, que debe ser implementado antes de ser utilizadas en el aprovechamiento energéticos de estos, utilizando los que tengan mayor poder calorífico para mayor eficiencia del sistema (Steinvorth Álvarez, 2014). Siendo el aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales una de las estrategias más viables y de mayor utilización a nivel mundial, mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero

1.2 Formulación del problema

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se busca dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación: ¿es viable técnica y económicamente el aprovechamiento energético, empleando los residuos sólidos del municipio de Ocaña y cuales serían sus condiciones óptimas de la misma?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales.

Realizar un análisis técnico y económico del potencial de aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales, para la generación de potencia eléctrica, en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Seleccionar el método más adecuado para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales, con base en un análisis exhaustivo de reportes encontrados en la literatura.
- Realizar el análisis del aprovechamiento energético de los residuos sólidos del municipio de Ocaña, mediante la simulación, validación (con reportes de la literatura) y discusión de resultados obtenidos a partir de la tecnología seleccionada.
- Analizar los costos económicos asociados al aprovechamiento energético de los residuos sólidos del municipio de Ocaña, empleando como herramienta principal a la termoeconomía.

1.4 Justificación

En la actualidad se buscan soluciones prácticas para mejorar la situación actual de la gestión de los desechos, es decir, pasar de los métodos convencionales de eliminación de desechos a las tecnologías avanzadas. Entre las propuestas destacadas se encuentra el Waste to Energy (WTE), la cual logra la reducción casi en su totalidad de los residuos sólidos y promete una alternativa

para la reducción de la contaminación que producen los residuos en los vertederos, y al mismo tiempo, aprovechando la energía para generar electricidad (Tan et al., 2015).

Sin embargo, los sistemas WTE no son comunes en países subdesarrollados, debido a su alto costo de inversión inicial que involucra implementarlos y el poco apoyo de los gobiernos para estas tecnologías más sustentables. A nivel mundial, existe un aproximado de 800 plantas que emplean los residuos sólidos para generación de energía eléctrica, las cuales son operadas en casi 40 países alrededor del mundo, con una capacidad de 83 millones de toneladas de residuos. Uno de los países más destacados en el aprovechamiento energético de residuos sólidos es Japón, con el empleo de alrededor de un 78% de los desechos del país mientras el 22% se envía a los vertederos (Mukherjee et al., 2020).

Existen ciertas tecnologías modernas, como lo son métodos de conversión mediante tratamiento térmico (gasificación, pirolisis, incineración/combustión) y métodos de conversión mediante tratamiento biológicos como digestión anaeróbica (Mukherjee et al., 2020), las cuales prometen ser una solución a la problemática de los residuos sólidos reduciendo el volumen de estos. Para cada una de estas tecnologías se deben tener en cuenta ciertas variables para su implementación, tanto el costo de inversión inicial, como el costo de mantenimiento y operación. En el caso de la gasificación y la pirolisis, los residuos sólidos municipales (RSU) deben ser heterogéneos en lo posible, siendo un sistema más complejo y con costos de operación elevados (Neehaul et al., 2020).

En la incineración, los residuos se queman a temperaturas entre 850 y 1450 °C en presencia de oxígeno, llevando a una reducción de residuos de hasta el 90% con un residuo de cenizas las cuales son utilizadas en trabajos de construcción o muchas veces van de nuevo a los vertederos. La incineración es uno de los sistemas más utilizados a nivel mundial por no ser tan complejos, y aunque tienen un costo de inversión inicial elevado, es el más popular de todos por su fácil implementación, aunque emiten un porcentaje elevado de contaminación comparados con la gasificación y la pirolisis (Abdallah et al., 2020).

De acuerdo a lo anterior, se puede evidenciar que sería muy provechoso para el municipio de Ocaña, llevar a cabo un análisis del potencial de aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales, en donde se pueda obtener como beneficio, ya sea la generación de energía eléctrica o la obtención de gases combustibles, así como la disminución del volumen de espacio ocupado por estos residuos en los vertederos en los cuales son depositados, logrando grandes beneficios económicos y ambientales (ColomerMendozaetal.,2019).

1.5 Delimitaciones

1.5.1 Geográfica.

El análisis realizado se limita a la región de Ocaña, Norte de Santander.

1.5.2 Conceptual.

La temática de este proyecto abarca los siguientes conceptos:

- Identificación de los métodos que existen de generación de energía a partir de los residuos sólidos municipales.

- Contaminación ambiental.
- Aprovechamiento energético de los residuos sólidos.

1.5.3 Operativa.

Para el desarrollo de este proyecto se contará con la ayuda y asesoría del Msc. Lisneider Sánchez Ascanio, docente en la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, con el fin de obtener un mejor desarrollo en el análisis del proyecto a realizar.

1.5.4 Temporal.

Este proyecto se desarrollará en el municipio de Ocaña y tendrá una duración aproximada de 4 meses a partir de la aprobación del anteproyecto.

Capítulo 2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes

Actualmente existen investigaciones relacionadas con el aprovechamiento y la disposición final que se les da a los residuos sólidos mediante distintos tratamientos térmicos. El objetivo de las primeras plantas de tratamiento fue reducir el volumen de los residuos dispuestos en los vertederos. Tiempo después se desarrollan sistemas complejos para aprovechamiento de la energía proveniente del proceso de combustión, la recuperación de materiales valiosos después convertirlos en energía química y eléctrica, tanto así que hoy en día se pueden encontrar plantas térmicas empleadas para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales.

A continuación, se hará referencia a algunos trabajos encontrados en la literatura a nivel nacional e internacional.

2.1.1 Antecedentes Internacionales.

El estudio de tecnologías para aprovechamiento energético de los residuos sólidos ha venido en aumento desde hace un tiempo a nivel mundial, es por esto que existen gran variedad de reportes en la literatura. Un estudio realizado en Irlanda por (Murphy & McKeogh, 2004), investiga cuatro tecnologías que producen energía a partir de residuos sólidos municipales, éstas son: incineración, gasificación, generación de biogás con un ciclo combinado de calor y potencia, y generación de biogás junto con conversión en combustible para transporte.

Los resultados del estudio indican que la incineración de los residuos produce electricidad con una eficiencia de alrededor del 20% y productos térmicos con una eficiencia del 55%

aproximadamente. Esta tecnología tendría una cuota de entrada y un costo de capital mayor, mientras que, la gasificación produce electricidad con una eficiencia del 34%, lo cual sugiere que la gasificación es más viable que la incineración. La gasificación comparada a la incineración, tendría una cuota de entrada más pequeña, generando también menos gases de efecto invernadero, lo que la hace una tecnología bastante atractiva, aunque no se ha probado a escala comercial.

Concluyeron los autores que la generación de biogás, utilizado en la cogeneración, o por otro lado la producción de combustible para el transporte, como biogás potenciado con metano, tendría un costo menor de inversión significativo respecto a las dos tecnologías mencionadas anteriormente (incineración y gasificación), y una cuota de entrada más pequeña, es decir, en cuanto más energía de biogás se utilizó, más bajas serán las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, la producción de biogás no es una alternativa que reemplace a la incineración o gasificación, ya que éste es producido a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, y se le aplica un tratamiento térmico a la fracción inorgánica. Finalmente, se puede inferir que, de las cuatro tecnologías investigadas, la de la producción de combustible para el transporte requiere menor tarifa de entrada en todos los casos estudiados. Otro estudio que evalúa la viabilidad de las tecnologías anteriormente mencionadas es el desarrollado por (Tan et al., 2015). En su trabajo, los autores realizaron un estudio en un vertedero de Malasia para evaluar la mejor tecnología para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos, y, de esta manera, implementar un sistema de recuperación de gases de vertedero. Las tecnologías evaluadas comprenden la incineración, digestión anaeróbica, y la gasificación.

Al inicio del estudio los autores consideraron el vertimiento de los residuos sólidos municipales sin tener en cuenta la producción de energía, evidenciando el costo de 222.000USD/día proveniente de los precios de transporte, impuestos, operación y mantenimiento. Luego, analizaron 7 escenarios de estudio como estrategias para el aprovechamiento energético de los residuos sólidos. Las estrategias incluyeron tecnologías como: Sistema de recuperación de gas de vertedero (SRGV), Gasificación (G), Incineración (I), Digestión Anaeróbica (DA), y combinaciones de éstos (SRGV+G; SRGV+I; SRGV+DA). Desde la perspectiva de la energía (electricidad y calor), la incineración fue la tecnología que arrojó mejores resultados con una tasa de 1200MWh/día de electricidad y 3575GJ/día de calor, seguida por la Digestión Anaeróbica, gasificación, y SRGV. En cuanto factores económicos la gasificación es una de las tecnologías con mayor costo de operación (250.500 USD/día), seguido de incineración, SRGV, y DA. En cuanto a rentabilidad de energía eléctrica, los autores manifiestan que la más prometedora es la incineración con un valor de 563083,40 USD/día, seguido de DA, gasificación, y SRGV. Desde el punto de vista ambiental, respecto a reducción de emisión de dióxido carbono, la gasificación es capaz de reducir 3207.50 tCO₂/día (toneladas de dióxido de carbono por día), seguido de DA, Incineración y por último SRGV.

Por otra parte, en relación a beneficios ambientales los autores estiman que la tecnología de gasificación es la más prometedora, siendo ésta la que tiene un mayor valor de mitigación de dióxido de carbono con una diferencia de 100 tCO₂/día con respecto a la incineración, y DA. No obstante, en cuanto a beneficios de ganancia está muy por debajo de la incineración y DA, evidenciando que es injustificable su implementación. Por otro lado, está el sistema de recuperación de gas de vertedero (SRGV) que, indudablemente no se encuentra a la altura de las

otras tecnologías, pero es una opción temporal al problema de escasez de energía acorde a lo reportado por los autores. El estudio indica que la incineración es una de las tecnologías más prometedoras considerando su impacto económico y ambiental para la gestión de residuos sólidos municipales; sin embargo, los autores seleccionan la tecnología de digestión anaeróbica.

Estudios similares fueron desarrollados por (Mukherjee et al., 2020). Los autores realizaron una investigación sobre las tendencias actuales de los desechos sólidos municipales de los Estados Unidos, en términos de aprovechamiento energético. Se reporta que Estados Unidos es el país que más residuos genera, y sólo el 13% de estos se utiliza en recuperación de energía, mientras que alrededor del 53% se depositan en vertederos y el resto se destina a reciclaje. El estudio indica que en EE. UU existen 86 instalaciones de aprovechamiento energético de residuos sólidos, siendo la tecnología de combustión la más usada y concentrada principalmente en el estado de Florida, mientras que, para el resto del país, la mayor parte de los residuos sólidos municipales terminan en vertederos con sistemas de recuperación de gas, utilizado como energético en los hogares. Por otro lado, algunas regiones no cuentan con el espacio adecuado para los vertederos y apuestan a diversas tecnologías de aprovechamiento energético a partir de los residuos; no obstante, estos sistemas tienen que cumplir con unos parámetros de contaminación, financieros y técnicos.

Los autores observaron tres sistemas de tratamientos térmicos: incineración, gasificación y pirólisis. En cuanto a incineración, se estima que en Estados Unidos esta tecnología es obsoleta y no amigable con el ambiente. Además, implica un alto costo de inversión inicial, por lo que es poco atractiva para los inversionistas. Por otra parte, los sistemas de gasificación son más

prometedores con respecto a la mitigación de contaminación; no obstante, sus altos costos de operación y mantenimiento son más elevados que los de incineración. La complejidad de los sistemas hace de esta tecnología poco prometedora, dado que necesita de residuos heterogéneos, limpieza de gases y control de contaminantes. Existen muchos factores que restringen la decisión para la implementación de sistemas de aprovechamiento energético, por ejemplo, factores económicos, impuestos, venta de la energía producida, regulaciones ambientales, apoyo del gobierno local, entre otros.

Los autores concluyen que, a pesar de que los sistemas de tratamientos térmicos tienen sus desventajas, es la tecnología que existe y se seguirá implementando. Así mismo, en Irán, (Maghmoumi et al., 2020) realizaron un estudio para evaluar el impacto ambiental y económico de la gestión de los residuos sólidos para la generación de energía eléctrica a partir de éstos, y, por consiguiente, lograr una disminución en las emisiones de gases de invernadero. En el trabajo se menciona la selección escenarios de incineración, vertederos con recuperación de energía e instalaciones de recuperación de material. De los escenarios planteados, se realizaron cuatro combinaciones: 100% incineración, 0% vertedero, 0% recuperación de material; 100% vertedero, 0% incineración, 0% recuperación de material; 50% incineración, 30% vertederos; 20% recuperación de material; 30% incineración, 50% vertedero, 20% recuperación de material. Es necesario mencionar que, debido a la ausencia de vertederos con sitios de recuperación en Irán, los datos requeridos se adaptaron de países con condiciones similares.

El estudio estimó el costo total de cada escenario, el uso de las plantas, la importancia de reducir el consumo de combustible fósiles, y el alcance de la implementación de las tecnologías

de aprovechamiento energético a partir de residuos sólidos. Los resultados arrojados por el indican que el escenario 3 (50% incineración, 30% vertederos; 20% recuperación de material), tiene menores emisiones con respecto a los otros escenarios. Se detectó al vertimiento como una de las opciones más económicas, y a su vez más contaminante. De esta manera, los autores resaltan la importancia de la implementación de plantas de incineración, siendo beneficiosas en la mitigación de la contaminación, y la gestión de los residuos sólidos. De manera similar, (Abdallah et al., 2020) realizaron una investigación donde analizaron las diferentes características de los residuos sólidos en los centros urbanos de Egipto. Se seleccionaron cuatro provincias como objeto de estudio: Gharbiya, Kafr El-Sheikh, Qena y Asyout, en las cuales se estudió el potencial de la aplicación de sistemas de conversión de desechos en energía, para mitigar el impacto ambiental negativo de la eliminación de los residuos, se examinaron los sistemas de incineración y digestión anaeróbica para las zonas urbanas seleccionadas para identificar el óptimo sistema para cada una de ellas por medio de un estudio de campo con una muestra de 1200 hogares en los centro urbanos de la provincias anteriormente mencionadas. El objeto de estudio fue encontrar el valor de tasas de generación y composición en correlación con las características socioeconómicas de la población, asociadas con los ingresos del hogar, el tamaño de las familias y el consumo de la electricidad. Se encontró que las tasas de generación de residuos por habitante oscilaban entre 0.63 y 0.82 kg/día, los residuos sólidos municipales en todas las regiones estaban compuestos principalmente de alimentos (41-70%), seguido por los plásticos (6-16%). Las tasas de generación tenían correlaciones negativas y positivas no significativas con el tamaño de la familia y el consumo de electricidad.

Los autores, encontraron que la digestión anaeróbica fue la estrategia óptima para Gharbiya, Kafr El-Sheikh, y Qena, con potencias energéticas anuales de 2.6; 1.3 y 1,1 TWh, por otro lado, la incineración fue la mejor opción para Asyout con una producción de energía de 2.1 TWh. El estudio se extiende a las demás provincias en las zonas urbanas teniendo como base, los datos hallados. Se dedujo que cinco provincias adoptarían la tecnología de incineración y para las restantes digestión anaeróbica. La estrategia propuesta llevaría a una producción total de energía estimada de 11TWh por año y una mitigación anual de la huella de carbono del país de aproximadamente 7307 Gg CO₂eq. Por otra parte, llegaron a la conclusión de que es financieramente inviable; sin embargo, realizando unos ajustes con respecto al alto capital de inversión, y asumiendo que los posibles ingresos anuales podrían proporcionar beneficios, decidieron incrementar la tarifa de la electricidad, para que de esta manera se lograra una rentabilidad del proyecto.

Se infiere con respecto a la revisión literaria de los artículos anteriormente mencionados, que el estudio de las tecnologías de aprovechamiento energético a partir de los residuos sólidos en países desarrollados lleva tiempo implementándose, el cual tiene sus beneficios y desventajas. Así mismo se debe destacar la importancia del análisis de la viabilidad del proyecto a realizar, los factores que influyen el éxito de la implementación de estas tecnologías.

2.1.2 Antecedentes Nacionales.

En Colombia, existe ciertos estudios que buscan estimar la viabilidad de las tecnologías con aprovechamiento energético de los residuos entre estos los autores (Feo et al., 2012), realizaron un estudio técnico económico, donde se observa la viabilidad de la utilización de los residuos

sólidos municipales como fuente de energía térmica, utilizando la tecnología de termólisis como base del proceso. Se tomó el municipio de Facatativá como objeto de estudio con proyección hasta el año 2020, y se realizó una caracterización de los residuos producidos por el sector, estrato social, y actividades económicas de la población.

Se concluyó que, en promedio los residuos sólidos municipales de Facatativá poseen un poder calorífico inferior de 5506.6 Kcal/kg. Fue estimado que entre más crezca la población de esta comunidad, más residuos generarán, y suponiendo que la mayor cantidad de éstos podría obtenerse una fuente de energía térmica sostenible. Por otro lado, el poder calorífico de los residuos obtenidos que pueden ser útiles para la generación de energía térmica, podría ser comparable con uno de los combustibles fósiles más utilizados como el carbón mineral. Por otra parte, las empresas que disponen de sus propias instalaciones de biomasa residual, son las que tienen la facilidad de plantear la posibilidad de aprovechamiento energético desde los residuos, ya que estos se consideran un recurso de menor valor y en realidad tiene un efecto negativo, dado que, deshacerse de ellos requiere un costo elevado. Años después los autores (Alzate Arias et al., 2018), llevaron a cabo un estudio donde se estimó el potencial de producción de energía eléctrica desde residuos sólidos municipales. Para esto, eligieron dos tecnologías de aprovechamiento energético de residuos como lo son: incineración y digestión anaeróbica. Tomaron como muestra de estudio municipios colombianos como: Pasto, Andes y Guayata, basándose en sus características socioeconómicas y demográficas. Después de esto, los autores seleccionaron las tecnologías para cada escenario. En el caso de Guayata, debido a la baja producción de residuos, tecnologías como incineración fue inviable en esta región, mientras que en el caso de digestión anaeróbica para la generación de energía eléctrica se proyectó para un periodo de 2015-2020, con

una generación baja de 0.12 y 0.14 MWh/día. Para el caso de la generación de energía en los andes y pasto se vio reflejado un aumento cada año hasta alcanzar 1.23 y 18.25 MWh/día.

Por otro lado, se reflejó que para el 2020, se obtendría el total de 2829000 kWh/mes por medio de incineración en Pasto y Andes. El estudio supone que un hogar de cuatro personas consume 145 KWh/mes, estimando que la demanda media de 19.510 hogares pudo ser cubierta con estas tecnologías. Por otra parte, se presenta la generación de energía obtenida por digestión anaeróbica con un total de 579000 kWh/mes en las tres regiones, lo cual podría satisfacer la demanda de energía de 3900 hogares.

Los resultados arrojados determinaron que la incineración es viable en la ciudad de Pasto y Andes, mientras que, la digestión anaeróbica es posible en los tres escenarios. Ambas tecnologías proporcionan una buena alternativa para la eliminación los residuos sólidos municipales, y el problema del uso masivo y acumulación en rellenos sanitarios.

No obstante, un año después (Montiel-Bohórquez & Pérez, 2019), hicieron un estudio para la determinación de estrategias termodinámicas en la conversión energética de residuos sólidos municipales en plantas de incineración bajo condiciones sub-estequiométricas. Una estrategia para mitigar los impactos ambientales mediante valoración energética de los residuos sólidos de la ciudad de Medellín (Colombia), la cual produce 1800 ton/día de desechos aproximadamente. Los autores hicieron un análisis por medio de un modelo de equilibrio termoquímico del proceso de gasificación, para evaluar la influencia de la humedad y la relación de equivalencia sobre el contenido energético del gas producido.

Los resultados arrojados por el estudio permitieron concluir que el contenido de humedad en los residuos genera un efecto negativo sobre el proceso de conversión residuos sólidos a gas, puesto que, disminuye el poder calorífico del gas y la eficiencia energética. Además, requeriría aumentar la energía térmica del proceso para compensar la humedad presente en los residuos. Por otro lado, respecto al dosado relativo de gasificación, se infiere que el aumento de dicho parámetro se ve reflejado en el incremento del poder calorífico del gas de gasificación y su eficiencia, mientras que, temperatura disminuye, ya que el proceso cuenta con menor disposición de oxígeno.

Los autores llegaron a la conclusión que el potencial energético de los residuos sólidos municipales de la ciudad es de 28 a 44 MW eléctricos. De las estrategias termodinámicas para aprovechamiento energético de los residuos en plantas de incineración bajo condiciones sub-estequiométricas, se concluyó que el proceso debe ser auto térmico y que evite la fusión de cenizas. Se determinó que, para obtener un mejor desempeño del proceso, éste debe operar con un dosado relativo entre 1.5 y 3.3, independientemente del contenido de humedad de los residuos sólidos municipales. Otro estudio más reciente realizado por (Ossa et al., 2020), en donde se desarrolló un estudio para determinar la viabilidad financiera de la implementación de tecnologías de tratamiento térmico de residuos sólidos municipales para aprovechamiento energético en tres ciudades de Colombia (Bogotá, Cartagena y Manizales). El estudio evaluó el potencial energético, costos iniciales de inversión de cada una de las tecnologías, mantenimiento y operación de la infraestructura, así como el impacto ambiental con respecto a la mitigación de emisiones, y cómo estas tecnologías podrían finalmente sustituir los métodos que actualmente se utilizan para el depósito de estos materiales.

Los resultados del estudio indican que, en el caso de Bogotá, los sistemas de tratamiento térmico mediante la incineración de los residuos sólidos generan 1.811 GWh/año, en Cartagena producen 0.376 GWh/año, y en Manizales 0.122 GWh/día, lo que en total aportaría 2.309 GWh/año. Este aporte corresponde aproximadamente al 3.3% de la demanda de energía eléctrica en Colombia. Por otro lado, en el caso de la reducción de emisiones de dióxido de carbono al ambiente, se ve reflejado una reducción de 3 millones de toneladas por año, de los cuales Bogotá aporta 2.432.988 CO₂t/año, Cartagena 520.454 CO₂t/año, y Manizales 219.083 CO₂t/año, comparado con las emisiones emitidas por los residuos sólidos llevados a los vertederos. Por otra parte, se encontró que la tasa de incineración que haría que este proyecto cumpliera con las expectativas de los inversionistas, basados en el costo de capital promedio ponderado del 12%, fue de 32.5 USD/toneladas para la ciudad de Bogotá, 36 USD/toneladas para la ciudad de Cartagena, y 68 USD/tonelada para la ciudad de Manizales. En todos los casos la tasa fue superior a la tasa de disposición final que deben asumir los usuarios del servicio de limpieza en cada una de las ciudades anteriormente mencionadas; no obstante, la menor diferencia se da en la ciudad de Bogotá, con 21.3 USD/toneladas. Así mismo, los resultados arrojaron que la planta ubicada en Bogotá tendría la mejor viabilidad con respecto a la parte financiera, con una tasa de retorno de 7.1 %, mientras que, las ciudades de Manizales y Cartagena, no producen resultados adecuadamente viables de retorno financiero.

De los estudios anteriormente mencionados, se puede concluir que en Colombia existen ciertas regiones, que prometen gran viabilidad de implementación de las tecnologías de aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales; sin embargo, es muy importante

tener en cuenta el costo de implementación con respecto al beneficio obtenido, y las mitigaciones de gases de efecto invernadero que pueden brindar las tecnologías estudiadas.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Residuos sólidos municipales.

Los residuos sólidos municipales, como su nombre lo indica son aquellos desechos que se producen como resultado de las actividades humanas (consumo de alimentos, utilización de materias primas), y que son desechados porque no se utilizan. Estos residuos pueden incluir materiales combustibles como plástico, papel, textiles, madera, entre otros, y elementos no combustibles como metal y vidrio. Resultan de las diversas actividades del hombre, y pueden clasificarse respecto a su origen como: domésticos y comerciales, institucionales públicas, construcción y demolición, plantas industriales, agrícola y pecuaria, hospitalaria (Escobar et al., 2015).

