

Evaluación técnico-financiera de estrategias de valorización de residuos en una empresa de
servicios públicos

Luis Fernando Gamboa Fajardo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mis padres por enseñarme el valor del esfuerzo propio y luchar cada día para salir adelante al darme apoyo incondicional en la carrera profesional que elegí.

A Nana por ser la única y mejor hermana que podría tener al siempre tener un consejo y apoyo que brindarme.

A Malvavisco por ser el mejor hermano y siempre apoyarme cuando lo necesite.

A Juaquito, el nuevo integrante de la familia, que lo amo y lo apoyaré en todo.

A Dana, el amor de mi vida, la compañera que elegí para abordar esta montaña rusa llamada vida, quien siempre creyó en mí y me ha brindado apoyo incondicional.

Agradecimiento

A Centro de Gestión Sostenible S.A ESP por dame la oportunidad de aprender e iniciar mi trayecto profesional.

Al profesor Giovanni Morales por su apoyo y acompañamiento.

A mi exjefe Angela Bonilla por su apoyo y tutoría.

Tabla de contenido

Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos	14
2. Estado del Arte.....	15
3. Metodología	17
3.1 FASE 1. Prefactibilidad Técnica del Combustible Derivado de Residuos	17
3.2 FASE 2. Prefactibilidad Técnica del Aprovechamiento de Energía.....	18
3.3 FASE 3. Prefactibilidad Financiera.....	18
4. Resultados.....	19
4.1 Prefactibilidad Técnica del CDR	19
4.1.1 Restricciones ambientales y técnicas.....	19
4.1.2 Determinación de Características Físicoquímicas del CDR.....	20
4.1.3 Consecución, Segmentación, Clasificación y Análisis de la Base de Datos de Residuos ...	22
4.1.4 Resultados de Laboratorio y Análisis Global.....	26
4.1.5 Formulaciones de Mezclas Para Aprovechamiento en CDR	29
4.1.6 Pretratamientos Necesarios Para el CDR.....	31
4.1.7 Definición Técnica del Proceso y Equipos para Aprovechamiento en CDR.....	32
4.2 Prefactibilidad Técnica de Aprovechamiento Energético de Residuos	35

<i>4.2.1 Criterios de Inclusión o Exclusión de Materiales Susceptibles para Aprovechamiento Energético.</i>	35
<i>4.2.2 Definición Técnica del Proceso y Equipos para Aprovechamiento Energético</i>	36
4.3 Prefactibilidad Financiera	40
<i>4.3.1 Estimación de la Demanda y Oferta de CDR</i>	40
<i>4.3.2 Determinación del CAPEX y del OPEX de las Alternativas de Aprovechamiento</i>	42
<i>4.3.3 Flujos de Caja e Indicadores Financieros de las Alternativas de Aprovechamiento.</i>	45
5. Conclusiones	50
6. Recomendaciones	52
Referencias Bibliográficas	54

Lista de tablas

Tabla 1 Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para actividades industriales a condiciones de referencia (25 °C y 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 11%.	19
Tabla 2 Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para centrales térmicas nuevas con capacidad instalada inferior a 20 MW y plantas de cogeneración nuevas.	20
Tabla 3 Criterio de aceptación de las características fisicoquímicas del CDR.	21
Tabla 4 Tipos de disposición, característica de peligrosidad asociada y pictograma SGA disponibles en la empresa de disposición final de residuos peligrosos y no peligrosos.	23
Tabla 5 Subgrupos de homologación de residuos.	24
Tabla 6 Promedio mensual para 2022 y 2023 con poder calorífico teórico de cada subgrupo de residuos.	26
Tabla 7 Cantidades, poder calorífico y humedad real de cada subgrupo de residuos.	27
Tabla 8 Poder calorífico aproximado de las formulaciones propuestas para CDR.	30
Tabla 9 Poder calorífico real de las formulaciones de CDR, borras y solvente.	31
Tabla 10 Corrientes del BFD para el caso de aprovechamiento en CDR para la fórmula 4.	33
Tabla 11 Especificaciones técnicas e imagen del triturador UNTHA Longlife para alternativa de CDR.	34
Tabla 12 Criterios iniciales de inclusión o exclusión de materiales para aprovechamiento.	35
Tabla 13 Tabla de corrientes del proceso de incineración con aprovechamiento energético (parte 1).	38
Tabla 14 Tabla de corrientes del proceso de incineración con aprovechamiento energético (parte 2).	38

Tabla 15 Especificaciones técnicas del equipo de tratamiento térmico por combustión y aprovechamiento energético.	39
Tabla 16 CAPEX de la alternativa de aprovechamiento en CDR.	42
Tabla 17 OPEX de la alternativa de CDR	43
Tabla 18 CAPEX de la alternativa de horno de incineración con aprovechamiento energético. .	43
Tabla 19 OPEX de la alternativa de horno con aprovechamiento energético.	44
Tabla 20 