Tabla 1
Tipos de residuos

Tipo de residuo	Fuente	Ejemplos
Domésticos y comerciales	Casas, centros comerciales, tiendas, plazas de mercado	Resto de comida, papel, latas, vidrios, pilas y baterías, cocinas, neveras.
Institucionales	Universidad, colegios, alcaldías, gobernaciones	Papel, cartón, restos de medicamentos, restos de comidas
Construcción y demolición	Sitios de construcción, o de demolición de edificios, construcción de carreteras	Hormigón, piedras, ladrillos, vigas de refuerzo, cableado de electricidad, vidrios.
Espacios públicos	Parques, limpieza de calles, playas	Papel, plásticos, latas, residuos de jardinería.
Agrícola y pecuario	Fincas, ganadería, pesca	Desechos de cultivo, estiércol del ganado, redes y material de pesca
Hospitalario	Hospitales, puesto de salud.	Papel, cartón, jeringas, órganos, elementos de cirugía

Nota: Fuente (Flores, 2009)

2.2.2. Aprovechamiento Energético De Residuos.

Waste to Energy es el proceso por el cual se utiliza los residuos sólidos municipales para aprovechamiento energético utilizando diferentes tecnologías para su tratamiento. A partir de estos residuos, es posible recuperar energía ya sea en forma de calor, electricidad, gas, entre otras formas de energía. Actualmente existe gran variedad de tecnologías, pero las tres grandes alternativas que se ponen en práctica a nivel mundial para aprovechamiento energético son: gasificación, pirolisis, incineración, las cuales hacen parte de los tratamientos térmicos, siendo éstas distintas en cuanto condiciones de operación y el producto final obtenido. Por otro lado, la incineración es la tecnología con mayor uso, mientras que, las demás tecnologías aún se encuentran en proceso de desarrollo para su uso a nivel industrial.

La selección de las tecnologías de aprovechamiento energético por medio de residuos sólidos municipales, depende de factores como: el tipo de residuos (relacionado con la eficiencia del sistema), el capital de inversión, costos de operación, complejidad de operación de las tecnologías, ubicación de las plantas de tratamiento, y, además, de las emisiones de toneladas de dióxido de carbono de cada una de estas tecnologías (Mutz et al., 2017).

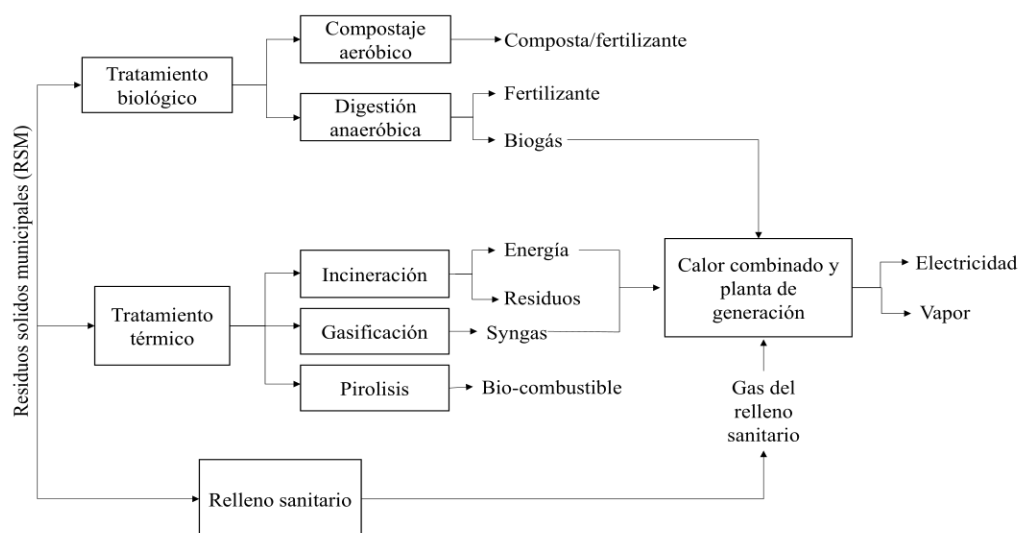


Figura 1. Tecnologías para el tratamiento de residuos con recuperación de energía

Fuentes: (Mutz et al., 2017); (Tan et al., 2015)

2.2.2.1 Digestión Anaeróbica.

Es un proceso natural biodegradable de compuestos orgánicos que se da por microorganismos en ausencia de oxígeno. Este proceso requiere de condiciones ambientales específicas y diferentes bacterias que descomponen los residuos hasta un dar un producto final, el cual es una mezcla de gases, que se conoce como biogás. En la producción de biogás a partir de digestión anaeróbica, cuatro etapas son necesarias: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la primera etapa, un enlace complejo de compuestos orgánicos es descompuesta en una estructura más básica. La descomposición produce ácidos grasos, aminoácidos y otros compuestos relacionados. En la segunda etapa, acidogénesis, se descomponen los residuos por bacterias acidogénicas (fermentativas), y, es en esta zona donde se obtienen gases como: dióxido de carbono, metano, amoníaco, entre otros. La tercera etapa es la acetogénesis, en la cual las moléculas simples que fueron creadas en el proceso anterior, se absorben por medio de los

aceogénos, por lo tanto se producen en cantidades considerables ácido acético, dióxido de carbono, hidrógeno, no obstante, la última etapa del proceso de digestión anaeróbica es la metanogénesis, durante la cual los metanógenos convierten los productos intermedios en dióxido de carbono, metano y el agua (Tan et al., 2015).

2.2.2.2 Incineración.

La incineración es el proceso mediante el cual se produce la combustión de un combustible sólido. En la incineración, las altas temperaturas de operación permiten la recuperación de energía y ayudan a la destrucción de residuos tóxicos, por ejemplo, residuos de los hospitales. La temperatura en los incineradores varía entre 980 y 2000 °C. El proceso de incineración consume el combustible, generando cenizas, gases, partículas, y energía térmica. Se estima que la conversión del combustible sólido alcanza un 80 a 90% en peso del mismo. La ceniza formada, es biológicamente limpia y estable, lo que le permite ser utilizada en la construcción de carreteras y en la industria de la construcción. El gas de combustión generado, así como las cenizas producidas en el proceso de incineración son peligrosas, por lo que son tratadas antes de ser descargadas a la atmósfera (Parashar et al., 2020).

Incinerador de parrilla

Los incineradores de parrilla son los más utilizados para tratamiento de residuos sólidos municipales. Se estima que cerca del 90% de incineradores en Europa son de tipo parrilla. En estos equipos, la cámara de combustión se localiza en la parte inferior, y representa una de las partes más importantes del proceso, puesto que se incinerar el material que se desplaza por la

parrilla. Sobre este elemento, los residuos alcanzan su punto de ignición, por lo que, puede decirse que es la encargada de determinar la eficiencia de combustión.

La parrilla se alimenta por medio de una grúa que se encuentra en la parte superior, la cual permite la rotación y agitación de los residuos, se va desplazando por la cual se presenta una disminución de la humedad y por último, obtener una combustión completa, los residuos sobrantes del materia se expulsan por la parte inferior de la parrilla (Armando Cid, 2016).

Incinerador de Lecho fluidizado

Este tipo de incinerador tiene un lecho sólido de partículas de piedra caliza o arena para soportar altas temperaturas que se producen al interior del dispositivo. Se conecta con un sistema de distribución de aire donde el gas fluye a través del lecho con una velocidad variable produciendo burbujas. Dos tipos de lecho pueden presentarse: de lecho fluidizado burbujeante y de lecho fluidizado circulante. Ambos presentan condiciones propias de operación, diferenciadas principalmente en la velocidad de aire y material del lecho. Así mismo, la preparación del material a incinerar es diferente, lo que se relaciona con la transferencia de calor del equipo. En comparación con otras tecnologías de incineración, este tipo de incinerador pueden procesar residuos sólidos con diferentes niveles humedad y contenido energético (Armando Cid, 2016).

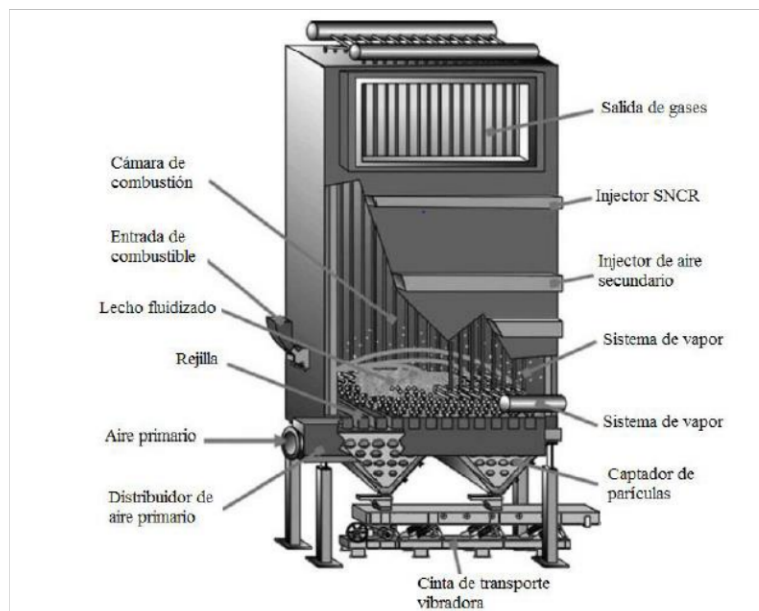


Figura 2. Incinerador de lecho fluidizado

Fuente: (Armando Cid, 2016)

Horno Rotatorio

Esta tecnología se considera robusta ya que permite procesar grandes cantidades de residuos sólidos, generalmente, asociados a residuos hospitalarios y peligrosos, por lo que su uso en residuos sólidos municipales es limitado.

El horno rotatorio consta de una cámara de combustión en forma cilíndrica, levemente inclinada que permite el desplazamiento de los residuos a medida que el horno gira. La inclinación y rotación permite ajustar el tiempo de residencia (usualmente es superior a los 30 min) del material al interior del equipo. El revestimiento del cilindro es de material refractario dadas las altas temperaturas alcanzadas. Así mismo, en estos equipos se utiliza refrigeración por medio de agua en algunas aplicaciones. Estos hornos muchas veces incluyen una cámara de

postcombustión donde ciertos quemadores auxiliares, son utilizados con el objeto de realizar una combustión total (Armando Cid, 2016).

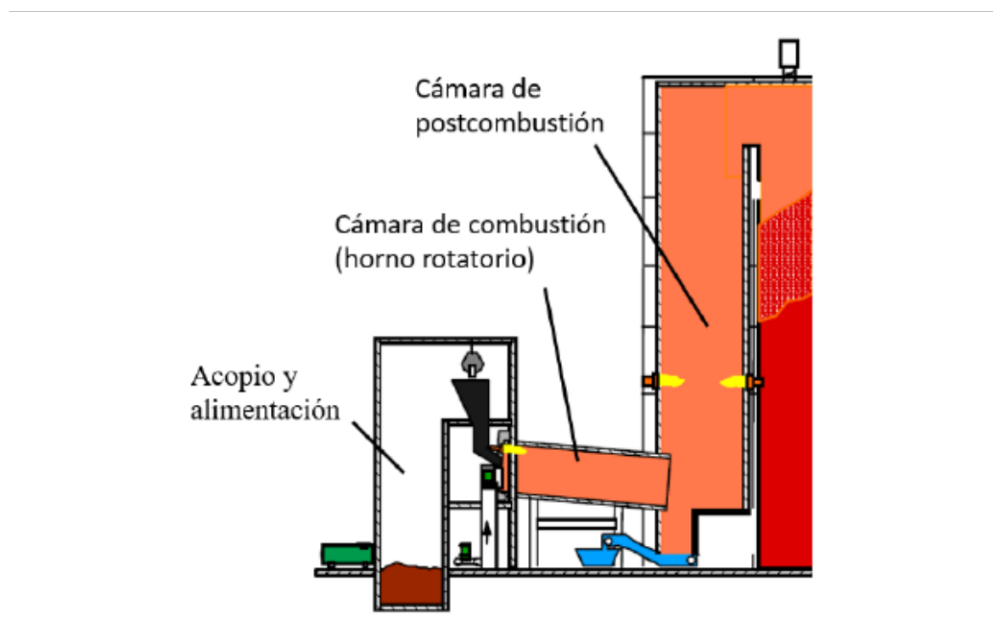


Figura 3. Horno Rotativo

Fuente: (Armando Cid, 2016)

La tecnología de horno de parrilla es la más utilizada, ya que no necesita pretratamiento de los residuos, por ejemplo, triturado y selección de residuos. Por otra parte, al comparar costo de capital y de mantenimiento se puede evidenciar que el lecho fluidizado es más económico que el incinerador de parrilla, y el cual proporciona una eficiencia térmica alta. Por otro lado, los residuos necesitan un pretratamiento, dado que deben llevarse a un tamaño de partícula adecuado para su tratamiento (Colomer Mendoza et al., 2019).

Tabla 2
Tipo de residuos según el tipo de incinerador

TIPOS DE RESIDUOS	TIPO DE HORNO			
	Parrillas	Lecho fluidizado	Rotativo	Inyección líquida
Granular homogéneo	Adecuado	Adecuado	Adecuado	-
Irregular	Muy adecuado	-	Adecuado	-
Sólido con bajo punto de fusión	-	Adecuado	Adecuado	-
Orgánico con cenizas fundibles	Muy adecuado	-	Adecuado	-
Residuos a granel voluminoso	-	-	Muy adecuado	-
Vapores orgánicos	Adecuado	Adecuado	Muy adecuado	Adecuado
Líquidos orgánicos	-	-	Adecuado	Muy adecuado
Fango con carga halogenada	-	-	Adecuado	Adecuado
Fango orgánico	-	Adecuado	Adecuado	-

Nota: Fuente (Colomer Mendoza et al., 2019)

2.2.2.3 La Pirólisis.

Puede definirse como la descomposición térmica de materiales carbonosos en una atmósfera con deficiencia de oxígeno que utiliza el calor para producir gas, usualmente denominado gas natural sintético.

La tecnología de pirólisis, generalmente implica la simultaneidad de cambios en la composición química y el estado físico del material, lo que ocasiona grandes irreversibilidades en el proceso. La pirólisis se utiliza generalmente en la industria química (Young, 2010).

La pirólisis es una descomposición térmica del material procesado para producir gas, líquido y sólido. Tiene tres variaciones: Torrefacción, o pirólisis leve, Pirólisis lenta, y la Pirólisis rápida.

En la pirólisis, grandes moléculas de hidrocarburos de combustible se descomponen en moléculas más pequeñas. La pirólisis rápida produce principalmente combustible líquido, conocido como bio-aceite; la lenta pirólisis produce gas y carbón sólido.

La pirólisis es prometedora para la conversión de la biomasa residual en combustibles líquidos o gaseosos. A comparación de la combustión, la pirolisis consume energía térmica para poder desarrollarse.

La torrefacción es también una forma de pirólisis. En este proceso, la biomasa se calienta a 230 a 300 °C sin contacto con el oxígeno (atmosfera con gas inerte, usualmente nitrógeo). Bajo estas condiciones, la estructura química del material se altera, produciendo dióxido de carbono, monóxido de carbono, agua, ácido acético y metanol. La torrefacción aumenta la densidad energética de la biomasa. Por otro lado, se reduce de gran forma su peso así como su naturaleza higroscópica, lo que aumenta el uso comercial de la biomasa para la producción de energía (Prabir Basu, 2010) (Parashar et al., 2020).

2.2.2.4 Gasificación.

La gasificación consiste en la descomposición térmica de un sustrato carbonoso mediante oxidación parcial a temperaturas elevadas (500-1800°C), bajo condiciones sub-estequiométricas de aire, oxígeno o en presencia de otros agentes gasificantes como vapor de agua, dióxido de carbono y mezclas de éstos. Las reacciones al interior del gasificador producen una mezcla de gases conocido como gas de síntesis o syngas. Dependiendo del agente gasificante, el gas

obtenido puede contener CO, H₂, CH₄, CO₂ y N₂, así como de otros hidrocarburos ligeros. (Colomer Mendoza et al., 2019).

Diferentes tecnologías de gasificación pueden usarse para la conversión de residuos sólidos municipales, desechos peligrosos y lodos de aguas residuales en gases combustibles con un adecuado contenido energético. Por otro lado, para un mejor funcionamiento del reactor de gasificación, hablando en términos de, una alta eficiencia y bajo contenido de alquitrán, se exige que las características del material que se suministran estén dentro de los límites de operación determinados. Los tipos de gasificadores más utilizados son: gasificador de lecho fijo, gasificador lecho fluidizado y gasificador de flujo arrastrado, así mismo, los residuos sólidos suministrados se les debe hacer un pretratamiento. A los residuos sólidos considerados peligrosos se les puede gasificar, ya que sean líquidos y finamente granulados (Escobar et al., 2015).

Gasificación por antorcha de plasma.

Es un proceso el cual se logra por medio de una antorcha que es construida en forma de cilindro en acero inoxidable constituida por electrodos en su interior. Así mismo, estos son separados por un material con gran resistencia eléctrica y luego refrigerado por agua para evitar su fundición durante el proceso realizado. Por otro lado, el chorro de plasma es generado por la inyección de un gas inerte como argón mediante un arco eléctrico. Este gas inerte es ionizado a altas temperaturas convirtiéndose en plasma que a su vez permite el tratamiento de los residuos tales como: orgánicos, inorgánicos. La parte orgánica del material es eliminada, por otro parte la parte inorgánica se vitrifica para formar residuos inertes. Lo cual la antorcha de plasma es lo principal en la tecnología (Huancas et al., 2019).

2.2.3 Simulación.

La simulación es un medio mediante el cual tanto nuevos procesos como procesos ya existentes pueden proyectarse, evaluarse y contemplarse sin correr el riesgo asociado a experiencias llevadas a cabo en un sistema real. Es decir, permite a las organizaciones estudiar sus procesos desde una perspectiva sistemática procurando una mejor comprensión de la causa y efecto entre ellos además de permitir una mejor predicción de ciertas situaciones (Fullana Belda & Urquía Grande, 2009).

Así mismo, una simulación se desarrolla utilizando software de simulación adecuados, en los cuales se utiliza un lenguaje de programación y se introducen los modelos matemáticos ya determinados. Existen simuladores como Engineering Equation Solver (EES), Matlab.

EES reordena automáticamente las ecuaciones para una solución eficiente, y provee muchas herramientas matemáticas y propiedades termodinámicas usadas para el cálculo de ingeniería. Por ejemplo, en las tablas de vapor, cualquier propiedad termodinámica puede ser obtenida desde la construcción de una función en términos de dos propiedades, esto confirma su facilidad de uso (Restrepo V. et al., 2007).

Entre las características más importantes de EES, cabe destacar las siguientes:

- Permite colocar las ecuaciones con variables desconocidas en cualquier orden, reordenándolas automáticamente para obtener la solución de la manera más eficiente.
- Lleva integradas un gran número de funciones matemáticas y termofísicas útiles para los cálculos de ingeniería, así como propiedades de transporte para una gran cantidad de sustancias.

La diferencia de EES respecto al resto de software de similares características, radica en que incorpora además de las funciones matemáticas convencionales, las principales propiedades físicas de los fluidos utilizados dentro del área de la ingeniería térmica (gases reales, aire húmedo, refrigerantes, agua, etc.), lo que le confiere un valor añadido frente al resto de programas cuando se utiliza dentro de dicha área de la ingeniería, puesto que la mayor parte del tiempo y esfuerzo en la resolución de problemas de esta disciplina, se centra en la búsqueda de propiedades termofísicas y de la secuencia de cálculo de las ecuaciones del modelo matemático (Fin et al., n.d.).

2.3 Marco Legal

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

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

- **Decreto 2981 del 20 de diciembre de 2013**, por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo (Ministerio de Vivienda, Cuidad y Territorio, 2013).

La licencia ambiental, como instrumento de gestión y control de proyectos, obras o actividades que pueden generar deterioro grave al ambiente o a los recursos naturales renovables, encuentra sustento legal en la **Ley 99 de 1993**. Esta ley fue objeto de desarrollo reglamentario en el **Decreto 2041 de 2014**, que se incorpora al **Decreto compilatorio 1076 de 2015**, Único Reglamentario del sector ambiente (Ministerio de Ambiente, 2010).

Los proyectos de valorización energética generan emisiones atmosféricas a las que debe resultarles exigible un permiso otorgado por la autoridad ambiental competente. No obstante, en la medida en que el proyecto se encuentra sometido a licencia ambiental, esta llevará incorporado el permiso. El permiso de emisiones atmosféricas para fuentes fijas se encuentra regulado por el **Decreto 948 de 1996**, hoy también incorporado al **Decreto 1076 de 2015** y que, entre los casos que requieren permiso, incluye expresamente la incineración de residuos sólidos, líquidos y gaseosos.

Los procesos de valorización energética generalmente exigen el uso de cantidades significativas de agua que, en la medida en que sean captadas de una fuente pública, requerirán previamente de una concesión de aguas que será otorgada por la autoridad ambiental competente según el procedimiento y demás condiciones que establece el **Decreto 1541 de 1978**, igualmente

incorporado al decreto único del Sector Ambiental. En estos casos el uso del agua deberá someterse al caudal y demás requisitos que se establezcan en la respectiva concesión.

2.4 Marco Conceptual

Residuos sólidos municipales (RSM) o residuos sólidos urbanos (RSU): desperdicio que se genera en espacios urbanos como consecuencia de actividades de consumo, doméstico, de servicio, construcción, etc. (Castells, 2005).

Manejo de residuos sólidos: Actividad relacionada con la manipulación de residuos sólidos desde el punto donde se generan y su disposición final (Zulia et al., 2006).

Combustibles fósiles: Fuentes de energía no renovables, agotables en el tiempo, producto de los restos de organismo vivientes que se encuentran bajo tierra, que tras los años tomaron una forma líquida conocida como aceite, sólida como carbón o turba, y gaseosa como gas natural.

Gases de efecto invernadero (GEI): Compuestos químicos presentes en la atmósfera que bloquean la radiación solar y el calor, por otro lado, los principales gases que se generan son el vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y el ozono.

Tratamiento: Se entiende como cualquier técnica o método, que cambie las características físicas, biológicas o químicas de un residuo, con la finalidad de transformarlo en un material menos dañino y que se pueda aprovechar energéticamente, que se convierta en un residuo menos nocivo y se pueda reducir su volumen (August; Bonmatí, 2008).

Aprovechamiento: Proceso por el cual, a través de un adecuado manejo de los residuos sólidos, estos materiales recuperados se pueden aprovechar en fines económicos y productivo en la sociedad, por medio de la reutilización, reciclaje y de tecnologías para aprovechamiento energéticos, el compostaje, otros sistemas que aporte en la parte ambiental y económica, no olvidando los beneficios sanitarios que pueden traer.

Capítulo 3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo De Investigación

Para el desarrollo del presente trabajo se consideran varias etapas, las cuales son estrictamente consecutivas. En primer lugar, se abordará la selección de la tecnología adecuada para el tipo de fuente de energía considerada en el estudio, seguido se desarrollará la simulación de dicha tecnología y validación con datos de la literatura. Por último, empleando la termoeconomía se evaluarán los costos del producto esperado.

Por otro lado, el trabajo contempla la solución a una pregunta de investigación mediante la determinación y evaluación de variables dentro del proceso. Como se puede ver, la estructura de desarrollo del trabajo de investigación se ajusta a las características que posee el enfoque de investigación cuantitativo (Carlos Fernandez Collado, 2014).

3.2 Metodología De Investigación

Para el cumplimiento de los objetivos específicos de este proyecto, se estableció una metodología cuantitativa, y así mismo se establecen unas fases y actividades. Esto con el objetivo de dar cumplimiento a lo planteado y buscar solución al problema de investigación establecido.

Fase 1. La primera fase está relacionada con la recopilación de información de proyectos de investigación (tesis de pregrado), documentos de las entidades encargadas del manejo de los residuos sólidos del municipio de Ocaña, y a su vez el análisis de esta información para

determinar la caracterización de los residuos sólidos del municipio, lo cual determinara el potencial energético disponible.

Fase 2. La segunda fase se relaciona con la selección del método más adecuado (tecnología) en el aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales. Para el desarrollo de esta fase, se evaluarán las distintas tecnologías con base a cuatro parámetros fundamentales. El primero relacionado a la eficiencia energética de las tecnologías, el segundo con base al impacto al medio ambiente, el tercero con relación al costo económico y por último se considera la complejidad del proceso.

Fase 3. En esta tercera fase se procede con el análisis del aprovechamiento energético de los residuos sólidos en el municipio de Ocaña, mediante una simulación desarrollada y validada con datos reportados en la literatura. Una vez validada la simulación se desarrollarán escenarios para evaluar los resultados obtenidos.

Fase 4. En esta cuarta fase se analizan los costos económicos asociados al aprovechamiento energéticos de los residuos en Ocaña, para realizar esto se debe emplear principalmente la termoeconomía, siendo una herramienta adecuada para el desarrollo de lo propuesto.

Fase 5. En esta quinta fase se analizan los resultados obtenidos en las fases anteriores, con el objetivo de determinar los alcances propuestos, y definir trabajos futuros en el área de estudio.

Capítulo 4. Resultados

En la primera fase descrita en el capítulo 3, se analizarán los datos existentes de la ciudad de Ocaña- Norte de Santander, relacionados con la gestión de los residuos sólidos municipales y al aprovechamiento energético que es posible obtener a partir de estos.

En el municipio de Ocaña se cuenta con el relleno sanitario (La madera), el cual nace de la necesidad de tener un lugar adecuado para la disposición final de los residuos sólidos urbanos. Anteriormente existió un vertedero a cielo abierto llamado (El estanco), el cual fue cerrado en el año 2005.

El relleno sanitario la madera está constituida por 25 terrazas, las cuales, acorde al terreno en el que se ubican influenciará el tiempo de consolidación de cada una de ellas. Cada relleno tiene una vida útil de 32 años aproximadamente. Luego de cumplir su tiempo, el relleno debe ser impermeabilizado con arcilla y una geomembrana resistente a los lixiviados generados por los residuos, y debidamente encaminada para tratar de mejor manera los lixiviados generados de la descomposición.

4.1 Recopilación de información de los residuos sólidos municipales

Según la información proporcionada por la tesis de pregrado (Moncada & Vacca, 2010), la Empresa de Servicios Públicos de Ocaña (ESPO S.A) realiza una vez al año una caracterización de los residuos sólidos de la ciudad. Dado que no se cuenta con información actualizada de los residuos sólidos generados en la ciudad de Ocaña, esta parte de estudio considera información de

una proyección realizada hasta el año 2027 de la población que se encuentra en el casco urbano y que establece la cantidad de residuos sólidos producidos en la ciudad. Así mismo, se consideran los documentos encontrados de la entidad Corponor del 2019 (Beltran, 2017), la cual informa que en Ocaña no se cuenta con un plan de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS).

La Tabla 3 muestra la información recopilada por estudiantes de pregrado en el año 2015 (Moncada & Vacca, 2010).

Tabla 3.
Número de usuarios

Número de usuarios del servicio público de aseo del municipio de Ocaña-Norte de Santander		
Sector	Estrato	No. de usuarios
Residencial	1	10,821
	2	8,443
	3	5,378
	4	1,703
Comercial	Comercio	2,219
Total		28,564

Nota: Fuente (Moncada & Vacca, 2010)

Los autores toman una muestra por estrato socioeconómico de los usuarios para establecer un aproximado del porcentaje de residuos generados. La muestra corresponde a 379 usuarios encuestados y distribuidos proporcionalmente en cada uno de los estratos y sectores comerciales lo cual se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4
Muestra de la población.

Estrato	No. usuarios	%	Submuestra
1	10,160	38%	144
2	7,565	28%	107
3	5,176	19%	75
4	1,635	6%	23
Sector comercial	2,092	8%	30
Total	26,628	100%	379

Nota: Fuente (Moncada & Vacca, 2010)

Los autores determinan la composición física de los residuos asignando grupos de bolsas de color gris, verde y rojo, para los estratos 1, 2, y 3, los cuales son los que tiene una mayor cantidad de residuos. Para su caracterización se emplea el método de cuarteo de residuos sólidos con el fin de reducir el tiempo y cantidad de la clasificación de los subproductos. Por otro lado, el estrato 4 y el sector comercial no necesitan de este método ya que se clasificó el total de los subproductos recolectados.

El cuarteo se lleva a cabo vertiendo el total de los residuos recolectados (estrato 1, 2, y 3) resultado del muestreo, luego se pesan y se descargan en un área plana horizontal. De cada grupo se formó un cúmulo hasta homogenizar los residuos, divididos en cuatro. Este procedimiento se repite una sola vez, ya que se dejó aproximadamente entre 40 y 50 kg de residuos, con los cuales se hizo la selección de los 15 subproductos registrando su peso.

Los 15 subproductos fueron: desechos de alimentos, papel, papel higiénico, toallas, pañales, baterías, huesos, cartón, plásticos, textiles, caucho, madera, vidrio, metales, Poliestireno

expandido y otros. A continuación, en la Tabla 5 se registran la masa en kg por cada semana del estrato socioeconómico tomados como muestra.

Tabla 5
Subproductos de la semana por sectores.

subproductos de la semana por sectores					
Subproductos	Peso (Kg) (Estrato 1)	Peso (Kg) (Estrato 2)	Peso (Kg) (Estrato 3)	Peso (Kg) (Estrato 4)	Peso (Kg) Sector Comercial
Desechos de alimentos	332.22	323.32	243.62	126.5	207.69
Plásticos	76.62	70.82	38.95	29.55	71.49
Papel higiénico, toallas, pañales	66.39	41.92	36.78	17.79	24.59
Otros	23.21	13.34	6.77	6.89	16.81
Vidrios	17.4	7.61	8.31	8.18	13.38
Cartón	12.72	11.92	7.2	5.72	33.4
Textiles	11.98	11.27	13.8	3.51	7.99
Papel	5.84	6.21	2.23	3.14	12.22
Metales	4.76	8.14	1.48	3.74	6.3
Caucho	0.89	0.32	0.32	0	0.17
Madera	2.08	1.7	0	8.62	2.34
Poliestireno	1.2	1.54	1.27	1.13	1.69
Baterías	0.76	0.21	0	0	0
Huesos	1.21	1.44	0.81	0.5	0.49

Nota: Fuente (Moncada & Vacca, 2010)

Los porcentajes por semana de la muestra de los residuos sólidos que se tomó por cada estrato socioeconómico se registran en Tabla 6.

Tabla 6
Porcentaje de los subproductos por semana.

Porcentajes subproductos de la semana		
Subproductos	sector residencial %	sector comercial %
Desechos de alimentos	62.61	44.51
Plásticos	13.11	20.07
Papel higiénico, toallas, pañales	9.68	6.52
Otros	2.98	5.94
Vidrios	2.69	3.65
Cartón	2.33	9.85
Textiles	2.47	2.27
Papel	1.09	4.14
Metales	1.16	1.7
Caucho	0.08	0.06
Madera	1.18	0.84
Poliestireno	0.35	0.39
Baterías	0.05	0
Huesos	0.24	0.1

Nota: Fuente (Moncada & Vacca, 2010)

Los autores recopilaron información proporcionada por la DIAN de la cantidad de habitantes en ciudad de Ocaña en el año 2014, para luego realizar una proyección a 12 años, y de esta manera estimar la cantidad de residuos generados, los cuales se plasman en la Tabla 7.

A continuación, se presenta la proyección de la población para un periodo de 12 años comprendidos entre 2015 y 2027

Tabla 7
Proyección poblacional

Año	Método Geométrico población urbana	Método Aritmético población urbana	Promedio
2015	88,908	88,908	88,908
2016	89,981	89,913	89,947
2017	91,067	90,918	90,993
2018	92,166	91,924	92,045
2019	93,279	92,929	93,104
2020	94,405	93,939	94,169
2021	95,544	94,939	95,242
2022	96,697	95,944	96,321
2023	97,865	96,950	97,407
2024	99,046	97,955	98,500
2025	100,241	98,960	99,601
2026	101,451	99,965	100,708
2027	102,676	100,970	101,823

Nota: Fuente (Moncada & Vacca, 2010)

Se puede observar que hubo un incremento de la población cercano a los 10,325 habitantes, con lo cual se puede inferir que hay crecimiento exponencial de 0.87%, lo que significa que anualmente la población aumenta en promedio 860 habitantes.

Acorde a la información proporcionada por la Empresa de Servicio Público De Ocaña (ESPO), el municipio de Ocaña arrojó al vertedero en el año 2010, 1,595.4 toneladas por mes, y para el año 2014 se arrojaron en promedio 1,812.2 toneladas por mes.

Los autores de la tesis de pregrado (Moncada & Vacca, 2010) realizaron una caracterización física de los residuos sólidos, con datos proporcionados por la empresa de servicio público en el 2014, de la cual llevaron a cabo una proyección de población, en Tabla 8, se ve reflejado la proyección que realizaron de los residuos sólidos producidos mensuales y anualmente.

Tabla 8
Proyección de los residuos sólidos.

Año	Método aritmético	Método geométrico	Promedio mensual (Ton)	Promedio Anual (Ton)	Tasa de crecimiento
2015	1,866.45	1,870.91	1,868.68	22,424.17	
2016	1,931.48	1,931.48	1,926.07	23,112.89	
2017	1,994.88	1,994.02	1,984.45	23,813.39	
2018	2,029.10	2,058.57	2,043.84	24,526.03	
2019	2,083.31	2,125.22	2,104.27	25,251.21	
2020	2,137.53	2,194.03	2,165.78	25,989.34	
2021	2,191.74	2,265.06	2,228.40	26,740.83	0.03
2022	2,245.96	2,338.40	2,292.28	27,506.12	
2023	2,300.17	2,414.11	2,357.14	28,285.66	
2024	2,354.39	2,492.26	2,432.33	29,079.91	
2025	2,408.60	2,572.95	2,490.78	29,889.33	
2026	2,462.82	2,656.26	2,559.54	30,714.44	
2027	2,517.03	2,742.26	2,629.64	31,555.72	

Nota: Fuente (Moncada & Vacca, 2010)

En la Tabla 9 , se ve reflejado el porcentaje total de cada residuo en el año 2015, por otro lado, una proyección porcentual hasta 2027.

Tabla 9
Porcentaje de producción de residuos sólidos.

Subproducto	peso %	2015		2027	
		Producción (Ton*mes)	Producción (Ton*día)	Producción (Ton*mes)	Producción (Ton*día)
Desechos de alimentos	60.68	1,133.99	37.8	1,595.77	53.19
Plásticos	14.14	264.27	8.81	371.89	12.4
Papel higiénico, toallas, pañales	9.22	172.37	5.75	242.56	8.09
Otros	3.30	61.62	2.05	86.71	2.89
Vidrios	2.70	50.46	1.68	71.01	2.37
Cartón	3.49	65.24	2.17	91.81	3.06
Textiles	2.39	44.64	1.49	62.82	2.09
Papel	1.46	27.25	0.91	38.35	1.28
Metales	1.20	22.45	0.75	31.6	1.05
Caucho	0.084	1.56	0.05	2.2	0.07
Madera	0.73	13.55	0.45	19.07	0.64

Poliestireno expandido	0.34	6.28	0.21	8.84	0.29
Baterías	0.05	0.89	0.03	1.62	0.04
Huesos	0.22	4.09	0.14	5.76	0.19
Total	100.00	1,868.68	62.29	2,629.64	87.65

Nota: Fuente (Moncada & Vacca, 2010)

4.1.1 Estimación del potencial energético de los residuos sólidos municipales.

Luego de conocer la cantidad de residuos que se producen en la ciudad Ocaña-Norte de Santander, se procederá a estimar el potencial energético de estos. A continuación se muestra en la Tabla 10, la composición química que tiene cada uno de los residuos con base en el análisis próximo y último de las materias primas. Estos valores fueron tomados de datos reportados en la literatura para estudios similares. A partir de la composición de los residuos, se estimó el poder calorífico, el cual representa la máxima energía extraíble de un material (Eboh et al., 2016; Shi et al., 2016).

Tabla 10
Composición química.

Residuos	A (wt, %)	V (wt, %)	FC (wt, %)	C (wt, %)	H (wt, %)	O (wt, %)	N (wt, %)	S (wt, %)	Total
Des-comida	6.1	82.11	18	51.54	7.14	37.06	3.13	0.21	99.08
Plástico	0	0	0	76.3	11.5	4.4	0.26	0.2	92.66
Papel Hig-To	0	0	0	48.4	7.6	38.8	0.51	0.35	95.66
Otros	0	0	0	34.6	4.3	41.1	1.07	0.38	81.45
Vidrios	0	0	0	0.4	0.1	0	0.13	0	0.63
Cartón	7.22	83.95	8.82	48.97	6.14	44.52	0.21	0.16	100
Textiles	1.4	82.86	17.14	52.54	6.19	39.26	1.76	0.2	99.95
Papel	0	0	0	41.44	8.19	43.2	0.11	0.34	93.28
Metales	0	0	0	4.25	0.27	0	0.44	0	4.96
Caucho	8.36	84.77	6.86	77.72	10.12	7.42	0	2.66	97.92
Madera	1	81.62	18.38	50.1	6.16	43.47	0.17	0.02	99.92
Poliestireno	0	0	0	84.54	14.18	0.06	0.03	0	98.81

Nota: Fuentes (Eboh et al., 2016; Shi et al., 2016)

Donde, A representa la cantidad de cenizas, FC significa contenido de carbono fijo, V corresponde a volátiles, C es carbono, H es hidrógeno, S es azufre, N es nitrógeno y O es oxígeno. Los residuos con valor cero (0), se debe a que en su referencia no se mencionaba dicho porcentaje, por otro lado, en la literatura también se encontraron datos del poder calorífico superior de cada residuo sólido, los cuales fueron corroborados con el modelo de correlación del trabajo de (Channiwala & Parikh, 2002), el cual predice adecuadamente los valores mediante la ecuación 1. Esta información se muestra en la siguiente Tabla 11.

$$HHV = 0.364C + 0.863H - 0.075O + 0.028N - 1.633S + 0.062CL \left(\frac{MJ}{kg} \right) \quad \text{Ec. 1}$$

Tabla 11
Poder calorífico inferior de los residuos.

Residuos	HHV Modelo Channiwala (MJ/kg)	HHV Literatura (MJ/kg)
Des-comida	21.888	21.619
Plástico	37.048	38.377
Papel Hig-To	20.709	22.611
Otros	12.632	16.521
Vidrios	0.23554	0.15
Cartón	19.5295	18.43
Textiles	21.24471	21.197
Papel	18.35999	17.68
Metales	1.79233	0.7
Caucho	32.12336	25.474
Madera	20.26433	19.697
Poliestireno	43.00624	45.972

Nota: Fuente (Channiwala & Parikh, 2002; Eboh et al., 2016)

Como se muestra en la Tabla 11, residuos de vidrio y metales tienen un contenido energético mínimo, por lo que su poder calorífico es despreciable..

Para estimar el poder calorífico inferior de los residuos sólidos municipales obtenidos en la ciudad de Ocaña, se procedió a evaluar la combustión estequiométrica de cada uno de estos con

base en la composición química reportada en la Tabla 10. Al evaluar la combustión de los residuos se estima la cantidad de agua formada en los gases de combustión, la cual puede usarse para calcular el poder calorífico inferior de los residuos a partir de la siguiente ecuación:

$$HHV = LHV + m_{f_{H_2O}} \times h_{fg_{H_2O}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

HHV: poder calorífico superior (high heating value)

LHV: poder calorífico inferior (low heating value)

$m_{f_{H_2O}}$ = kg de agua formada por kg de combustible consumido

$h_{fg_{H_2O}}$ = entalpia de vaporización del agua a 25°C

Para cada uno de los residuos, se estimó su molécula aproximada con base en su composición.

La Tabla 12 muestra el procedimiento desarrollado para uno de los residuos; sin embargo, el mismo procedimiento se aplicó a los residuos restantes.

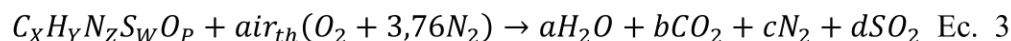
Tabla 12

Análisis próximo y elemental (base seca libre de cenizas) de los residuos- weight fraction %.

Elemento	Análisis Último	Peso molecular	Aux	x	y	z	w	p
C	51.54	12	4.295	1.000	1.662	0.052	0.002	0.539
H	7.14	1	7.14					
N	3.13	14	0.223571429					
S	0.21	32	0.0065625					
O	37.06	16	2.31625					
Total	99.08							

Nota: Fuente (Autor)

La reacción de combustión estequiométrica para los desechos de comida es:



Donde, x es la cantidad de átomos que hay por cada compuesto de Carbono, y es la cantidad de átomos que hay por cada compuesto de Hidrogeno, z es la cantidad de átomos que hay por

cada compuesto de Nitrogeno, w es la cantidad de atomos que hay por cada compuesto de Azufre, p es la cantidad de atomos que hay por cada compuesto de oxígeno.

Al evaluar la combustión estequimétrica de los desechos de comida, se forman 0.83 kmol de H_2O por 1 kmol de residuo. Para estimar la masa de agua formada en relación a la masa de combustible, se realiza la siguiente conversión:

$$m_{f_{H_2O}} = \frac{0.83 \text{ kmol de } H_2O}{1 \text{ kmol } CH_{1.662}N_{0.052}S_{0.002}O_{0.539}} \times \frac{18 \text{ kg } H_2O}{1 \text{ kmol de } H_2O} \\ \times \frac{1 \text{ kmol } CH_{1.662}N_{0.052}S_{0.002}O_{0.539}}{23.068 \text{ kg } CH_{1.662}N_{0.052}S_{0.002}O_{0.539}}$$

Entonces: $m_{f_{H_2O}} = 0.639 \text{ kg } H_2O / 1 \text{ kg } CH_{1.662}N_{0.052}S_{0.002}O_{0.539}$ Ec. 4

La entalpia de vaporizacion del agua a 25°C es 2441.7 kJ/kg. De esta manera, el poder calorífico inferior viene dado por:

$$LHV = HHV - m_{f_{H_2O}} \times h_{fg_{H_2O}} \quad \text{Ec 5.}$$

$$LHV = 21.619 \text{ MJ/kg} - 0.639 \times \frac{2441.7 \text{ kJ/kg}}{1000}$$

$$LHV = 20.057 \text{ MJ/kg}$$

Este mismo procedimiento se realiza para cada uno de los residuos mencionados anteriormente. Los datos se reportan en la siguiente Tabla 13.

Tabla 13
Poder calórico inferior de cada residuo.

Residuos	w_{msw} (ton/día)	LHV (MJ/kg)
Des-comida	37.8	20.057
Plástico	8.81	35.904
PaperHig-To	5.75	21.091
Otros	2.05	15.245
Vidrios	1.68	0.15
Cartón	2.17	16.959
Textiles	1.49	19.618
Papel	0.91	16.346
Metales	0.75	0.7
Caucho	0.05	23.09
Madera	0.45	18.191
Poliestireno	0.21	43.402
Total	62.12	230.753

Nota: Fuente (Autor)

Se puede inferir de la Tabla 13 que los residuos con mayor aporte energético son: plástico, Poliestireno expandido, desechos de alimentos y papel higiénico-toallas-pañales. Por otro lado, los residuos con menor aporte son los metales y vidrios.

Para estimar el potencial energético de los residuos sólidos municipales (EP_{msw}), en donde aproximadamente 62.12 ton/día se generan en la ciudad de Ocaña Tabla 14, se utiliza la siguiente ecuación:

$$EP_{msw} = LHV_{msw} \times w_{msw} \times \frac{1000}{3.6} (kWh) \quad \text{Ec. 6.}$$

$$1kWh = 3.6MJ$$

Donde:

LHV_{msw} = poder calorífico inferior de los residuos (low heating value waste) (MJ/kg)

w_{msw} = masa de los residuos solidos (toneladas)

Tabla 14
Potencial energético.

Residuos	EPmsw (kWh)
Des-comida	210598.5
Plástico	87865.06667
PaperHig-To	33687.01389
Otros	8681.180556
Vidrios	70
Cartón	10222.50833
Textiles	8119.672222
Papel	4131.905556
Metales	145.8333333
Caucho	320.6944444
Madera	2273.875
Poliestireno	2531.783333
Total	368648.0333

Nota: Fuente (Autor)

4.2 Tecnologías de aprovechamiento energético a partir de residuos solidos municipales

En esta sección se emplean las herramientas necesarias para la selección de la tecnología termoquímica de aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales. Se identifican los factores adecuados, de acuerdo a la revisión de la literatura, para seleccionar la tecnología más apropiada, empleando los métodos de decisión multicriterio (MCDM).

Los métodos de decisión multicriterio han sido utilizados en las últimas décadas para determinar mediante una clasificación de las acciones pertinentes cuál es la opción óptima; no

obstante, estos modelos no intentan calcular una solución absoluta. Con base en una serie de criterios, es posible evaluar alternativas para encontrar la opción más adecuada. Estos métodos se han usado en diferentes aplicaciones

Por lo que se han adaptado a diferentes aplicaciones. En la Figura 4, se puede ver los diferentes tipos de métodos que se han desarrollado (de Castro & Urios, 2016).

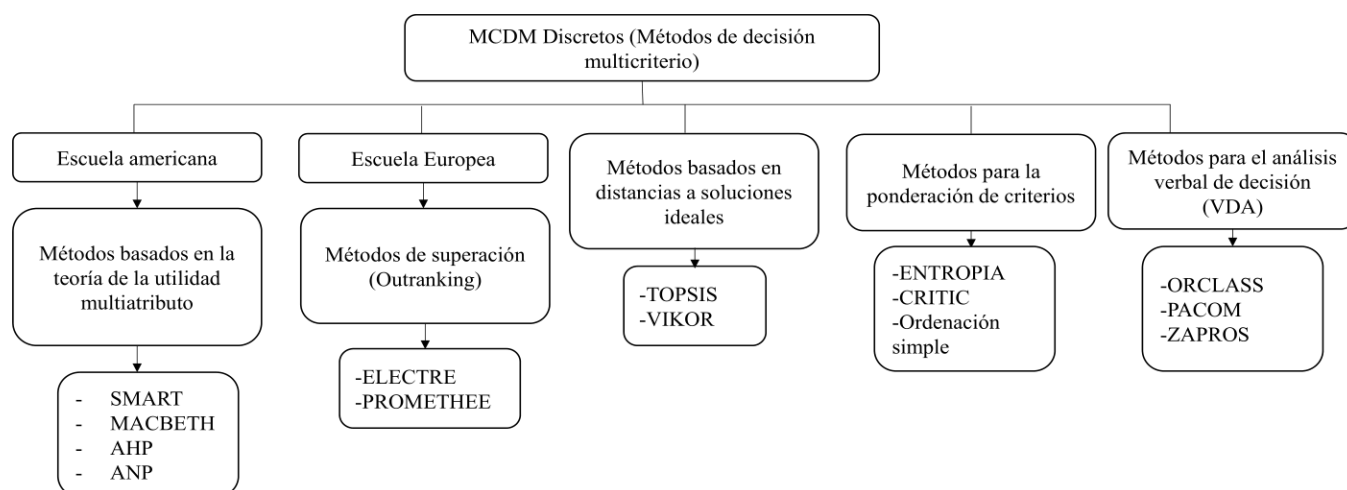


Figura 4. Métodos de decisión multicriterio.

Fuente : (Bernal, 2018)

En el Apéndice 1, se muestra algunos de los métodos de decisión multicriterio, las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Esta descripción se hace con el fin de seleccionar el más adecuado para el propósito de estudio.

Los métodos descritos en el Apéndice 1 son los más conocidos. Existen otros de los que no se encuentra mucha información, o han sido reemplazados por los más recientes.

Luego de una profunda revisión de la literatura acerca de los métodos de decisión multicriterio existentes, se encuentra que el método que ha sido empleado con mayor frecuencia en evaluación de tecnología y sector de la energía renovable es el proceso analítico jerárquico (AHP). La principal característica de este método es el uso de comparación por pares, empleado para contrastar las alternativas con respecto a los criterios pertinentemente seleccionados y, por lo tanto, la ponderación de los criterios, siendo este el método más utilizado a nivel general. Al hacer uso de comparación por pares puede hacer que el responsable de la toma de decisión pondere para luego comparar las alternativas fácilmente.

4.2.1 Proceso analítico jerárquico (AHP).

El principal objetivo de este método radica en encontrar la posible solución que mejor se adapte al objetivo propuesto mediante una metodología estructurada, que representa y cuantifica elementos del problema y evalúa soluciones alternativas.

El método AHP está compuesto por tres grandes principios

- La estructura del modelo
- El juicio de comparación de los criterios y/o alternativas
- La síntesis de las prioridades

4.2.1.1 Elaboración de un modelo de proceso de jerarquía analítica

La estructura jerárquica que se muestra en la Figura 5 indica de forma general el objetivo propuesto, los criterios de decisión, los subcriterios, y las alternativas que se establecen. Este esquema permite estructurar la evaluación de alternativas de este estudio.

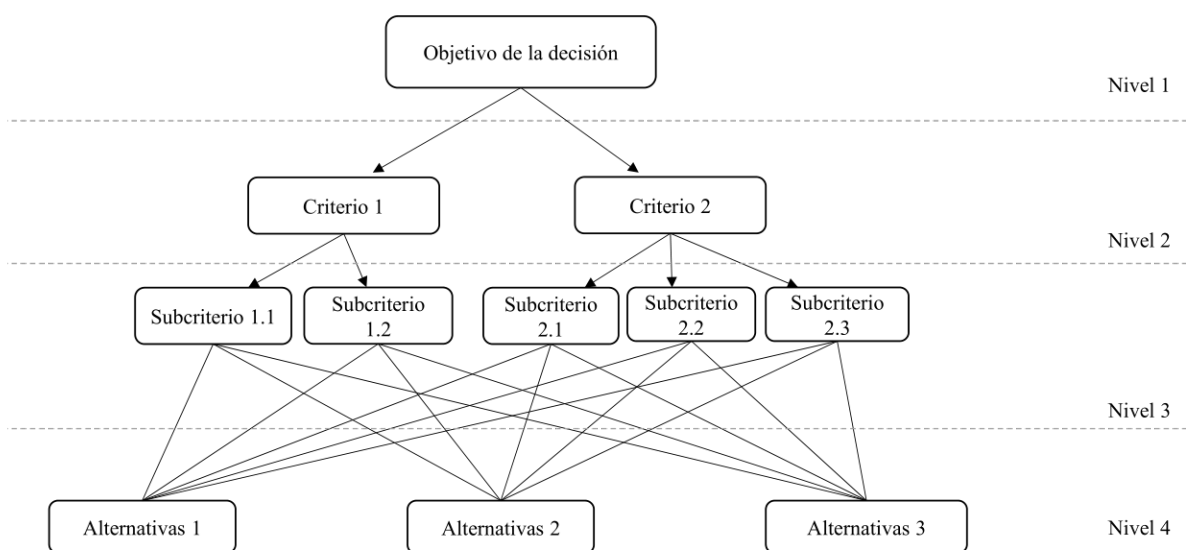


Figura 5. Estructura jerárquica del método AHP.

Fuente: (Wajeeha A. Qazi & Abushammala, 2020)

4.2.1.2 Matriz de comparación por pares y vectores prioritarios

Luego de la formación de la estructura jerárquica, se realiza la comparación por pares entre los criterios y los objetivos. Posteriormente, se comparan las alternativas con los respectivos criterios, lo que lleva a la formación de las matrices de comparación. Para evaluar la intensidad de la preferencia entre dos elementos se utiliza la Tabla 15 que corresponde a la escala fundamental de Saaty, la cual indica la importancia relativa de un valor con respecto al otro. El método no se basa sólo en la información de los elementos, por el contrario, influyen los juicios humanos para realizar las evaluaciones.

Tabla 15
Escala numérica AHP

Intensidad de la importancia	Definición	Explicación en una escala absoluta
1	Igual de importante	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo
3	La importancia moderada de uno sobre otro	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
5	Importancia esencial o fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
7	Muy importante	Una actividad es fuertemente favorecida y su dominio se demuestra en práctica
9	Es de suma importancia	Las pruebas que favorecen una actividad sobre otra son de las más altas de la historia. posible orden de afirmación
2,4,6,8	Los valores intermedios entre los dos adyacentes sentencias	Cuando se necesita un compromiso
Recíprocos	Si la actividad <i>i</i> tiene asignado uno de los números anteriores cuando se compara con la actividad <i>j</i> , entonces <i>j</i> tiene el valor recíproco cuando se compara con <i>i</i>	
Racionales	Ratios derivadas de la escala	Si se forzara la consistencia mediante la obtención de <i>n</i> valores numéricos para abarcar la matriz

Nota: Fuente (Saaty, 2012)

Luego de definida la escala numérica de Saaty, se procede con la ponderación de los criterios a través de una matriz de comparación criterio a criterio Tabla 16. Cada posición de la celda corresponde a un valor de la escala de Saaty y al ser comparado un criterio consigo mismo da como resultado el valor de 1 (igual importancia).

Tabla 16
Matriz de criterios.

Criterios	C1	C2	C3	C4
C1	1=A	C1/C2=E	C1/C3=I	C1/C4=M
C2	C2/C1=B	1=F	C2/C3=J	C2/C4=N
C3	C3/C1=C	C3/C2=G	1=K	C3/C4=O
C4	C4/C1=D	C4/C2=H	C4/C3=L	1=P
Total	CA=A+B+C+D	CB=E+F+G+H	CC=I+J+K+L	CD=M+N+O+P

Nota: Fuente (Autor)

De esta manera, por ejemplo, si se evalúa el criterio A con respecto a B, y A tiene mayor importancia que B, automáticamente cuando se compare el criterio B respecto a A, B representará el inverso de la primera evaluación.

A partir de los datos obtenidos de la matriz de criterios Tabla 16 se obtiene la matriz normalizada mostrada Tabla 17. La columna de ponderación muestra los criterios de mayor a menor importancia.

Tabla 17
Matriz normalizada.

	Matriz normalizada				Ponderación
A*CA	E*CB	I*CC	M*CD	PROMEDIO(F1)	
B*CA	F*CB	J*CC	N*CD	PROMEDIO(F2)	
C*CA	G*CB	K*CC	O*CD	PROMEDIO(F3)	
D*CA	H*CB	L*CC	P*CD	PROMEDIO(F4)	

Nota: Fuente (Autor)

Donde F (1, 2, 3, 4) representa la suma de las filas 1, 2, 3, y 4, respectivamente.

4.2.1.3 Comprobación de la coherencia

La relación de consistencia (CR) tiene dos funciones fundamentales: Asegura que la ponderación se haya realizado de forma coherente y que la toma de decisiones es adecuada.

Para esto, se calcula el valor propio (λ_{max}) de la matriz anterior como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18
Principio de valor propio.

Criterios*Ponderación	
	$((A * F1) + (E * F2) + (I * F3) + (M * F4)) = W$
	$((B * F1) + (F * F2) + (J * F3) + (N * F4)) = X$
	$((C * F1) + (G * F2) + (K * F3) + (O * F4)) = Y$
	$((D * F1) + (H * F2) + (L * F3) + (P * F4)) = Z$
λ_{max}	$W + X + Y + Z$

Nota: Fuente (Autor)

Posteriormente, se estima el índice de consistencia (CI) para cada matriz en donde n representa el número de criterios, utilizando la siguiente ecuación:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Ec. 7}$$

Y finalmente el CR se calcula usando la siguiente ecuación

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Ec. 8}$$

donde RI es el índice aleatorio. El valor de RI se selecciona dependiendo de la dimensión de la matriz de comparación (n), como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19

Valores de índice aleatorio (RI) para diferentes tamaños de matriz.

Matriz tamaño (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Nota: Fuente (Wajeeha A. Qazi & Abushammala, 2020)

El límite aceptable de los valores de CR depende del tamaño de la matriz. Para las matrices que tienen un tamaño de 4x4 es 0.1. En los casos en que el CR supera un valor aceptable entonces la matriz es inconsistente, y se requiere repetir la evaluación para mejorar la consistencia.

Luego de analizar la relación de consistencia y de probar que la matriz es coherente, se procede a la evaluación de cada uno de los criterios con respecto a las alternativas propuestas. Estos últimos son evaluados de la misma forma de las matrices anteriores.

Por otro lado, una vez realizado las evaluaciones de criterios con respecto a las alternativas, y al obtenerlos promedios, estos son plasmamos en una matriz de priorización, que permite estimar los porcentajes de cada una de las alternativas, lo que permite encontrar el orden de importancia de las mismas, reflejados en la Tabla 20.

Tabla 20

Matriz de priorización.

Matriz de priorización					
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Priorización
Alternativa 1	Promedio (A1-C1)	Promedio (A1-C2)	Promedio (A1-C3)	Promedio (A1-C4)	Fila(A1) *Fila (Ponderaciones)
Alternativa 2	Promedio (A2-C1)	Promedio (A2-C2)	Promedio (A2-C3)	Promedio (A2-C4)	Fila(A2) *Fila (Ponderaciones)
Alternativa 3	Promedio (A3-C1)	Promedio (A3-C2)	Promedio (A3-C3)	Promedio (A3-C4)	Fila(A3) *Fila (Ponderaciones)
Ponderaciones	Promedio (F1)	Promedio (F2)	Promedio (F3)	Promedio (F4)	

Nota: Fuente (Autor)

4.2.2 Selección de la tecnología adecuada mediante el método analítico jerárquico (AHP).

La información mostrada en esta sección, ha sido basada en los estudios de: (Huber et al., 2020; Panepinto & Zanetti, 2018; W. A. Qazi & Abushammala, 2020; Wajeeha A. Qazi & Abushammala, 2020; Tun et al., 2020)

Actualmente, se dispone de varias tecnologías de aprovechamiento energético a partir de los residuos sólidos. Estas tecnologías se clasifican en dos categorías: tecnologías termoquímicas (Incineración, Gasificación, Pirolisis) y tecnologías bioquímicas (digestión anaeróbica y fermentación).

En la presente sección se toman como objeto de evaluación las tecnologías termoquímicas para el aprovechamiento de residuos, puesto que son las más empleadas a nivel mundial. Asimismo, se investigan los métodos térmicos en el campo de la gestión de residuos, y los métodos más adecuados con respecto a aspectos de tipo ambiental, económico, técnico, y eficiencias.

En diferentes países como Japón, Alemania, Suecia, los cuales cuentan con la mayor cantidad de plantas de incineración y en gran parte equipadas con instalaciones de generación de energía, la cantidad de residuos que se lleva a los vertederos es muy poca.

La incineración es una de las tecnologías más usadas. En términos económicos las tecnologías de aprovechamiento energético a partir de residuos sólidos, requieren de gran inversión; sin embargo, en comparación con la gasificación y pirolisis, ésta es más económica. La gasificación

es la tecnología menos atractiva por sus altos costos de inversión, costos de mantenimiento, y energía consumida.

En el aspecto ambiental quien libera menos emisión de gases de efecto invernadero es la gasificación, seguido de la pirolisis e incineración. No obstante, cada una de estas tecnologías producen cenizas volantes, cenizas de fondo, liberación de gases tóxicos y metales pesados. Se debe tener en cuenta que el vertedero también es una fuente de contaminación, por lo que es importante la implementación de sistemas que permitan reducir este efecto y al mismo tiempo aprovechar la energía contenida.

Es importante el pretratamiento que se le da a los residuos sólidos, lo cual contribuye a un beneficio económico a la tecnología que se esté implementado. Antes del proceso de incineración, se deben separar residuos como metales, vidrio, sustancias incombustibles de los residuos sólidos urbanos (RSU) lo cual impone una carga energética adicional al sistema. Por otro lado, la incineración tiene la ventaja de aceptar diversos componentes para incinerar aportando mayor potencial energético, este proceso reduce casi el 90% de los residuos.

Por otro lado, antes de gasificar los residuos sólidos se hace un preprocesamiento en donde se eliminan los materiales inorgánicos como: metal, vidrio y sustancias inertes que no pueden ser gasificados. Luego de esto, se trituran los residuos en pequeñas partes con el fin de mantener un porcentaje de humedad por debajo del 15%. Por otra parte, se debe eliminar todo rastro de residuos de comida, esto hace a esta tecnología limitante de materia prima (residuos sólidos), lo que contribuye a reducir el potencial energético.

En la pirolisis, a los residuos se les debe hacer un pretratamiento igual a los mencionados anteriormente para mantener un porcentaje de humedad del 20%. Los residuos deben tener una composición homogénea, contenido de humedad y tamaño durante largos periodos de tiempo.

Desde el punto de vista de producción eléctrica y calor, la incineración es la opción más atractiva, seguida de gasificación y luego pirolisis, resaltando la importancia del pretratamiento para el aprovechamiento energético, en términos costo-beneficio, asumiendo que todo lo producido se comercialice, la incineración tendría una mayor rentabilidad en relación con otras tecnologías.

Por otro lado, la gasificación presenta grandes beneficios con el medio ambiente, pero la hace menos atractiva para los inversionistas debido a sus altos costos de operación, el pretratamiento, la limpieza del gas de síntesis y su complejidad de operación. Al igual que la pirolisis, estas tecnologías están aún en fase de experimentación, por lo que se conoce muy poco de éxito operacional y aun no se ha utilizado a escala comercial. Por otra parte, la incineración es una tecnología implementada a nivel mundial con grandes beneficios y una complejidad de operación más baja.

A continuación, se muestran los resultados de implementar el método de decisión multicriterio AHP, en el cual se facilita la evaluación de las tecnologías de aprovechamiento energéticos como gasificación, incineración y pirolisis, teniendo en consideración ciertos parámetros importantes para escoger la que es mejor.

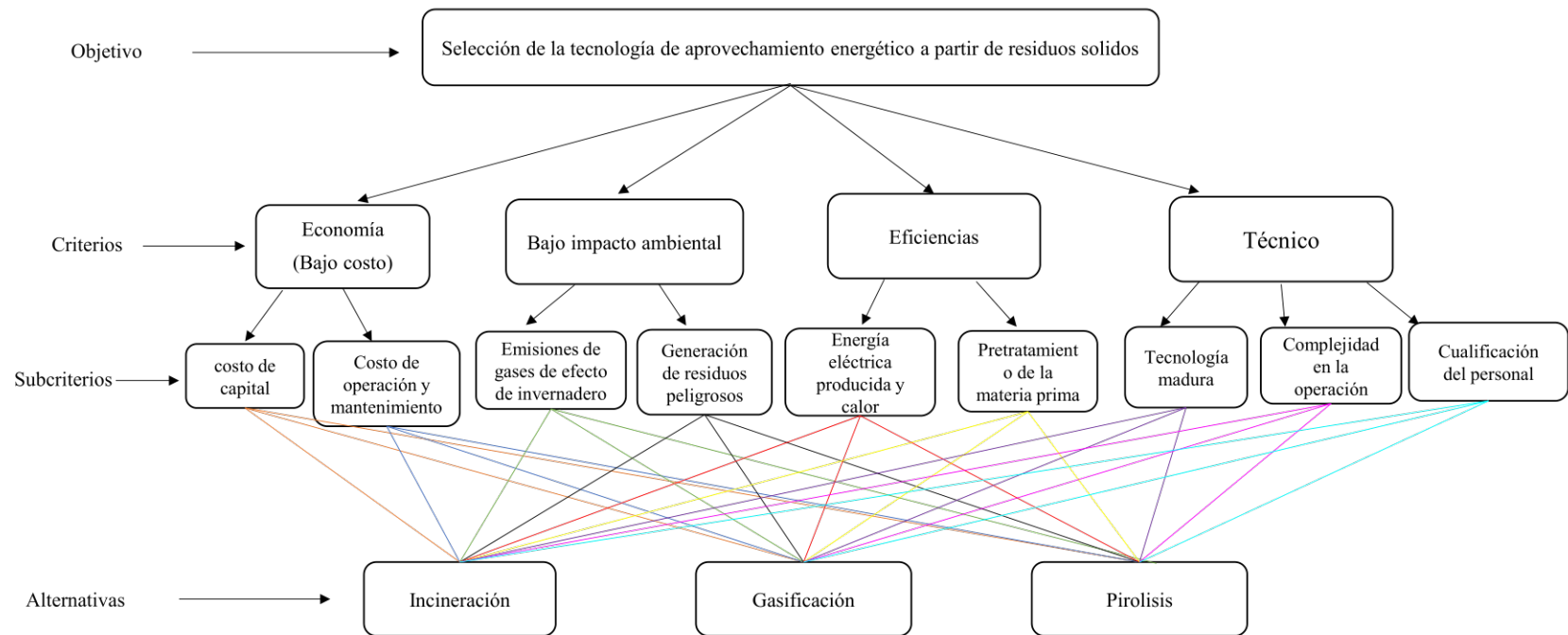


Figura 6. Selección de tecnología de aprovechamiento energético.

Fuente: (Autor)

La Tabla 21 representa la evaluación de cada uno de los criterios propuesto los cuales se consideraron relevantes como se muestra en la Figura 6.

Tabla 21

Matriz de comparación de criterios.

Matriz de comparación de criterios									
Criterios	Bajo impacto ambiental	Economía (Bajo costo)	Eficiencia	Técnico	Matriz normalizada				Ponderación
Bajo impacto ambiental	1.00	0.33	3.00	3.00	0.21	0.17	0.38	0.38	0.28
Economía (Bajo costo)	3.00	1.00	3.00	3.00	0.64	0.50	0.38	0.38	0.47
Eficiencia	0.33	0.33	1.00	1.00	0.07	0.17	0.13	0.13	0.12
Técnico	0.33	0.33	1.00	1.00	0.07	0.17	0.13	0.13	0.12
Total	4.67	2.00	8.00	8.00	Total				1.00

Nota: Fuente (Autor)

Tabla 22

Principio de valor propio.

Criterio*Ponderación
1.17
2.05
0.50
0.50
$\lambda_{max} = 4.22$

Nota: Fuente (Autor)

Al aplicar las ecuaciones 7 y 8 se obtienen los siguientes resultados:

$$CI = \frac{4.22 - 4}{4 - 1}$$

$$CI = 0.073$$

RI=0.9

Las tablas mostradas a continuación representan la evaluación de cada uno de los criterios con las tres alternativas que se propusieron.

Tabla 23

Matriz de criterio bajo impacto ambiente.

Bajo impacto ambiental							
	Incineración	Gasificación	Pirolisis	Matriz normalizada			Promedio
Incineración	1.00	0.20	0.33	0.11	0.13	0.08	0.11
Gasificación	5.00	1.00	3.00	0.56	0.65	0.69	0.63
Pirolisis	3.00	0.33	1.00	0.33	0.22	0.23	0.26
Total	9.00	1.53	4.33				

Nota: Fuente (Autor)

Tabla 24

Matriz de criterio bajo costo.

Económico (Bajo costo)							
	Incineración	Gasificación	Pirolisis	Matriz normalizada			Promedio
Incineración	1.00	5.00	5.00	0.71	0.71	0.71	0.71
Gasificación	0.20	1.00	1.00	0.14	0.14	0.14	0.14
Pirolisis	0.20	1.00	1.00	0.14	0.14	0.14	0.14
Total	1.40	7.00	7.00				

Nota: Fuente (Autor)

Tabla 25

Matriz de criterio de eficiencia.

Eficiencia							
	Incineración	Gasificación	Pirolisis	Matriz normalizada			Promedio
Incineración	1.00	3.00	3.00	0.60	0.69	0.43	0.57
Gasificación	0.33	1.00	3.00	0.20	0.23	0.43	0.29
Pirolisis	0.33	0.33	1.00	0.20	0.08	0.14	0.14
Total	1.67	4.33	7.00				

Nota: Fuente (Autor)

Tabla 26
Matriz de criterio de aspecto técnico.

Técnico							
	Incineración	Gasificación	Pirolisis	Matriz normalizada			Promedio
Incineración	1.00	5.00	5.00	0.71	0.71	0.71	0.71
Gasificación	0.20	1.00	1.00	0.14	0.14	0.14	0.14
Pirolisis	0.20	1.00	1.00	0.14	0.14	0.14	0.14
Total	1.40	7.00	7.00				

Nota: Fuente (Autor)

Tabla 27
Matriz de priorización.

Matriz de priorización					
	Bajo impacto ambiental	Economía (Bajo costo)	Eficiencia	Técnico	Priorización
Incineración	0.11	0.71	0.57	0.71	0.53
Gasificación	0.63	0.14	0.29	0.14	0.30
Pirolisis	0.26	0.14	0.14	0.14	0.18
Total	0.28	0.47	0.12	0.12	

Nota: Fuente (Autor)

Como resultado del análisis jerárquico conocido como (AHP), se infiere que la tecnología que arroja mejores resultados con respecto a los criterios que se consideraron relevantes para la evaluación es la tecnología de incineración.

La incineración de los residuos sólidos aporta una gran variedad de beneficios con respecto a la gestión de ellos mismos, la ventaja de esta tecnología es que reduce considerablemente el volumen de estos residuos, ya que cada vez se cuenta con menos espacio para su disposición, siendo esta una tecnología no tan compleja y con respecto a las otras dos es más económica.

4.3 Análisis del proceso de incineración para el aprovechamiento energético de los residuos.

En esta sección se analizan los datos recolectados en la tesis de pregrado desarrollada por (Moncada & Vacca, 2010) quienes estimaron la cantidad de residuos por día producidos en la ciudad de Ocaña. Estos valores representan un promedio de la producción de residuos a partir de una muestra representativa de los mismos. La Tabla 28 muestra la masa promedio de estos desechos estimada por (Moncada & Vacca, 2010).

Para los propósitos de este estudio, los residuos son utilizados como combustible mediante un proceso de incineración, lo que permite analizar las características de combustión. Materiales como metal, vidrios, y “otros” no fueron tomados en cuenta ya que no representan un aporte energético significativo.

Tabla 28
Cantidad de residuos producidos al día en Ocaña

Residuos sólidos municipales (kg/s)	
$m_{fw} = 0.4375$	Flujo másico residuos de comida
$m_{pl} = 0.10197$	Flujo másico plásticos
$m_{ht} = 0.06655$	Flujo másico papel Higiénico-Toallas
$m_{ca} = 0.02512$	Flujo másico cartón
$m_{tx} = 0.01725$	Flujo másico textiles
$m_{pa} = 0.01053$	Flujo másico papel
$m_{ch} = 0.00058$	Flujo másico caucho
$m_{ma} = 0.00521$	Flujo másico de madera
$m_{ic} = 0.00243$	Flujo másico Icopor
$m_{imput} = 0.6672$	Flujo total de los residuos solidos

Nota: Fuente (Autor)

Acorde a la Tabla 28 los residuos de comida corresponden al mayor porcentaje (65.58%) de la cantidad total de material desechable producido. Plástico corresponde al 15.29%, papel higiénico-toallas alcanzan un 9.975%. Así mismo, el cartón indica 3.765%, los textiles corresponden a 2.586%, el papel representa 1.578%, el caucho es 0.08693%, la madera tiene un 0.7809%, y, por último, el Icopor representa el 0.3642%.

Para cada uno de los residuos, se estimó con base en la literatura (Jarungthammachote & Dutta, 2007) la composición elemental y proximal la cual se puede ver reflejada en la Tabla 12. Basados en estos análisis, y considerando el porcentaje que cada residuo representa en la cantidad total de material, se desarrolló una composición equivalente de los residuos como se muestra en la Tabla 29. La caracterización fue desarrollada con base en los porcentajes de carbono (C), hidrogeno (H), oxígeno (O), azufre (S), nitrógeno (N), que contiene cada residuo. La muestra se normaliza para que la suma de C, H, N, S, O alcance el 100%.

Tabla 29
Porcentaje de composición química normalizada.

Elemento	Fracción másica
C_{eq}	0.5642
H_{eq}	0.08055
S_{eq}	0.3307
O_{eq}	0.02224
N_{eq}	0.00228

Nota: Fuente (Autor)

Para el análisis del proceso de combustión, se hace necesario conocer la masa molar Tabla 30 de los componentes para formar la molécula del combustible (Univeristarios et al., n.d.).

Tabla 30
Masa molar de los componentes.

Masa Molar de los componentes (kg/kmol)	
M_C	12.01
M_H	1.008
M_O	16
M_N	14.01
M_S	32.06

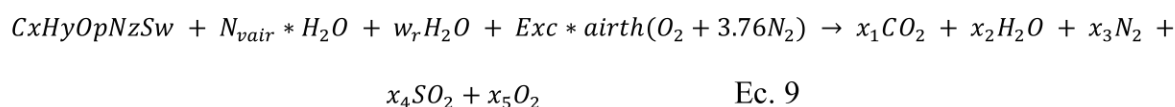
Nota: Fuente (Mendoza Zélis, 2020)

La combustión es la reacción química en la cual se oxida el combustible, en este caso los residuos sólidos, lo cual libera una gran cantidad de energía (Sataloff et al., 210 C.E.)

Para realizar el análisis de combustión teórica de los residuos sólidos municipales, se consideró un contenido de humedad del material del 5%, lo cual está acorde a lo reportado en la literatura, en la que se indican contenidos de humedad máximos permitidos entre el 25-30% para una incineración satisfactoria (Wajeetha A. Qazi & Abushammala, 2020). En el caso del oxidante, se consideró una humedad relativa del aire de 65%. Con base en las características de combustión, el exceso de aire suministrado a la cámara de combustión representó el de 80 a 100% (Sataloff et al., 210 C.E.).

A partir de la reacción de combustión planteada Ecuación 9, se realizó un balance de masa y energía para estimar la composición de los gases de combustión, así como la temperatura máxima alcanzada para las condiciones de operación definidas (Mendoza Zélis, 2020).

Reacción de combustión planteada:



La cantidad de átomos para la molécula $C_xH_yO_pN_zS_w$, la cual representa el combustible (residuos sólidos) se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 31
Cantidad de átomos por cada compuesto.

Cantidad de átomos	
$x = (C_{eq}/M_C)/(C_{eq}/M_C)$	1
$y = (H_{eq}/M_H)/(C_{eq}/M_C)$	1.701
$p = (O_{eq}/M_O)/(C_{eq}/M_C)$	0.44
$z = (N_{eq}/M_N)/(C_{eq}/M_C)$	0.0338
$w = (S_{eq}/M_S)/(C_{eq}/M_C)$	0.001513

Nota: Fuente (Autor)

En la Tabla 31, x es la cantidad de átomos que hay por cada compuesto de Carbono, y es la cantidad de átomos que hay por cada compuesto de Hidrogeno, z es la cantidad de átomos que hay por cada compuesto de Nitrogeno, w es la cantidad de átomos que hay por cada compuesto de Azufre, p es la cantidad de átomos que hay por cada compuesto de oxígeno.

De la reacción planteada, w_r corresponde al número de kmol de la humedad en los residuos, N_{vair} indica el valor de kmol de la humedad relativa, Exc es kmol del exceso de aire, $airth$ representa el número de kmol de aire estequiométrico, $CxHyOpNzSw$ representa la composición química total del combustible (residuos sólidos), x_1 representa el número de kmol de CO_2 , x_2 kmol de H_2O , x_3 kmol de N_2 , x_4 kmol de SO_2 , x_5 kmol de O_2 .

La relación aire-combustible real es un parámetro utilizado para cuantificar las cantidades de combustible y aire en el proceso de combustión. Este parámetro comúnmente se expresa en masa, por lo que determina la relación entre la masa del aire con respecto a la masa del combustible en el proceso de combustión (Mendoza Zélis, 2020).

Así mismo, es importante encontrar la relación aire combustible estequiométrica, la cual define la combustión completa del proceso analizado. Esta relación viene dada por la ecuación 10

$$AC_{stq} = ((airth * 4.76 * M_{air}) / M_{CxHyOpNzSw}) \text{ Ec. 10}$$

En donde AC_{stq} , es la relación aire combustible estequiométrica, $airth$ es el aire teórico, M_{air} es la masa molar del aire, $M_{CxHyOpNzSw}$ es la masa molar del combustible (residuos sólidos).

La masa molar del aire se encontró mediante la ecuación 11.

$$M_{air} = (0.21 * 2 * M_O) + (0.79 * 2 * M_N) \quad \text{Ec. 11}$$

La masa molar fue estimada mediante la ecuación 12:

$$M_{CxHyOpNzSw} = (M_C * x) + (M_H * y) + (M_O * p) + (M_N * z) + (M_S * w) \quad \text{Ec. 12}$$

Con base en estas ecuaciones, se realizó el cálculo de la relación aire-combustible real definida en la ecuación 13.

$$AC_{OP} = ((Exc * air_{th} * 4.76 * M_{air}) / M_{CxHyOpNzSw}) \quad \text{Ec. 13}$$

4.3.1 Estimación de la temperatura de combustión.

El poder calorífico del combustible, se conoce como la cantidad de calor que se libera cuando éste se quema por completo en un proceso de flujo estacionario, en el cual los productos vuelven al estado de los reactivos (Univeristarios et al., n.d.).

La combustión permite estimar la temperatura máxima que podría alcanzar el proceso. Para esto, es importante conocer el poder calorífico superior (*HHV*) de los residuos considerados. El *HHV* fue estimado mediante la ecuación 14 encontrado en la literatura (Jarungthammachote & Dutta, 2007).

$$HHV = \left((0.364 * C_{eq}) + (0.863 * H_{eq}) - (0.075 * O_{eq}) + (0.028 * N_{eq}) - (1.633 * S_{eq}) + (0.062 * 0) \right) * 100 \quad [MJ/kg] \quad \text{Ec. 14}$$

En donde C_{eq} , H_{eq} , O_{eq} , N_{eq} , y S_{eq} , representan la composición equivalente del Carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, y azufre de la mezcla de residuos estudiada.

Una vez calculado el HHV, se procede con el cálculo de la entalpía del combustible (h_{fuel}), la cual permite realizar el balance de energía sobre el proceso de combustión. La ecuación 15 permite el cálculo de la entalpía del combustible.

$$h_{fuel} = (HHV * 0.93 * M_{CxHyOpNzSw} * 1000[kJ/MJ]) + (x_1 * h_{formacion_{CO_2}}) + (x_2 * h_{formacion_{H_2O}}) + (x_3 * 0) + (x_4 * h_{formacion_{SO_2}}) \quad \text{Ec. 15}$$

El término $h_{formacion}$, se utiliza para representar la entalpía de formación del compuesto de interés. El valor de $h_{formacion}$ es necesario para completar el balance de energía definido mediante la ecuación 16. Esta ecuación permite encontrar la máxima temperatura que alcanza el proceso bajo las condiciones analizadas.

$$(x_1 * h_{CO_2}) + (x_2 * h_{H_2O}) + (x_3 * h_{N_2}) + (x_4 * h_{SO_2}) + (x_5 * h_{O_2}) = h_{fuel} + N_{vair} * h_{H_2O} + w_r * h_{H_2O} \quad \text{Ec. 16}$$

En donde h_{CO_2} , h_{H_2O} , h_{N_2} , h_{SO_2} , h_{O_2} y h_{H_2O} representan la entalpía total de cada uno de los compuestos de interés.

Del balance de energía desarrollado, la temperatura máxima alcanzada fue $T = 1150$ °K.

4.3.2 Parámetros derivados de la combustión de residuos sólidos urbanos.

Los datos mostrados en esta sección se derivan directamente de los resultados del modelo de combustión desarrollado en EES.

La Tabla 32 muestra la masa de aire y de combustible necesaria para la formación de los gases mencionados anteriormente.

Tabla 32
Masa del aire y del combustible.

Masa del aire y combustible <i>kg</i> para un kmol de combustible	
$Mass_{air} = AC_{op} * M_{CxHyOpNzSw}$	318.9
$Mass_{fuel} = M_{CxHyOpNzSw}$	21.29

Nota: Fuente (Autor)

La Tabla 33 muestra la masa de los gases de combustión formada a partir de la masa de combustible analizado en este estudio. Expresar de esta forma los gases permite variar estimar variaciones en la masa de los gases con el cambio de la masa de combustible quemado, estos resultados fueron derivados de la simulación realizada en Engineering Equation Solver (EES)

Tabla 33
Para una cantidad de residuos determinada la masa de los gases de combustión.

Masa de los gases de combustión (<i>kg</i>) por una cantidad de combustible dada	
$R_{CO_2} = \left(x_1 * \frac{MolarMass_{CO_2}}{Mass_{fuel}} \right) * m_{input}$	1.379
$R_{H_2O} = \left(x_2 * \frac{MolarMass_{H_2O}}{Mass_{fuel}} \right) * m_{input}$	0.6449
$R_{N_2} = \left(x_3 * \frac{MolarMass_{N_2}}{Mass_{fuel}} \right) * m_{input}$	7.68
$R_{SO_2} = \left(x_4 * \frac{MolarMass_{SO_2}}{Mass_{fuel}} \right) * m_{input}$	0.003239
$R_{O_2} = \left(x_5 * \frac{MolarMass_{O_2}}{Mass_{fuel}} \right) * m_{input}$	1.118
$m_{gcom} = R_{CO_2} + R_{H_2O} + R_{N_2} + R_{SO_2} + R_{O_2}$ [kg]	10.83

Nota: Fuente (Autor)

De la tabla anterior, m_{gcom} es la masa de los gases de combustión, m_{input} es el flujo de entrada del combustible (residuos sólidos), el cual se tomó como el flujo promedio producido en la ciudad de Ocaña por día de 0.6672 *kg/día*.

En la Tabla 34 se ve reflejada fracción molar y la presión de los gases de combustión, necesarios para la estimación del contenido de energía y exergía del proceso, siendo estos datos resultados de la simulación realizada en Engineering Equation Solver (EES).

Tabla 34
Presión de los gases de combustión y fracción molar.

Fracción Molar de los Productos		Presión de gases de combustión (kPa)	
$x_{CO_2} = (x_1)/(x_{total})$	0.08329	$P_{CO_2} = (x_{CO_2}) * P_o$	8.44
$x_{H_2O} = (x_2)/(x_{total})$	0.09513	$P_{H_2O} = (x_{H_2O}) * P_o$	9.639
$x_{SO_2} = (x_4)/(x_{total})$	0.000126	$P_{SO_2} = (x_{SO_2}) * P_o$	0.01277
$x_{N_2} = (x_3)/(x_{total})$	0.7286	$P_{N_2} = (x_{N_2}) * P_o$	73.82
$x_{O_2} = (x_5)/(x_{total})$	0.09288	$P_{O_2} = (x_{O_2}) * P_o$	9.411

Nota: Fuente (Autor)

La Tabla 35 muestra los valores de entalpía total y entropía de los compuestos de interés, derivados de la simulación en Engineering Equation Solver (EES).

Tabla 35
Entalpía y entropía de los gases de combustión

Entalpías gases de combustión en (kJ/kg)	Entropía de gases de combustión en (kJ/kg * K)
$h_{CO_2re} = -7994$	$s_{CO_2re} = 6.761$
$h_{H_2Ore} = -11626$	$s_{H_2Ore} = 14.33$
$h_{SO_2re} = -3969$	$s_{SO_2re} = 6.054$
$h_{N_2re} = 942.9$	$s_{N_2re} = 8.4$
$h_{O_2re} = 873.8$	$s_{O_2re} = 8.38$

Nota: Fuente (Autor)

La entalpía de los gases de combustión, definida como h_{FG200} en kW se estimó acorde a lo planteado en la ecuación 17:

$$h_{FG200} = ((h_{CO_2re}) * (R_{CO_2})) + ((h_{H_2Ore}) * (R_{H_2O})) + ((h_{SO_2re}) * (R_{SO_2})) + ((h_{N_2re}) * (R_{N_2})) + ((h_{O_2re}) * (R_{O_2})) \quad \text{Ec. 17}$$

$$h_{FG200} = -10319 \text{ kW}$$

Así mismo, La entropía de los gases de combustión (ecuación 18), definida como S_{FG200} kJ/s·K en kW se estimó como:

$$s_{FG200} = ((s_{CO_2re}) * (R_{CO_2})) + ((s_{H_2Ore}) * (R_{H_2O})) + ((s_{SO_2re}) * (R_{SO_2})) + ((s_{N_2re}) * (R_{N_2})) + ((s_{O_2re}) * (R_{O_2})) \quad \text{Ec. 18}$$

$$s_{FG200} = 92.47 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} * K$$

Para estimar la entropía de los gases de combustión en el estado de referencia, se hizo necesario calcular la cantidad de agua líquida formada a esta temperatura (Mendoza Zélis, 2020). Esto se hace considerando la presión de vapor de agua ($P_v = 3.1698 \text{ kPa}$) y aplicando la ecuación 19.

$$\left(\frac{x_{vapor}}{x_{gas}} \right) = \left(\frac{P_v}{P_o} \right) \quad \text{Ec. 19}$$

Para estas condiciones, la cantidad de vapor de agua en es $X_{vapor} = 0.3399 \text{ kmol}$, lo que implica que el agua restante está en fase líquida. Bajo estas restricciones, el total de compuestos en estado gaseoso a temperatura y presión de referencia es $x_{Totalgas} = 11.2 \text{ kmol}$.

En el estado de referencia, se produce un cambio en la fracción molar y en la presión parcial de los gases como lo muestra la Tabla 36 estos resultados son producto de la simulación en (EES).

Tabla 36
Presión parcial y fracción molar en estado de referencia.

Fracción molar a 25°C para los gases de combustión		Presión parcial de los gases de combustión (kPa)	
$x_{CO_2v} = (x_1)/(x_{totalvapor})$	0.08926	$P_{CO_2v} = (x_{CO_2v}) * P_o$	9.044
$x_{N_2v} = (x_3)/(x_{totalvapor})$	0.7807	$P_{N_2v} = (x_{N_2v}) * P_o$	79.11
$x_{SO_2v} = (x_4)/(x_{totalvapor})$	0.0001351	$P_{SO_2v} = (x_{SO_2v}) * P_o$	0.01369
$x_{O_2v} = (x_5)/(x_{totalvapor})$	0.09953	$P_{O_2v} = (x_{O_2v}) * P_o$	10.08
$x_{H_2Ov} = (x_{vapor})/(x_{totalvapor})$	0.03033	$P_{H_2Ov} = (x_{H_2Ov}) * P_o$	3.074

Nota: Fuente (Autor)

Con los datos reportados en la tabla anterior, se encuentra la entalpía y entropía en las fases (liquida y vapor) en el estado de referencia establecido.

$$h_{H_2Ol} = -285830 \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$$

$$h_{H_2Ol_{re}} = -15865 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$s_{H_2Ol} = 69.92 \left[\frac{kJ}{kmol} * K \right]$$

$$s_{H_2Ol_{re}} = 3.881 \left[\frac{kJ}{kg} * K \right]$$

La Tabla 37 muestra los valores individuales de entalpía y de entropía en el estado de referencia para cada uno de los gases de combustión considerados en este estudio, tomados de la simulación propuesta en el software Engineering Equation Solver (EES).

Tabla 37
Entropía y entalpía de los gases de combustión en estado de referencia.

Entropía de gases de combustión en (kJ/kg * K)	Entalpía en estado de referencia en (kJ/kg)
$s_{CO_2v_{re}} = 5.311$	$h_{CO_2v_{re}} = -8941$
$s_{N_2v_{re}} = 6.909$	$h_{N_2v_{re}} = 3.009 e^{-36}$
$s_{SO_2v_{re}} = 5.029$	$h_{SO_2v_{re}} = -4633$
$s_{O_2v_{re}} = 7.007$	$h_{O_2v_{re}} = 0$
$s_{H_2Ov_{re}} = 12.09$	$h_{H_2Ov_{re}} = -13422$

Nota: Fuente (Autor)

A partir de los datos de la tabla anterior, es posible estimar la entalpía (h_{REFGB}) y la entropía (s_{REFGB}) total de la mezcla de gases ideales considerada. Las ecuaciones 20 y 21 permiten realizar estos cálculos.

$$h_{REFGB} = ((h_{CO_2vre}) * (R_{CO_2})) + ((h_{H_2Ovre}) * (R_{H_2Ov})) + ((h_{H_2Oli}) * (R_{H_2Oli})) + ((h_{SO_2vre}) * (R_{SO_2})) + ((h_{N_2vre}) * (R_{N_2})) + ((h_{O_2vre}) * (R_{O_2})) \quad \text{Ec. 20}$$

$$h_{REFGB} = -22111 \text{ kW}$$

$$s_{REFGB} = ((s_{CO_2vre}) * (R_{CO_2})) + ((s_{H_2Ovre}) * (R_{H_2Ov})) + ((s_{H_2Oli}) * (R_{H_2Oli})) + ((s_{SO_2vre}) * (R_{SO_2})) + ((s_{N_2vre}) * (R_{N_2})) + ((s_{O_2vre}) * (R_{O_2})) \quad \text{Ec. 21}$$

$$s_{REFGB} = 72.32 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} * K$$

Una vez calculada la temperatura máxima del proceso, así como las propiedades características de los gases de combustión, se procede a analizar un ciclo Rankine en el cual se aproveche la energía de estos residuos sólidos para la producción de potencia eléctrica.

4.3.3 Simulación del Ciclo Rankine.

El ciclo Rankine de vapor es el ciclo de potencia más utilizado en la industria para la generación de energía eléctrica; sin embargo, tiene ciertas limitaciones en relación a la máxima temperatura que puede utilizarse en la turbina de vapor. Esta restricción se asocia a las propiedades metalúrgicas de este componente (Xin et al., 2020).

Validación

Para la validación de la simulación, se tomó el trabajo realizado por (Trindade et al., 2018), ya que, dentro de la literatura revisada, este fue uno de los artículos que más se ajustó para la realización del análisis comparativo entre las variables de salida del presente trabajo y el de

(Trindade et al., 2018), este análisis comparativo se basó en una simulación del programa

Engineering Equation Solver (EES).

La temperatura y presión del estado de referencia se ajustó en $T_0 = 25^\circ C$ y $P_0 = 101,325 kPa$. En la Tabla 38 se muestran los parámetros de operación empleados por (Trindade et al., 2018).

Tabla 38

Parámetros de operación del ciclo propuesto por (Trindade et al., 2018).

Corrientes	Flujo masico [kg/s]	Presión [kPa]	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropía [kJ/kg K]	Exergía [kW]
S0	40.312	111.000	25.000	298.425	6.834	325.689
S1	16.070	160.000	113.320	2,658.320	7.103	8,757.857
S10	0.000	111.000	373.045	656.321	7.627	0.000
S11	40.312	111.000	373.045	656.321	7.627	5,226.154
S12	41.364	110.878	760.000	1,308.483	8.100	18,838.461
S13	41.364	110.878	638.691	1,160.016	7.947	14,582.081
S14	41.364	110.878	510.361	1,007.032	7.767	10,483.276
S15	41.364	110.878	199.000	654.687	7.195	3,922.710
S16	16.070	4,162.000	113.772	480.267	1.457	811.238
S17	16.070	4,162.000	203.691	869.907	2.365	2,719.721
S18	151.944	4,162.000	252.697	1,098.931	2.818	39,999.535
S19	151.944	4,162.000	252.697	1,303.060	3.206	53,429.851
S2	14.062	160.000	113.320	2,658.320	7.103	7,663.268
S20	16.070	4,162.000	252.697	2,800.003	6.053	16,067.496
S21	16.070	4,162.000	385.256	3,176.306	6.697	19,030.725
S22	16.070	4,162.000	420.001	3,258.929	6.819	19,772.498
S23	711.015	101.000	25.000	104.920	0.367	0.000
S24	711.015	101.000	35.002	146.642	0.505	419.711
S3	14.062	7.000	39.025	2,275.973	7.327	1,351.302
S4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S5	14.062	7.000	39.025	163.351	0.559	16.002
S6	14.062	160.000	39.034	163.495	0.559	17.498
S7	2.009	160.000	113.320	2,658.320	7.103	1,094.589
S8	16.070	160.000	113.320	475.473	1.455	741.357
S9	40.312	111.000	373.045	656.321	7.627	5,226.154

Nota: Fuente (Trindade et al., 2018)

Con el propósito de la validación, se ajustó el modelo a los parámetros del trabajo de (Trindade et al., 2018). La ecuación 22 y 23 fueron empleadas para calcular la exergía de las corrientes, ya que este el parámetro comparado en el proceso de validación.

$$e_x = e_{ph} + e_{ch} \quad \text{Ec. 22}$$

$$e_{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad \text{Ec. 23}$$

$$e_{ch} H_2O = 173.2 \text{ kJ/kg}$$

En la Figura 7, se muestra el comparativo entre el flujo exergético de las corrientes del sistema propuesto por (Trindade et al., 2018) y aquellos obtenidos en el presente trabajo, los cuales son productos de la simulación realizada en Engineering Equation Solver (EES).

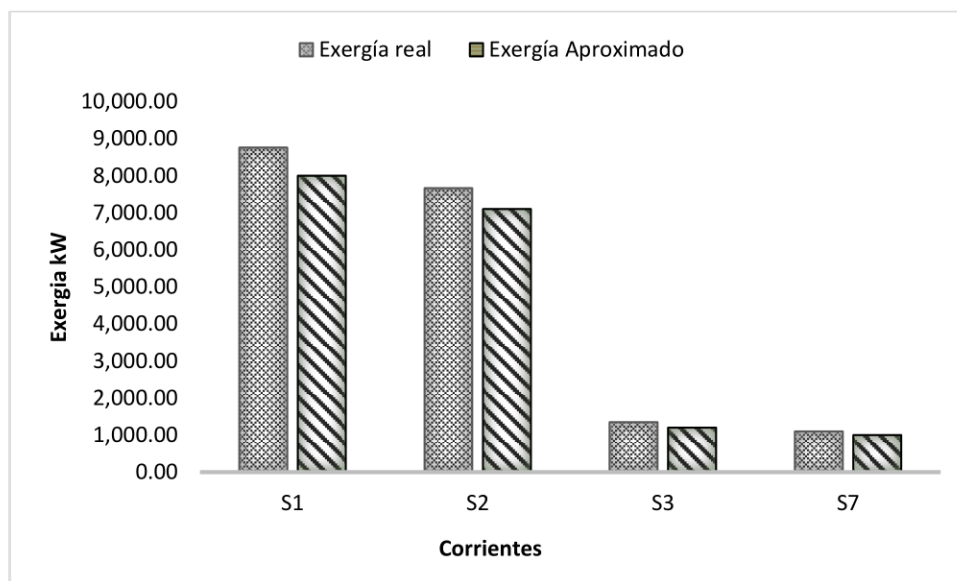


Figura 7. Exergía

Fuente: (Autor)

Mediante la ecuación 24 se calcula el error relativo entre el resultado de flujo exergético de las corrientes del trabajo de (Trindade et al., 2018) y aquellos obtenidos con la simulación del presente trabajo.

De acuerdo a la Figura 8, se puede apreciar que, el error relativo se encuentra en alrededor del 10%, lo que significa que la simulación desarrollada predice adecuadamente las variables consideradas para el desarrollo del trabajo de investigación.

$$error_{relativo} = \frac{|Ex_{Real} - Ex_{Aprox}|}{Ex_{Real}} * 100\% \quad \text{Ec. 24}$$

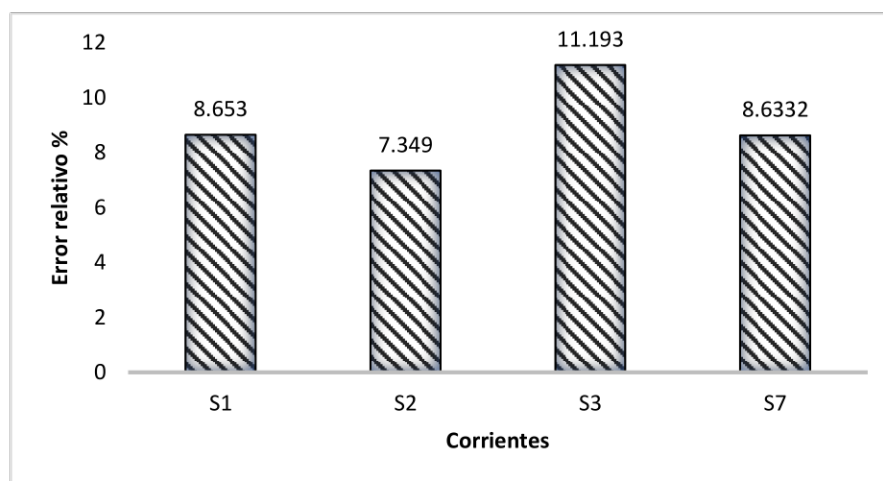


Figura 8. Error relativo

Fuente: (Autor)

A continuación, se presenta el ciclo Rankine propuesto a partir de la validación anterior, la Figura 9. Representa el modelo. En el desarrollo de este ciclo, una serie de validaciones con base en la primera y segunda ley de la termodinámica permitieron proponer las condiciones de operación Tabla 39 de cada uno de los componentes mostrados en esta figura, los cuales fueron simulados en Engineering Equation Solver (EES), ya que cuenta con propiedades termodinámicas que nos permiten un mejor desarrollo.

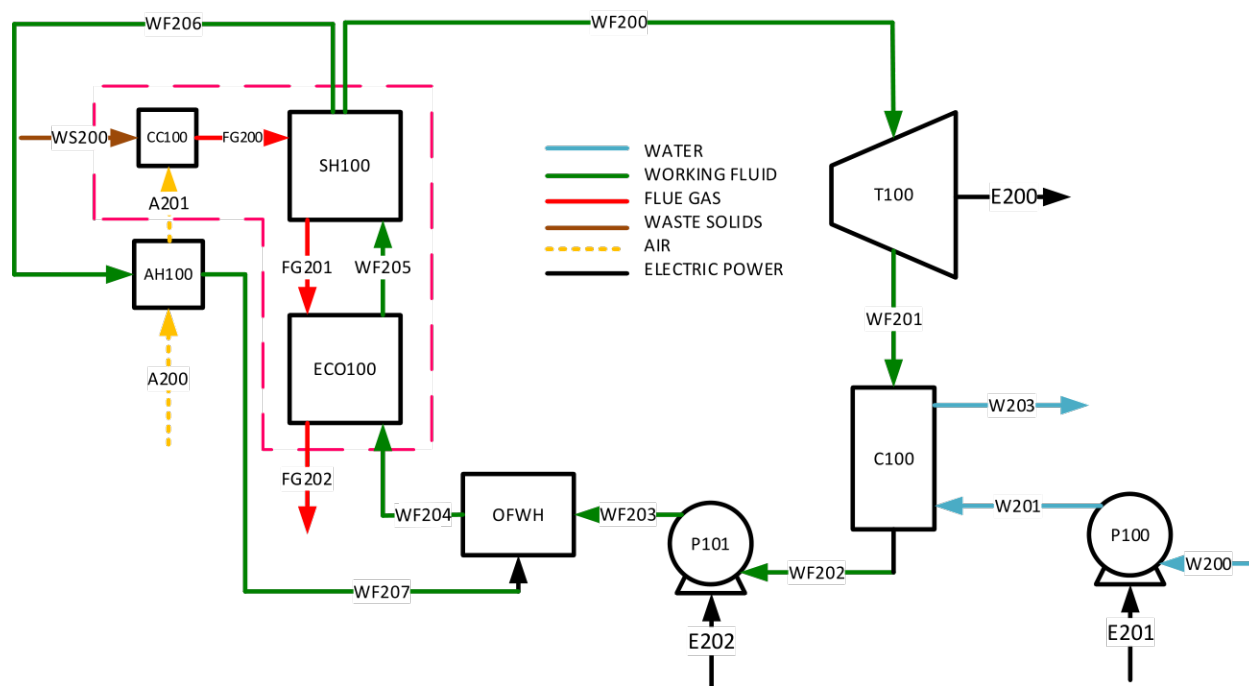


Figura 9. Ciclo Rankine propuesto.

Fuente: (Autor)

Tabla 39

Parámetros de operación del ciclo Rankine

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura de referencia del fluido de trabajo T_{OW}	298	$^{\circ}K$
Presión de referencia del fluido de trabajo P_{OW}	101.325	kPa
Caudal másico del fluido de trabajo m_W	2.088	Kg/seg
Temperatura de referencia de los gases de combustión T_{OGB}	298	$^{\circ}K$
Presión de referencia de los gases de combustión T_{OW}	101.325	kPa
Caudal másico de los gases de combustión m_{GB}	10.66	Kg/seg
Temperatura de referencia del aire de calentamiento T_{OA}	298	$^{\circ}K$
Presión de referencia del aire de calentamiento P_{OA}	101.325	kPa
Caudal masico de agua de enfriamiento m_A	10	Kg/seg
Temperatura de referencia de agua de enfriamiento T_{OAF}	298	$^{\circ}K$
Presión de referencia de agua de enfriamiento P_{OAF}	101.325	kPa
Caudal másico de agua de enfriamiento m_{WF}	16	Kg/seg
Presión entrada del sobrecalentador P_{FG200}	101.325	kPa
Temperatura entrada del sobrecalentador T_{FG200}	1150	$^{\circ}K$
Presión de condensación P_{WF201}	120	kPa
Temperatura entrada de la turbina T_{WF200}	863	$^{\circ}K$
Presión entrada a la turbina P_{WF200}	4000	kPa

Nota: Fuente (Autor)

El modelo matemático del ciclo Rankine se fundamenta en la primera ley y la segunda ley de la termodinámica, para validación de estos datos se utilizó el programa, EES (Engineering Equation Solver) el cual tiene una base de datos termodinámica amplia.

El sistema de incineración se compone principalmente de nueve partes, cámara de combustión (CC1), calentador de aire (AH100), sobrecalentador (SH100), economizador (ECO100), turbina (T100), condensador (C100), bomba de agua de enfriamiento (P100), bomba (P101), calentador (OFWH), como se visualiza en la siguiente imagen.

En cualquier ciclo Rankine, la eficiencia térmica depende directamente del fluido de trabajo que se utiliza en el proceso. El agua es el fluido más utilizado porque es abundante y económico, con baja toxicidad, es químicamente estable, es baja en corrosión, y, además, tiene un bajo impacto en el medio ambiente. Así mismo, el agua tiene un cambio relativamente grande de entalpia dependiendo de las condiciones de operación.

A partir de lo mostrado en la Figura 9, el funcionamiento del ciclo de la planta de operación propuesta es la siguiente: En la cámara de combustión entran los residuos sólidos que representan el combustible (WS100). Por otro lado, entra aire a un calentador (AH100) a temperatura ambiente, el cual produce un incremento de la temperatura del aire y lo dirige a la cámara de combustión (CC100).

El fluido de trabajo sale de la bomba (P101) y entra al economizador (ECO), donde será calentado por los gases de escape. El agua sale del economizador y entra al sobrecalentador

(SH100) donde la temperatura se eleva por los gases de escape. Una parte del vapor sobrecalentado entra en el precalentador de aire (AH100) e ingresa al calentador abierto (OFWH) para intercambiar calor con el aire de la corriente (FG200), la cual ingresa a la caldera con una alta temperatura. Parte del vapor sobrecalentado producido entra en la turbina (T100), donde se expande hasta alcanzar una baja presión y se dirige al condensador (C100). Este dispositivo es un intercambiador de calor que retira calor a la corriente para que el fluido de trabajo retorne a sus condiciones iniciales. El intercambio de calor se produce por la introducción de agua de enfriamiento bombeada por (P100) desde un suministro de agua. La energía captada en el condensador se expulsa hacia la atmosfera. Bajo estas condiciones, el fluido de trabajo sale del condensador como liquido saturado y entra en la bomba, lo que completa el ciclo. En este estudio se consideró que no hay caída de presión en el condensador, ni en la caldera. Esta última se compone del sobrecalentador y el economizador.

En la caldera, el paso de los gases ocurre de la siguiente manera: los gases de escape salen de la cámara de combustión (CC100) y entran en el sobrecalentador (SH100) para intercambiar calor con el vapor procedente de la caldera. Después de pasar por el sobrecalentador los gases entran en el economizador (ECO100) para intercambiar calor con el agua que sale de la Bomba (P201), posteriormente, los gases de escape se liberan a la atmósfera a una temperatura más baja (FG202).

Las tablas muestran las propiedades estimadas para cada uno de los flujos que componen el ciclo Rankine. A continuación, se muestra los estados de referencia del sistema, tomados de la simulación realizada en (EES).

Tabla 40
Propiedades de referencia

Estados	Presión (kPa)	Temperatura (°K)	Entalpia h_0 (kJ/kg)	Entropía s_0 (kJ/kg * K)
REF-WATER	101.325	298	104.8	6.61
REFGC	101.325	298	-22111	72.32
REF-AIRE	101.325	298	298.6	5.695

Nota: Fuente (Autor)

A partir de la simulación realizada en Engineering Equation Solver (EES), se calcularon las propiedades de los flujos principales de la planta, los resultados se muestran en la Tabla 41.

Tabla 41
Propiedades de cada una de las corrientes del ciclo Rankine propuesto.

Corrientes	Flujo masico (kg/s)	Presión (kPa)	Temperatura (°K)	Entalpia (kJ/kg) $\Delta h = h - h_0$	Entropía (kJ/kg*K) $\Delta s = s - s_0$
WF200	2.08	4000	863	3636.3038	7.214
WF201	2.088	120	381.16	2690.7038	7.214
W200	16	101.325	298	0.0038	0.001
W201	16	200	273.2	0.0038	0
W203	16	200	365	303.2038	0.9169
WF202	2.088	120	379.166	368.2038	1.09137
WF203	2.088	4000	273.9	373.8038	1.09364
WF204	2.61	4000	377	361.5038	1.06112
WF205	2.61	4000	523	2258.50	4.91911
WF206	2.602	4000	863	3636.3038	7.21465
WF207	0.522	4000	863	3636.3038	7.21465
WF208	0.522	4000	363	312.3038	0.92871
A200	10	101.325	303	5.06671	0.26854
A201	10	101.325	473	178.016	0.27542
FG200	10.66	101.325	1150	1051.61331	1.6412
FG201	10.66	101.325	873	714.48	1.3062
FG202	10.66	101.325	463	250.34	0.59278
WS200	0.6672	101.325	298	0	0

Nota: Fuente (Autor)

Los principales resultados obtenidos se presentan en la Tabla 42, derivados de la simulación Engineering Equation Solver (EES).

Tabla 42
Trabajo consumido de bombas y producido de la turbina

trabajo de la turbina y las bombas	
w_{tur}	$= 1974 [kW]$ "E200"
w_{bom1}	$= 2.2 [kW]$ "E201"
w_{bom2}	$= 12 [kW]$ "E202"

Nota: Fuente Autor

4.4 Análisis termoeconómico

A continuación, se muestra las herramientas necesarias para realizar un análisis termoeconómico de un ciclo Rankine en el proceso de aprovechamiento de calor residual en un proceso de producción de energía eléctrica, el cual tiene como base el término exergía, que se refiere a la calidad y cantidad de energía aprovechable de cierto flujo. En esta sección se evalúa cuál es el flujo exergético y la exergía destruida en el proceso, posteriormente se hace un análisis de costos termoeconómicos, y, de esta manera se obtiene un balance muchos más completo a lo que se hace habitualmente usando solo la economía (Dincer & Bicer, 2020).

Para facilitar en cierta manera el análisis de los datos de las corrientes del sistema se hace uso del álgebra matricial, asociando las matrices adecuadas para cada sistema y haciendo las consideraciones correctas es posible facilitar los cálculos. Es importante ejecutar este tipo de análisis, ya que muchas veces se hace una inversión de un proyecto sólo con base a lo económico o termodinámico, por esta razón, muchas veces existe desperdicio de recursos energéticos, que podrían tener un potencial energético aprovechable (García, 2015).

Principalmente se debe saber que la exergía física es el trabajo máximo aprovechable, el cual se puede determinar con los valores de entalpía y entropía de las corrientes del sistema, tanto en su

estado genérico, como en estado de referencia, en este caso temperatura y presión al ambiente (es decir, con la simulación del proceso) (Jesús & Mosquera, 2012). La exergía física (E_{ph}) está dada por la ecuación 25. De esta ecuación, los términos h , h_o , s y s_o representan respectivamente los valores de entalpía y de entropía en el estado actual (h, s) y en el estado de referencia (h_o, s_o).

$$E_{ph} = h - h_o - T_0(s - s_o) \quad \text{Ec. 25}$$

Considerando el estado ambiente a $T_0 = 25^\circ\text{C}$ y $P_0 = 101 \text{ kpa}$ y el siguiente ciclo Rankine los datos de la exergía física se muestran en la Tabla 43, producto de la simulación realizada en (EES)

Tabla 43
Exergía física de cada corriente.

Exergía física de cada flujo kW
$E_{ph_{WS200}} = 703.9$
$E_{ph_{FG200}} = -5628$
$E_{ph_{FG201}} = -8158$
$E_{ph_{FG202}} = -10839$
$E_{ph_{WF200}} = 3092$
$E_{ph_{WF201}} = 1129$
$E_{ph_{WF202}} = 89.51$
$E_{ph_{W203}} = 479.4$
$E_{ph_{W201}} = 0.06619$
$E_{ph_{W200}} = 0.06619$
$E_{ph_{WF203}} = 100$
$E_{ph_{WF204}} = 118.2$
$E_{ph_{WF205}} = 2069$
$E_{ph_{WF206}} = 775.9$
$E_{ph_{WF207}} = 18.55$
$E_{ph_{A200}} = -763.2$
$E_{ph_{A201}} = 951.1$

Nota: Fuente (Autor)

En donde h_o, s_o esta dado por la temperatura y presión al ambiente

4.4.1 La exergía del trabajo.

Es la interacción de trabajo en términos de energía, la cual es equivalente al valor de exergía. Por esta razón, la cantidad de exergía de un flujo de trabajo (E_W) es la cantidad de trabajo (\dot{W}) producido de este flujo, definido mediante la ecuación 26. La Tabla 44 muestra los resultados de la exergía del trabajo.

$$E_W = \dot{W} \quad \text{Ec. 26}$$

Tabla 44
Exergía de trabajo del ciclo.

Exergía del trabajo W (kW)
$E_{W_{E200}} = 1974$
$E_{W_{E201}} = 2.2$
$E_{W_{E202}} = 12$

Nota: Fuente (Autor)

4.4.2 la exergía química.

Se considera cuando hay reacciones químicas, o cambios de composición, en el sistema estudiado. Para estimar este parámetro, se usó la ecuación 27. La Tabla 45 muestra los resultados obtenidos para los flujos de gases de combustión del proceso de incineración.

$$\dot{E}x_{ch} = M \sum_i X_i * ex_{ch,i} + RT_0 X_i * \ln (X_i) \quad \text{Ec. 27}$$

En donde

M , Representa la masa molar de compuesto

x_i , representa la fracción molar del compuesto de interés

$ex_{ch,i}$, exergía química estándar, de acuerdo a un nivel de referencia

R Constante universal de los gases

T_o Temperatura de referencia

$\ln(x_i)$ Representa logaritmo de la fracción molar

Tabla 45

Exergía química de los gases de combustión.

Compuesto	Masa molar (M)	Fracción molar x_i	Ech estándar	$Xi * exch, i$	$RToXi \ln(Xi)$	Exch(kJ /kmol)
H_2O	18	0.09513	11710	1113.9723	-554.772	559.199
N_2	28	0.72860	720	524.592	-571.883	-47.291
O_2	32	0.09288	3970	368.7336	-547.162	-178.428
CO_2	44	0.08329	20140	1677.4606	-513.167	1164.292
SO_2	64.08	0.000126	303500	38.241	-2.80462	35.436

Nota: Fuente (Autor)

$$Exch_{total} = 1533.208 \text{ (kJ/kmol)}$$

$$Exch_{total} = 53.32 \text{ (kJ/kg)}$$

$Exch_{total}$, representa la exergía química total de los gases de combustión.

En el caso del sistema donde se tiene agua en estado líquido, la exergía química de este fluido viene dada por los siguientes valores:

$$Ex \text{ Química } H_2O = 173.2 \text{ kJ/kg}$$

La exergía química del aire se representa igual en el caso de los gases de combustión

Tabla 46

Exergía química del aire.

Compuesto	Masa molar (M)	Fracción molar x_i	Ech estándar	$Xi * exch, i$	$RToXi \ln(Xi)$	Exch(kJ /kmol)
N_2	28	0.72860	720	524.592	-571.883	-47.291
O_2	32	0.09288	3970	368.7336	-547.162	-178.428

Nota: Fuente (Autor)

$$Exch_{totalAir} = 128.433049 \text{ (kJ/kmol)}$$

$$Exch_{totalAir} = 4.45329729 \text{ kJ/kg}$$

La exergía química de los residuos sólidos (combustible) del sistema está dado por el poder calorífico inferior HHV. Esto es:

$$HHV = 24700 \text{ KJ/kg}$$

$$Ex_{fuel} = 24500 \text{ kJ/kg}$$

En la ecuación 28 se puede ver reflejado que la exergía total de un flujo o corriente está dada por la suma de la exergía física más la exergía química. Esto considerando los flujos correspondientes.

$$ExT = \dot{E}x_{ch} + E_{ph} \quad \text{Ec. 28}$$

La Tabla 47 muestra los resultados del flujo de exergía para cada uno de los flujos de interés de este estudio.

Tabla 47
Exergía total de cada una de las corrientes.

Exergía total de cada flujo (kW)
$ExT_{WS200} = 17179$
$ExT_{FG200} = -5060$
$ExT_{FG201} = -7590$
$ExT_{FG202} = -10271$
$ExT_{WF200} = 3452$
$ExT_{WF201} = 1491$
$ExT_{WF202} = 451.2$
$ExT_{W203} = 461.6$
$ExT_{W201} = 2771$
$ExT_{W200} = 2771$
$ExT_{WF203} = 3251$

$$ExT_{WF204} = 570.2$$

$$ExT_{WF205} = 2521$$

$$ExT_{WF206} = 866.3$$

$$ExT_{WF207} = 109$$

$$ExT_{A200} = -718.7$$

$$ExT_{A201} = 995.6$$

Nota: Fuente (Autor)

Para estimar la exergía destruida del sistema, se realiza una matriz de incidencia la cual se representa como $A(m \times n)$, cuyas columnas relacionan los equipos asociados al proceso, las filas corresponden a los diferentes flujos que tiene el sistema. Esta matriz multiplica a un vector de exergía $B(n)$, lo que permite obtener la exergía destruida (Bdi) como se muestra en la ecuación 29 (Querol et al., 2013).

$$A(m \times n) \cdot B(n) = Bdi \quad \text{Ec. 29}$$

4.4.3 Matriz de incidencia.

La matriz de incidencia Figura 10 representa la realidad física de un sistema, y debe completarse considerando todos los flujos identificados en el proceso (Querol et al., 2013). Para asignar los valores de la matriz de incidencia, se debe considerar lo siguiente:

- +1 para los flujos que entran en un equipo.
- 1 para los flujos que salen de un equipo.
- 0 si el flujo no afecta a un equipo.

		$A(m \times n)$														$B(n)$	$A(m \times n) \cdot B(n) = Bdi$	
		Corrientes																
		E200	W203	W200	E201	E202	WF203	WF204	WF200	WF206	WF207	A200	WS200	A201	FG202	1974		
Equipos	A	-1	-1	1	1	1	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	3251	X_{desA}	
	B	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	2771	X_{desB}	
	C	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	1	1	-1	461.6	X_{desC}
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	-1	0	570.2	X_{desD}
																4331		
																866.3		
																-718.7		
																17179		
																995.6		
																-10271		

Figura 10. Matriz de incidencia.

Fuente: (Autor)

$$X_{desA} = 551 \text{ kW}$$

$$X_{desB} = 758 \text{ kW}$$

$$X_{desC} = 21233 \text{ kW}$$

$$X_{desD} = 1750 \text{ kW}$$

Los datos arrojados por la matriz de incidencia es la exergía destruida de cada uno de los dispositivos agrupados, los cuales operan a unas condiciones establecidas. De esta manera, es posible visualizar la energía que se está desperdiciando en el sistema y esto permitiría analizar los resultados para darle un mayor provecho (González del Regueral, 2005).

Una vez realizada la matriz de incidencia, se realiza el análisis de los costos termo-económicos; sin embargo, antes de esto se deben analizar los intercambiadores de calor, los cuales se representan como: C100, SH100, ECO100, AH100. Para el análisis se consideran las

corrientes que entran desde el exterior de la frontera, para luego hallar el área de transferencia del calor, y posteriormente calcular costos para la adquisición y mantenimiento de dichos equipos.

En la estimación del área de transferencia de calor, es necesario aplicar el método de la diferencia de temperatura media logarítmica (LTMD). Esto es válido así se conoce la temperatura media logarítmica (ΔT_{ml}), los flujos masicos de los fluidos de trabajo y si se conoce el calor total. Estos valores son tomados del análisis termodinámico que se realizó del sistema. Este método resulta adecuado para determinar el tamaño de los intercambiadores de calor (Incropera et al., 2014).

4.4.4 Intercambiadores de calor a contraflujo.

La Figura 11 muestra un esquema general para un intercambiador de calor a contraflujo.

Para aplicar el método descrito anteriormente se consideran los siguientes pasos:

- Seleccionar el tipo de intercambiador de calor apropiador para la aplicación, en este caso para sobrecalentador (SH100), economizador (ECO100), condensador (C1009), calentador de aire (AH100).

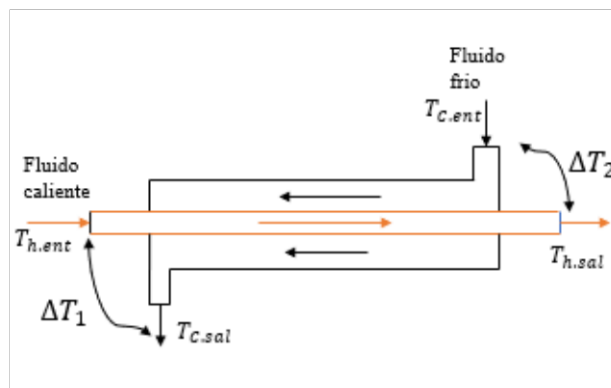


Figura 11. Intercambiador de calor a contraflujo.

Fuente: (Autor)

- Determinar las temperaturas de entrada y salida del flujo caliente y del frío, por otro lado, terminado la razón de transferencia de calor por medio de un balance de energía.

$$\Delta T_1 = T_{h,ent} - T_{c,sal} \quad \text{Ec. 30}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,sal} - T_{c,ent} \quad \text{Ec. 31}$$

$$\dot{Q} = m_c * c_{pc}(T_{c,sal} - T_{c,ent}) \quad \text{Ec. 32}$$

$$\dot{Q} = m_h * c_{ph}(T_{h,ent} - T_{h,sal}) \quad \text{Ec. 33}$$

En donde:

$m_c, m_h =$ gastos de masa

$c_{pc}, c_{ph} =$ calores específicos

$T_{c,sal}, T_{h,sal} =$ temperaturas de salida

$T_{c,ent}, T_{h,ent} =$ temperaturas de entrada

- Calcular la temperatura media logarítmica, la cual es la forma apropiada de encontrar la diferencia promedio de las temperaturas, para realizar el análisis del intercambiador de calor.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad \text{Ec. 34}$$

- Seleccionar el coeficiente de transferencia de calor global del intercambiador de calor, encontrado en la literatura.

$$\dot{Q} = U * A * \Delta T_{ml} \quad \text{Ec. 35}$$

$$U = 850 \frac{W}{m^2 * ^\circ K}$$

Donde, U es el coeficiente de transferencia de calor global del intercambiador de calor, A es el área de transferencia de calor.

- Calcular el área de transferencia de calor

$$\dot{A} = \frac{Q}{U * \Delta T_{ml}}$$

La Tabla 48 muestra los resultados obtenidos para el área de transferencia de calor de los intercambiadores evaluados.

Tabla 48
Áreas de intercambiador de calor.

Áreas de los intercambiadores de calor (m²)
C100= 148.653
ECO100= 41.5102
SH100= 10.9168
AH100=15.0342

Nota: Fuente (Autor)

Una vez realizado el análisis de los intercambiadores, es posible conocer el área de transferencia del calor y con ella cotizar el valor de cada uno en el mercado.

4.4.5 Análisis para los costos termo-económicos.

Un análisis económico, busca encontrar los costos en pesos por segundo de producción de cada corriente del sistema, pero es necesario conocer de antemano los costos de adquisición, mantenimiento y operación de cada equipo. De esta manera, es necesario hacer una evaluación para tal fin (Querol et al., 2013), a continuación, se hace énfasis en dicho proceso.

4.4.5.1 Costos de adquisición de equipos (PCE)

Con la siguiente tabla se cotizan los costos para cada dispositivo.

Tabla 49
Costos de adquisición de equipos.

Equipos	Tamaño	R	Costo
Turbina	0.1 KW	0.73	500
HE	0.12 m ²	0.69	304
Bomba	0.3 KW	0.45	1000

Nota: Fuente (Querol et al., 2013)

Se utiliza la ecuación 38 para hallar el costo de cada equipo, siendo la variable “a” el equipo del ciclo (Turbina, Bomba, Condensador, Caldera) y la variable “b” perteneciente a los valores de la tabla anterior que dependen del valor de cada equipo en el mercado. Los resultados derivados de aplicar la ecuación 33 se muestran en la Tabla 50.

$$\text{costo } a = \text{costo } b \left(\frac{\text{Producto } a}{\text{Producto } b} \right)^R \quad \text{Ec. 38}$$

Tabla 50
Costos de adquisición de los equipos establecidos.

Costos de adquisición de equipos USD
$PEC_{T100} = 832684$
$PEC_{P100} = 2451$
$PEC_{P101} = 5259$
$PEC_{C100} = 41404$
$PEC_{ECO100} = 17170$
$PEC_{SH100} = 6832$
$PEC_{AH100} = 8520$
$PEC_{total} = 914320$

Nota: Fuente (Autor)

4.4.5.2 Costos de instalación de equipos (TCI)

Los costos de instalación están dados por un factor de instalación (λ) y su producto con el PCE (costo de adquisición del equipo), si se conoce el factor Tabla 51 es posible calcular el (TCI), para este estudio, se tomó un valor de $\lambda = 4.74$.

Tabla 51
Factor lang.

Descripción	Plantas de procesos	Plantas de procesos	Plantas de procesos de
	solidos	fluidos-solidos	fluidos
Factor Lang	3.10	3.63	4.74

Nota: Fuente (Querol et al., 2013)

$$\lambda = \frac{TCI}{PCE} \quad \text{Ec. 39}$$

$$TCI = \lambda * PCE$$

La Tabla 52 muestra el TCI para cada uno de los equipos considerados en este estudio.

Tabla 52
Inversión de capital de cada uno de los dispositivos.

<u>Inversión de capital total USD</u>
$TCI_{T100} = 3946922.16$
$TCI_{P100} = 11619$
$TCI_{P101} = 24929$
$TCI_{C100} = 196253$
$TCI_{ECO100} = 81385$
$TCI_{SH100} = 32382$
$TCI_{AH100} = 40383$
$TCI_{total} = 4333876.8$

Nota: Fuente (Autor)

4.4.5.3 Costo equivalente anualizado (A_{TOT})

Una vez estimada la inversión total, se calcula el costo anualizado. Este valor depende del TCI, el interés anual (i) y la vida estimada del equipo (n) (Querol et al., 2013).

Para un interés de 7% anual y una vida estimada de 20 años para todos los equipos, se utiliza la ecuación 40 y posteriormente la ecuación 41.

$$\frac{A}{Pi,n} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad \text{Ec. 40}$$

A_{TOT} : es el coste anualizado equivalente expresado en dólares por año.

TCI_{total} : es la inversión total expresada en dólares

$\frac{A}{Pi,n}$: es el factor de recuperación de capital, en el que i es el coste de capital en tanto por uno y

n la vida prevista de la planta.

$$A_{TOT} = TCI_{total} * \left(\frac{A}{Pi,n}\right) \quad \text{Ec. 41}$$

$$A_{TOT} = 409087 \text{ USD /año}$$

4.4.5.4 Costo de operación y mantenimiento (OM_{TOT})

El costo de mantenimiento de una planta de generación de energía se puede considerar como el 2 y el 10% de la inversión total. Un valor de 6% puede ser una estimación inicial razonable (Querol et al., 2013). El costo asociado al mantenimiento se estima mediante la ecuación 37.

$$M_{TOT} = (6\% \text{ Anual})(TCI_{TOTAL}) \quad \text{Ec. 42}$$

$$M_{TOT} = 260032 \text{ USD/año}$$

El costo de operación se basa en la cantidad de personas necesarias para operar el dispositivo y el tiempo que trabajará al año, así como el salario considerado para dicha labor (Querol et al., 2013), y se calcula mediante la ecuación 43.

$$n_p = \frac{24^{h/dia} * 7^{dia/sem} * 4^{emple/puesto}}{38^{h/sem * puesto}} \quad \text{Ec. 43}$$

$$n_p = \frac{24^{h/dia} * 7^{dia/sem} * 4^{emple/puesto}}{38^{h/sem * puesto}}$$

$$n_p = 18 \text{ empleados}$$

Con el número de empleados establecidos, se calculan los costos de operación (O)

$$O = s * n_p * t \quad \text{Ec. 44}$$

En donde:

$s = 700 \text{ USD}$, representa el salario para cada empleado

$t = 12 \text{ meses}$, representa el tiempo de trabajo

$n_p = 18$, representa el total de empleados

$$O = 151200 \text{ USD/año}$$

Por lo tanto, el coste anualizado equivalente es de 889989 USD /año. Considerando el costo de operación y mantenimiento se calcula el coste fijo anual total definido como:

$$FC_{TOT} = A_{TOT} + O \cdot M_{TOT} \quad \text{Ec. 45}$$

$$FC_{TOT} = 820320 \text{ USD/año}$$

El costo fijo anual total de la planta es de 820320 USD/ año. Por lo tanto, el costo fijo anual del equipo “i” este dado por la siguiente ecuación:

$$FC_i = FC_{TOT} \left(\frac{PECi}{PEC_{TOT}} \right) \quad \text{Ec. 46}$$

Los resultados de los costos fijos de cada equipo se muestran en la Tabla 53.

Tabla 53
Costos fijos.

Costos fijos de los equipos de la planta expresados en USD/año

$$FCi_{T100} = 747077$$

$$FCi_{P100} = 2199$$

$$FCi_{P101} = 4719$$

$$FCi_{C100} = 7644$$

$$FCi_{ECO100} = 15405$$

$$FCi_{SH100} = 6129$$

$$FCi_{AH100} = 7644$$

Nota: Fuente (Autor)

Los valores obtenidos son costos anuales. Con éstos, se puede obtener el flujo de costos fijos de cada equipo, dividiendo el costo fijo anual de cada equipo entre el tiempo de operación anual a plena potencia por año. En este caso será expresado en seg/año, para lo cual se considera una disponibilidad del 70 % (Ecuación 47).

$$OT = 365 \text{días/año} * 24 \text{h/día} * 3600 \text{seg/1h} * 0.70 \quad \text{Ec. 47}$$

$$OT = 22075 \text{seg/año}$$

Donde OT es el tiempo de funcionamiento anual, generalmente expresado en seg/año. En este caso, la ecuación 48 muestra la forma de expresar los costos fijos en USD/seg. Los resultados derivados de este análisis se muestran en la Tabla 54.

$$Zi = \frac{FCi}{OT} \quad \text{Ec. 48}$$

Tabla 54
Costos fijos de los equipos en USD/s.

Costes fijos de los equipos de la planta expresados en USD/s
$Z_{T100} = 0.03384$
$Z_{P100} = 0.00009962$
$Z_{P101} = 0.0002138$
$Z_{C100} = 0.001683$
$Z_{ECO100} = 0.0006978$
$Z_{SH100} = 0.0002777$
$Z_{AH100} = 0.0003463$

Nota: Fuente (Autor)

La Figura 12 muestra la forma en la que se realizó el agrupamiento de los equipos y corrientes para el desarrollo del análisis termoeconómico.

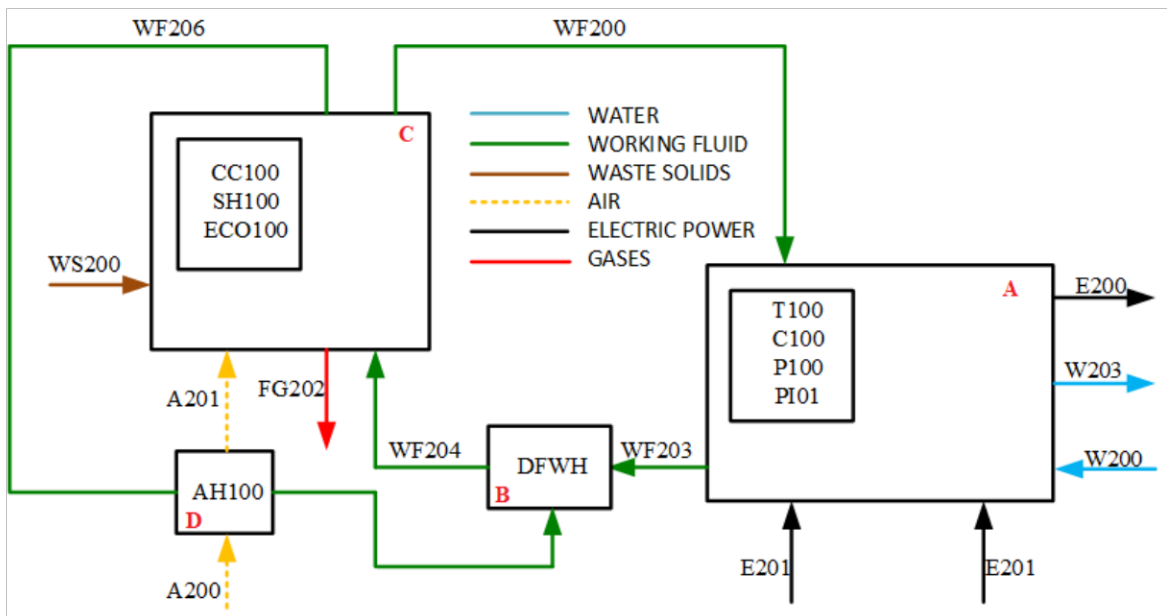


Figura 12. Sistema agrupado.

Fuente: (Autor)

$$Z_A = Z_{T100} + Z_{P100} + Z_{P101} + Z_{C100} \quad \text{Ec. 49}$$

$$Z_A = 0.03584 \frac{USD}{seg}$$

$$Z_C = Z_{ECO100} + Z_{SH100} \quad \text{Ec. 50}$$

$$Z_C = 0.0009755 \frac{USD}{seg}$$

$$Z_D = Z_{AH100}$$

$$Z_D = 0.0003463 \frac{USD}{seg}$$

Costo del calentador de agua de alimentación

El costo de este equipo se tomó de la literatura (Jesús & Mosquera, 2012), ya que no se cuenta con datos suficientes para encontrarlo. En este caso se consideró un calentador estándar.

$$Z_B = 0.0035711 \frac{USD}{seg}$$

Costo del combustible

En este caso el combustible del sistema son los residuos sólidos municipales de la ciudad de Ocaña, no quiere decir que sean gratuitos. Por esta razón se tiene en cuenta la información brindada por la entidad de servicios públicos de Ocaña (ESPO), en el cual se tiene en cuenta el costo de acopio y transporte de los residuos. Así mismo, se consideró la muestra que se tomó para hacer la aproximación de cuántos residuos se producen en Ocaña por día. Bajo estas consideraciones, el costo de los residuos $\varphi_{WASTE} = 0.000052 \frac{USD}{seg}$.

Costo del fluido de trabajo (Agua)

Bajo las suposiciones realizadas, el costo del agua es $\varphi_{AGUA} = 0.004564 \text{ USD/s}$.

4.5.6 Matriz de costo termoeconómico

Al igual que en el caso del balance de coste exergético, hay que determinar la matriz de costos. Figura 13 la cual está formada por la matriz de incidencia. Ésta consta de una matriz de 14 filas y 4 columnas; sin embargo, esta matriz debe ser ampliada considerando 3 entradas al sistema (recursos), 2 salidas del sistema (residuos) y 5 bifurcaciones.

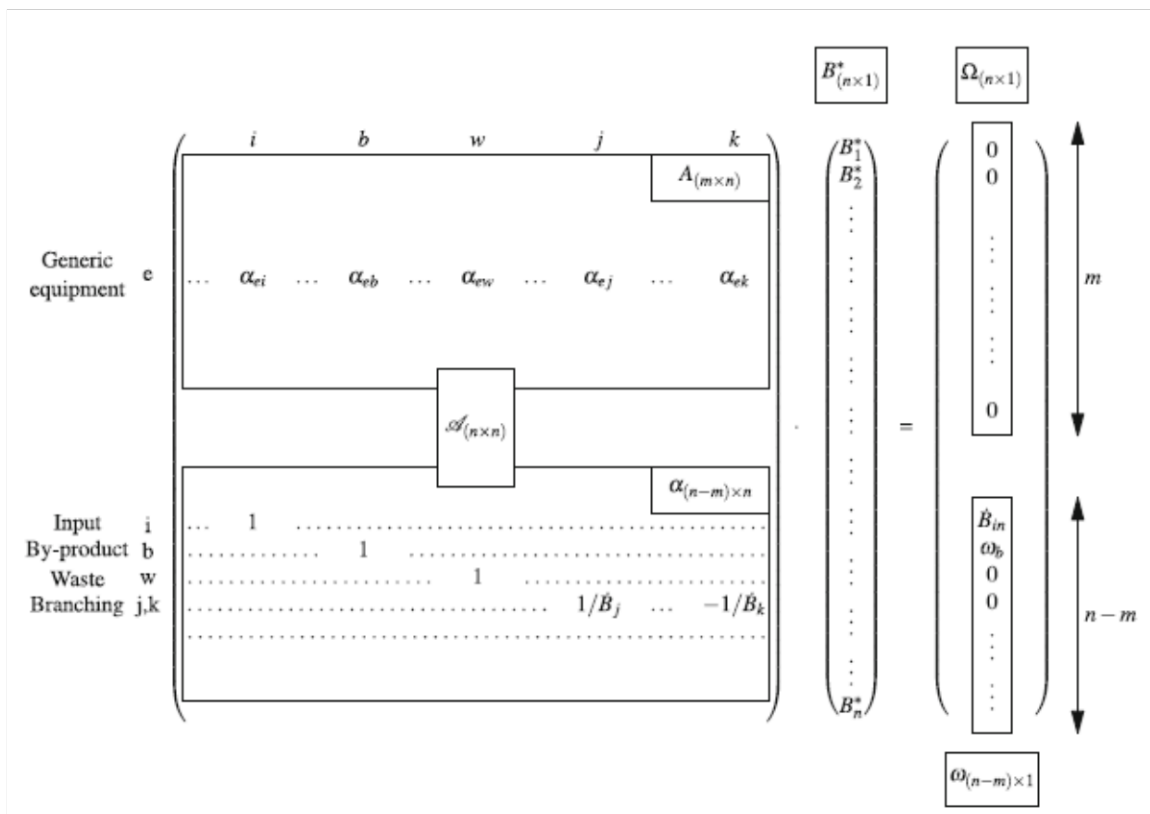


Figura 13. Matriz de costos exergéticos.

Fuente: (Querol et al., 2013)

Con el concepto de matriz exergética, de igual forma que la matriz termoeconómica, el cual se define una matriz $\alpha(n - m) \times n$, cuyas filas tendrán todos los elementos cero, excluyendo los siguientes términos:

- Entradas, el cual se le asigna un valor 1 para cada elemento que, al equipo, y -1 a la corriente que sale del dispositivo y 0 a la corriente que no interfiere en el dispositivo
- Recursos. Valor 1 para cada elemento que entra al sistema
- Residuos. Valor 1 para cada elemento que sale del sistema
- Bifurcaciones. Valor +1/ \dot{B}_j en la columna correspondiente a la corriente j y valor -1/ \dot{B}_k en la columna correspondiente al flujo k

La matriz termoeconómica está dada por las siguientes ecuaciones:

$$\alpha(n - m) \times n \cdot \Pi(n \times 1) = \varphi(n - m) \times 1 \quad \text{Ec. 51}$$

$$A_{(m \times n)} * \pi_{(n \times 1)} + Z_{(m \times 1)} = 0_{(m \times 1)} \quad \text{Ec. 52}$$

$$\alpha_{(n-m) \times n} * \pi_{(n \times 1)} - \phi_{(n-m)} = 0_{(n-m) \times 1} \quad \text{Ec. 53}$$

Expresión matricial:

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} * \pi + \begin{bmatrix} Z \\ -\phi \end{bmatrix}$$

En donde $\varphi(n - m) \times 1$ se define como el vector de costos termoeconómicos, cuyos elementos tienen los siguientes valores:

- Productos: φ_{in}
- Residuos: 0
- Derivaciones: 0

En este estudio, la Matriz obtenida de los costos termoeconómicos en cada corriente del sistema se muestra en la Figura 14

		$\alpha(n-m) \times n$													$\pi(n \times 1)$	$\varphi(n-m) \times 1$	
		Corrientes															
		E200	W203	W200	E201	E202	WF203	WF204	WF200	WF206	WF207	A200	WS200	A201	FG202		
Equipos	A	-1	-1	1	1	1	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	π_{E200}	-0.03585
	B	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	π_{W203}	-0.0035711
	C	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	1	1	-1	π_{W200}	-0.0009755
	D	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	-1	0	π_{E201}	-0.0003463
Residuos Recursos	W200	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	π_{E202}	0.004564
	A200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	π_{WF203}	0
	WS200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	π_{WF204}	0.000052
	W203	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	π_{WF200}	0
Bifurcaciones	FG202	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	π_{WF206}	0
	E200-E201	0.000507	0	0	-0.4545	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	π_{WF207}	0
	E200-E202	0.000507	0	0	0	-0.083	0	0	0	0	0	0	0	0	0	π_{A200}	0
	E200-WF203	0.000507	0	0	0	0	-0.00217	0	0	0	0	0	0	0	0	π_{WS200}	0
	WF207-A201	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00115	0	0	-0.001004	0	π_{A201}	0
	WF200-WF206	0	0	0	0	0	0	0	0.00029	-0.000231	0	0	0	0	0	π_{FG202}	0

Figura 14. Matriz de costos termoeconómicos.

Fuente: (Autor)

Operando la Matriz se obtuvieron los siguientes resultados Tabla 55 para cada uno de los costos termoeconómicos del ciclo:

Tabla 55
Datos de los costó termoeconómicos de cada corriente.

costos termo económicos	
USD/seg	COP/seg
$\pi_{E200} = 0.0457$	$\pi_{E200} = 166.74$
$\pi_{W203} = 0$	$\pi_{W203} = 0$
$\pi_{W200} = 0.0046$	$\pi_{W200} = 16.72$
$\pi_{E201} = 0.0001$	$\pi_{E201} = 0.36$
$\pi_{E202} = 0.0003$	$\pi_{E202} = 1.09$
$\pi_{WF203} = 0.0107$	$\pi_{WF203} = 38.90$
$\pi_{WF204} = 0.0235$	$\pi_{WF204} = 85.43$
$\pi_{WF200} = 0.0156$	$\pi_{WF200} = 56.71$
$\pi_{WF206} = 0.0196$	$\pi_{WF206} = 71.25$
$\pi_{WF207} = 0.0093$	$\pi_{WF207} = 33.81$
$\pi_{A200} = 0$	$\pi_{A200} = 0$
$\pi_{WS200} = 0.0001$	$\pi_{WS200} = 0.036$
$\pi_{A201} = 0.0107$	$\pi_{A201} = 38.90$
$\pi_{FG202} = 0$	$\pi_{FG202} = 0$

Nota: Fuente (Autor)

Una vez obtenidos los resultados de los costos termoeconómicos se pudo comprobar que con las propiedades en cada una de las corrientes que intervienen en el ciclo. Operando en esas

mismas condiciones se pudo llegar a un costo de generación de potencia de manera accesible y de forma viable y factible a implementar para la producción de energía.

Para hallar el costo de generación de potencia, se utilizó el costo termoeconómico que hace referencia a la corriente E200 $\pi_1 = 0.0457 \frac{USD}{seg}$.

$$GP = \frac{\pi_1}{wtur} \quad \text{Ec. 54}$$

$$GP = \frac{164.52 \frac{USD}{h}}{1974 kW}$$

$$GP = 0.08334 \frac{USD}{kWh}$$

4.4.7 Escenario de los costos termoeconómicos.

Costo de mantenimiento

En la Figura 15 se evidencia la variación de los costos cuando el porcentaje de costo de mantenimiento con respecto a la inversión total es más baja o alta que la que se tomó de referencia de 6%. la gráfica muestra los resultados en forma de diagrama de barras para una mejor visualización.

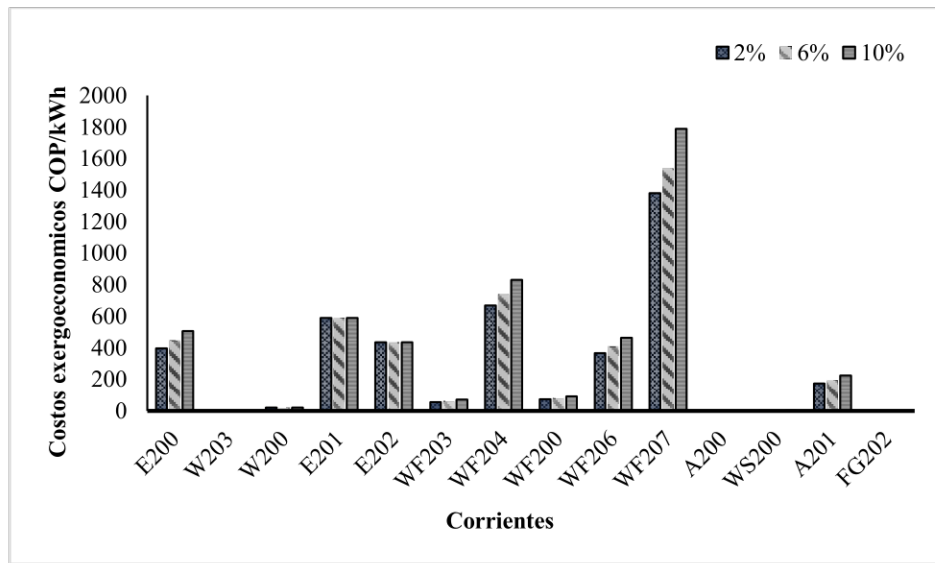


Figura 15. Variación costo de mantenimiento

Fuente: (Autor)

La variación del interés efectivo anual se muestra en la Figura 16. En este caso se evaluaron posibles escenarios para analizar el comportamiento del proceso.

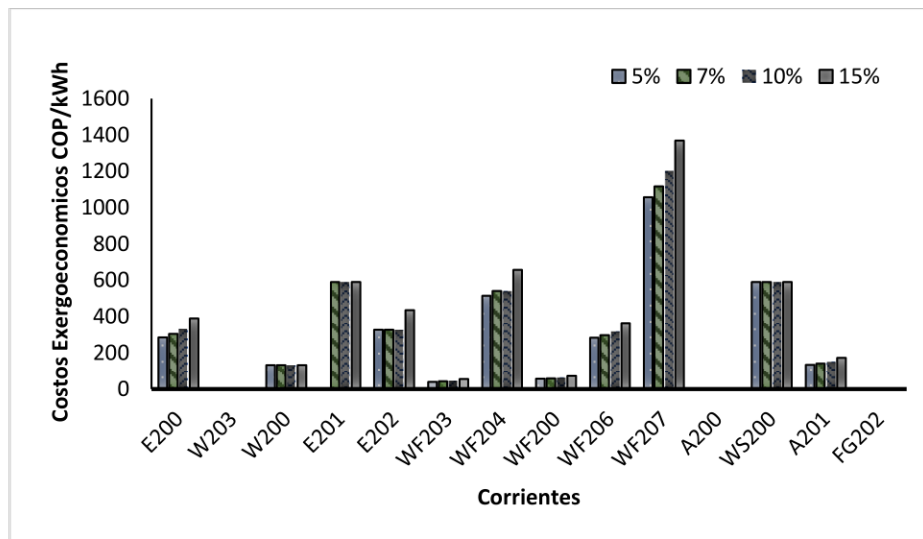


Figura 16. Variación interés anual

Fuente: (Autor)

Al realizar una variación de la vida útil de los equipos se obtiene los resultados mostrados en la Figura 17.

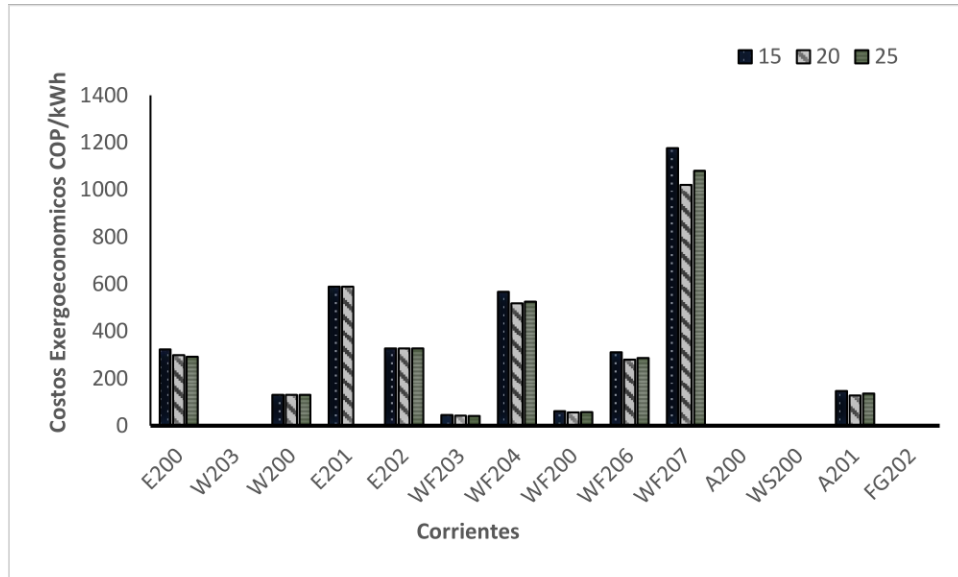


Figura 17. Variación vida útil de los equipos

Fuente: (Autor)

4.5 Análisis de resultados

Los resultados anteriores nos brindan un mayor panorama con respecto a los costos exergoeconomicos del sistema y como ciertos parámetros influyen notablemente en estos mismo.

Se evaluó una variación de los costos de mantenimiento, el interés anual y la vida útil de los equipos, al hacer esto se pudo evidenciar que al ser mayor la vida útil de los equipos el costo de generación de potencia va hacer más bajo.

Por otro lado, al evaluar en un rango de 2 al 10%, se evidencia que al ser mayor este costo de mantenimiento tiene una gran influencia en el costo de generación de potencia el cual va aumentando.

Al igual que en el escenario anterior se puede evidenciar que al aumentar el interés anualizado de la inversión inicial, influye que los costos se más altos y que a su vez la generación de potencia aumente, por esta razón se recomienda un interés bajo

Conclusiones

A partir de la información reportadas en distintas fuentes de información, se logró una estimación de la cantidad de residuos sólidos que se producen en Ocaña. Con esto, puede inferirse que en Ocaña se cuenta con una gran cantidad de residuos con potencial energético que pueden ser utilizados para generación de energía eléctrica. Con respecto a las tecnologías de aprovechamiento energético a partir de residuos sólidos, se puede decir que incineración es la mejor en los aspectos: económicos, técnicos y eficiencia, ya que se considera como una tecnología madura, que lleva mucho tiempo implementándose con buenos resultados y no está en fase experimental como pirolisis y gasificación.

Para la evaluación del sistema propuesto de incineración con un ciclo Rankine, se consideró datos reportados en la literatura, en los cuales, ajustados a nuestros parámetros de operación, se logró obtener una generación de potencia 1974 kW, lo cual se puede evidenciar que es un dato que a comparación de artículos reportado está en esos rangos, considerando que se cuenta con un flujo masico de residuos bajo.

Del análisis termoeconómico se infiere que existen ciertos factores que pueden influenciar en términos de costos de equipos y flujos como lo son, costos de residuos, costos de mantenimiento, interés anual, vida útil del equipo, dicho eso se concluye que la generación de potencia de la turbina es de 300 COP/kWh, lo cual es económico, en relación a los costos que actualmente maneja la empresa que provee el fluido eléctrico al municipio de Ocaña.

Referencias

- Abdallah, M., Arab, M., Shabib, A., El-Sherbiny, R., & El-Sheltawy, S. (2020). Characterization and sustainable management strategies of municipal solid waste in Egypt. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(6), 1371–1383.
<https://doi.org/10.1007/s10098-020-01877-0>
- Alejandro, J., & Sepúlveda, M. (2016). *Outlook of Municipal Solid Waste in Bogota (Colombia)*. April. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2016>.
- Alzate Arias, S., Restrepo-Cuestas, B., & Jaramillo-Duque, Á. (2018). Electricity generation potential from solid waste in three Colombian municipalities. *TecnoLógicas*, 21(42), 111–128. <https://doi.org/10.22430/22565337.782>
- Armando Cid. (2016). *Generación De Energía Eléctrica a Partir De Residuos Armando Tomás Cid Coffré Profesor Guía : Luis Vargas Díaz Miembros De La Comisión :*
- Aruldoss, M. (2013). A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. *American Journal of Information Systems*, 1(1), 31–43.
<https://doi.org/10.12691/ajis-1-1-5>
- August; Bonmatí, X. G. (2008). Conceptos Generales Sobre Residuos. *Evaluación y Prevención de Riesgos Ambientales En Centroamérica*, 207–213.
http://www.creaf.uab.es/propies/pilar/LibroRiesgos/08_capitulo7.pdf
- Bello, M. D. E., & R, L. A. R. (2014). *Plan De Gesti Ó N Integral De Residuos S Ó Lidos*. 1–154.
- Beltran, A. C. M. R. A. M. Q. C. (2017). *Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2017 Informe de Disposición Final de*.
<https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/>

2018/Dic/2._disposicion_final_de_residuos_solidos_-_informe_2017.pdf

Bernal, S. (2018). *Modelo Multicriterio Aplicado a la Toma de Decisiones representables en Diagramas de Ishikawa*. 137.

Carlos Fernandez Collado, P. B. L. (2014). *Metodologia de la investigacion* (6 edicion).

Castells, X. E. (2005). TRATAMIENTO Y VALORACION ENERGETICA DE RESIDUOS. In *Sereal Untuk* (Diaz De Sa).

<https://books.google.com.ni/books?id=qYmL8Q10TYcC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Channiwala, S. A., & Parikh, P. P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81(8), 1051–1063.

[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)

Colomer Mendoza, F. J., Gallardo Izquierdo, A., Arias Aguilar, D., & Campos Rodríguez, R. (2019). Aprovechamiento energético de residuos sólidos. In *Aprovechamiento energético de residuos sólidos*. <https://doi.org/10.6035/mediambient.2019.10>

Cristina Sampaio Machado, T., Rogerio Pinheiro, P., & Tamanini, I. (2012). Towards the Selection of Prototypes for Educational Tools: A Hybrid Model in the Verbal Decision Analysis. *International Journal of Information Science*, 2(3), 23–32.

<https://doi.org/10.5923/j.ijis.20120203.04>

de Castro, M., & Urios, V. (2016). A critical review of multi-criteria decision making in protected areas. *Economia Agraria y Recursos Naturales*, 16(2), 89–109.

<https://doi.org/10.7201/earn.2016.02.04>

Dincer, I., & Bicer, Y. (2020). Fundamentals of energy systems. In *Integrated Energy Systems for Multigeneration*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809943-8.00002-9>

- Eboh, F. C., Ahlström, P., & Richards, T. (2016). Estimating the specific chemical exergy of municipal solid waste. *Energy Science and Engineering*, 4(3), 217–231.
<https://doi.org/10.1002/ese3.121>
- El Manejo Integral*. (2018).
- Escobar, J., Mambeli, R., Martínez, A. M., Melo, A., Rúa-Orozco, D., & Silva, E. (2015). Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos. *Bioenergía: Fuentes, Conversión y Sustentabilidad*, January 2017, 275–296.
- Feo, D., Cuella, E., Pérez, M., Rubiano, J., & Valencia, J. (2012). *Energía de la basura*. 118–125.
- Fin, P., M^a, T., Rodríguez, C., Proyecto, D. D. E. L., Proyecto, E. L., Proyecto, L. D. E. L., La, C. D. E., & Energética, D. (n.d.). *Proyecto Fin De Carrera*.
<http://docplayer.es/3758361-Proyecto-fin-de-carrera.html>
- Flores, C. B. (2009). La problemática de los desechos sólidos The solid waste problem. *Economía*, 27, 121–144. <http://www.redalyc.org/pdf/1956/195614958006.pdf>
- Fullana Belda, C., & Urquía Grande, E. (2009). Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinar de investigación. *Encuentros Multidisciplinares*, 11(32), 37–48.
<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3023238&info=resumen&idioma=SPA>
- García, J. A. J. (2015). Análisis exergénico y termoeconómico de un sistema de generación de energía. Estudio del caso del generador de vapor de 350 MW instalado en la central termoeléctrica “Villa de Reyes.” In *Universidad Autónoma del Estado de México*.
- González del Regueral, B. (2005). Análisis Exergético y Evaluación Termoeconómica de

un ciclo combinado de generación eléctrica.

Http://Topografia.Montes.Upm.Es/Informacion/Sig/Mde/Index.Html.

Huancas, T., Diego, J., & Asenjo, T. (2019). “ *PEDRO RUIZ GALLO* ” Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica “ *Estudio de factibilidad de una central térmica que aproveche la biomasa residual de Chiclayo* ” UNIVERSIDAD NACIONAL “ *PEDRO RUIZ GALLO* ” Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica “ *Estud.* UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO” Facultad.

Huber, F., Korotenko, E., Šyc, M., & Fellner, J. (2020). Material and chemical composition of municipal solid waste incineration bottom ash fractions with different densities. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 0123456789.
<https://doi.org/10.1007/s10163-020-01109-z>

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2014). *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa* (P. Hall (Ed.)).

Jarunghammachote, S., & Dutta, A. (2007). Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy*, 32(9), 1660–1669.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.010>

Jato-Espino, D., Castillo-Lopez, E., Rodriguez-Hernandez, J., & Canteras-Jordana, J. C. (2014). A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 45, 151–162.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.013>

Jesús, M. De, & Mosquera, M. (2012). *Análisis exergetico de un ciclo combinado en una planta industrial*. 1–187.

Machado, T. C. S., Pinheiro, P. R., & Tamanini, I. (2014). OrclassWeb: A tool based on the

- classification methodology ORCLASS from verbal decision analysis framework.
Mathematical Problems in Engineering, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/238168>
- 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(April), 102161. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102161>
- Making, M. D., Making, M. D., & Mcdm, F. (n.d.). *F o r e w o r d. Mcdm.*
- Martínez Gómez, J., Chérrez Troya, M., Llanes Cedeño, E. A., & Peralta Zurita, D. (2018). Métodos multicriterio aplicados en la selección de un material para discos de freno. *Ingenius*, 20, 83–95. <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.08>
- Mendoza Zélis, L. A. (2020). Termodinámica. *Termodinámica*. <https://doi.org/10.35537/10915/68983>
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010). Decreto 2820 de 2010. Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. *República de Colombia*, 32. http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_2820_2010.pdf
- Moncada, C., & Vacca, J. (2010). *Universidad Francisco de Paula Santander*. 109. https://www.academia.edu/31615930/BOMBAS_CENTRIFUGAS_CONECTADAS_EN_SERIE_Y_EN_PARALELO
- 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>

- Moshkovich, H., Mechitov, A., & Olson, D. (2016). Verbal decision analysis. *International Series in Operations Research and Management Science*, 233, 605–636.
https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_15
- Mukherjee, C., Denney, J., Mbonimpa, E. G., Slagley, J., & Bhowmik, R. (2020). A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119(March 2019), 109512.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512>
- Murphy, J. D., & McKeogh, E. (2004). Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste. *Renewable Energy*, 29(7), 1043–1057.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.12.002>
- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., & Gross, T. (2017). Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de RSU. In *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)*. <https://www.giz.de/en/downloads/Guia GIZ 2017 WasteToEnergy - SP.pdf>
- Neehaul, N., Jeetah, P., & Deenapanray, P. (2020). Energy recovery from municipal solid waste in Mauritius: Opportunities and challenges. *Environmental Development*, 33(September 2018), 100489. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.100489>
- Ossa, D. A., Aristizábal, A. J., & Ospina, D. (2020). Comprehensive analysis of solid waste for energy projects in Colombia. *Engineering Journal*, 24(1), 35–52.
<https://doi.org/10.4186/ej.2020.24.1.35>
- Panepinto, D., & Zanetti, M. C. (2018). Municipal solid waste incineration plant: A multi-step approach to the evaluation of an energy-recovery configuration. *Waste Management*, 73, 332–341. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.036>

- Parashar, C. K., Das, P., Samanta, S., Ganguly, A., & Chatterjee, P. K. (2020). Municipal Solid Wastes—A Promising Sustainable Source of Energy: A Review on Different Waste-to-Energy Conversion Technologies. In *Energy Recovery Processes from Wastes*. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9228-4_13
- Prabir Basu. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design*. Elsevier Inc. All rights reserved. No.
- Qazi, W. A., & Abushammala, M. F. M. (2020). The analysis of electricity production and greenhouse-gas emission reduction from municipal solid waste sector in Oman. *International Journal of Environmental Science and Technology, Alsabbagh 2019*. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02871-1>
- Qazi, Wajeeha A., & Abushammala, M. F. M. (2020). Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies. In *Waste-to-Energy*. INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816394-8.00010-0>
- Querol, E., Gonzalez-Regueral, B., & Perez-Benedito, J. L. (2013). *Enfoque Práctico de Exergía y Análisis Termoeconómico de Procesos Industriales*. <http://www.springer.com/series/8903>
- Restrepo V., Á., León Fernández, Á., & Grajales, V. (2007). Estudio y analisis de estrategias de ahorro de energía usando el software ees (engineering equation solver) para la empresa frigorifico de pereira s.a. *Scientia et Technica*, 2(34), 183–188. <https://doi.org/10.22517/23447214.5585>
- Saaty, T. L. (2012). How to make a decision. *International Series in Operations Research and Management Science*, 175, 1–21. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6_1
- San Cristóbal, J. R. (2011). Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable

- energy project in Spain: The Vikor method. *Renewable Energy*, 36(2), 498–502.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.031>
- Sataloff, R. T., Johns, M. M., & Kost, K. M. (210 C.E.). *Combustion and Incineration Processes*.
- Shi, H., Mahinpey, N., Aqsha, A., & Silbermann, R. (2016). Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. *Waste Management*, 48, 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.036>
- Steinvorth Álvarez, A. (2014). Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada. *Cegesti*, 253, 4.
- 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>
- Trindade, A. B., Palacio, J. C. E., González, A. M., Rúa Orozco, D. J., Lora, E. E. S., Renó, M. L. G., & del Olmo, O. A. (2018). Advanced exergy analysis and environmental assessment of the steam cycle of an incineration system of municipal solid waste with energy recovery. *Energy Conversion and Management*, 157(December 2017), 195–214. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.083>
- Tun, M. M., Palacky, P., Juchelkova, D., & Sítař, V. (2020). Renewable waste-to-energy in southeast Asia: Status, challenges, opportunities, and selection of waste-to-energy technologies. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(20), 1–28.
<https://doi.org/10.3390/app10207312>
- Univeristarios, L., De, Y. S., Libros, M. D. E. E., Solucionarios, L. O. S., Los, C. T., Libro,

- E. D. E. L., Explicados, R. Y., Clara, D. E. F., Para, V., & Gratis, D. (n.d.). *Moran Shapiro*.
- UPME. (2015). Plan Energetico Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. *Unidad de Planeación Minero Energética, Republica de Colombia*, 184.
http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf
- Velasquez, M., & Hester, P. (2013). An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*, 10(2), 56–66.
- Xin, T., Xu, C., & Yang, Y. (2020). A general and simple method for evaluating the performance of the modified steam Rankine cycle: Thermal cycle splitting analytical method. *Energy Conversion and Management*, 210(January), 112712.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112712>
- Yaman, C., Anil, I., & Alagha, O. (2020). Potential for greenhouse gas reduction and energy recovery from MSW through different waste management technologies. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121432.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121432>
- Yevseyeva, I. (2007). *Solving classification problems with multicriteria decision aiding approaches*.
- Young, G. C. (2010). Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes. In *Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes*.
<https://doi.org/10.1002/9780470608616>
- Zulia, U., Urdaneta, G., Joheni, A., & Zulia, U. (2006). Omnia. *Choice Reviews Online*, 44(03), 44-1347-44–1347. <https://doi.org/10.5860/choice.44-1347>

Apéndices

Apéndice 1 .Método de decisión multicriterio

Métodos de decisión multicriterio	Descripción	Ventajas	Desventajas
Técnica simple de clasificación de multiatributos (SMART)	SMART es una de las formas más simples de MAUT. Requiere dos supuestos a saber, independencia de la utilidad e independencia preferente. Este método convierte convenientemente los pesos de importancia en números reales.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Es simple de usar y que realmente permite cualquier tipo de técnicas de asignación de peso (es decir, relativo, absoluto, etc.). 2. Requiere menos esfuerzo por decisión que MAUT. 3. También maneja bien los datos bajo cada criterio. 	El procedimiento para determinar la labor no es conveniente teniendo en cuenta el complicado marco
MACBETH	El objetivo de MACBETH es medir el atractivo de un conjunto de alternativas a través de una técnica de evaluación basada en categorías. Usa juicios cualitativos de las diferencias en el atractivo para generar puntajes de valor para las alternativas. Lingüísticas y valores numéricos.	MACBETH no permite que exista ningún tipo de inconsistencia a diferencia de AHP	MACBETH, se permite indicar e introducir en la matriz de comparación dos valores de referencia (normalmente muy bueno y muy malo) a los que se le asigna una valoración. Esto provoca que la suma de los pesos de la matriz de comparación, generalmente, no sea igual a la unidad.

Apéndice 2. Método de decisión multicriterio (continuación)

Métodos de decisión multicriterio	Descripción	Ventajas	Desventajas
Proceso de jerarquía analítica (AHP)	La principal característica del método AHP es el uso de comparaciones por pares, que se utilizan tanto para comparar las alternativas con respecto a los diversos criterios como para estimar las ponderaciones de los criterios	<ol style="list-style-type: none"> 1. Flexible, intuitivo y comprueba inconsistencias 2. Dado que el problema se construye en un estructura jerárquica, la importancia de cada se hace evidente. 3. No hay prejuicios en la toma de decisiones 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Irregularidades en la clasificación 2. Se utiliza la agregación de aditivos. Así que información importante puede perderse. 3. Más número de parejas se necesitan comparaciones
Proceso de red analítica (ANP)	ANP es esencialmente la forma general de AHP y es no lineal, a diferencia de AHP, que "es jerárquica y lineal con el objetivo en la parte superior y las alternativas en los niveles inferiores	<ol style="list-style-type: none"> 1. La independencia entre los elementos no es requerido. 2. La predicción es exacta porque las prioridades son mejorada por la retroalimentación. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. El tiempo que se necesita 2. Incertidumbre - no apoyada 3. Difícil de convencer a la toma de decisiones
ELECTRE	Se utiliza para seleccionar la mejor opción con la máxima ventaja y el menor conflicto en función de varios criterios	Tiene en cuenta la incertidumbre y la vaguedad	Su proceso y resultado puede ser difícil de explicar en términos sencillos; el hecho de que sea superior a los demás hace que no se identifiquen directamente los puntos fuertes y débiles de las alternativas.

Apéndice 3 .Método de decisión multicriterio (continuación)

Métodos de decisión multicriterio	Descripción	Ventajas	Desventajas
PROMETHEE	PROMETHEE es similar a ELECTRE en el sentido de que también tiene varias iteraciones y es también un método de superación.	Fácil de usar; no requiere asumir que los criterios son proporcionados.	No proporciona un método claro para asignar pesos y requiere la asignación de valores pero no proporciona un método claro para asignar esos valores
TOPSIS	Un enfoque para identificar una alternativa que esté más cerca de la solución ideal y más lejos de la negativa solución ideal en un espacio informático multidimensional	Tiene un proceso simple; fácil de uso y programa; el número de pasos sigue siendo el mismo independientemente del número de atributos.	Su uso de la Distancia Euclidiana hace no considerar la correlación de atributos; difícil de pesar y mantener la consistencia del juicio.
VIKOR	Método para determinar la lista de clasificación de compromiso de un conjunto de alternativas según la medida de la cercanía a la solución ideal.	El método VIKOR es apropiado para resolver problemas de decisión con criterios en conflicto y no conmensurables, es decir, con distintas unidades, o en el caso de que haya criterios cuantitativos y cualitativos	El método VIKOR solo tiene en cuenta la distancia a la solución ideal y el método TOPSIS tiene en cuenta tanto la distancia tanto a la solución ideal como a la solución no ideal.

Apéndice 4. Método de decisión multicriterio (continuación)

Métodos de decisión multicriterio	Descripción	Ventajas	Desventajas
ORCLASS	Se diferencia de los demás métodos de análisis de decisión verbal (ZAPROS, PACOM) porque no consiste en ordenar las alternativas en orden, sino que tiene por objeto clasificar las alternativas multicriterio de un conjunto determinado: el responsable de la decisión sólo necesita que estas alternativas se clasifiquen en un pequeño número de clases o grupos de decisión, generalmente dos grupos.	Una de las principales ventajas del método: dialogar fácilmente con la persona que toma la decisión utilizando valores de criterios verbales.	El método ORCLASS debe comparar una cantidad de criterios y valores de criterios, porque la metodología funciona combinándolos.
PACOM	PACOM es el sistema exclusivo creado para ser aplicado según una compensación de pares. Propone la concepción de comparar las ventajas y desventajas de las alternativas multiatributo	Tiene como objetivo seleccionar la mejor alternativa a través de la comparación de pares, creando un rango de alternativas que presenta las alternativas desde la mejor hasta la última preferible	En los casos de gran cantidad de alternativas, se deben utilizar otras metodologías VDA, más robustas, como ZAPROS

Apéndice 5 .Método de decisión multicriterio (continuación)

Métodos de decisión multicriterio	Descripción	Ventajas	Desventajas
ZAPROS	El Sistema ZAPROS fue creado para ser aplicado por comparación de pares. Propone la concepción de la comparación de un par de alternativas	con la ventaja de proporcionar la toma de decisiones mediante un diálogo simple y comprensible.	El método requiere comparar todos los valores de los criterios para todos los pares de criterios y utilizar esta información para la comparación de alternativas reales. Como el número de esas comparaciones puede ser bastante grande, es razonable utilizar este enfoque para problemas relativamente pequeños.
ENTROPIA	La entropía mide la incertidumbre en la información formulada usando la teoría de la probabilidad. Indica que una distribución amplia representa más incertidumbre que la de una distribución con picos pronunciados.	Tiene como ventaja contar con resultados objetivos ya que parte del supuesto de que un criterio tiene mayor peso cuando mayor diversidad hay en la evaluación de cada alternativa.	Debido a que el método de entropía utiliza el logaritmo de las evaluaciones de las alternativas respecto a cada criterio, este no puede ser aplicado cuando alguna de ellas sea menor o igual a 0.

Fuente : (Aruldoss, 2013; Bernal, 2018; Cristina Sampaio Machado et al., 2012; Jato-Espino et al., 2014;

Machado et al., 2014; Making et al., n.d.; Martínez Gómez et al., 2018; Moshkovich et al., 2016; Wajeeha A.

Qazi & Abushammala, 2020; San Cristóbal, 2011; Velasquez & Hester, 2013; Yevseyeva, 2007)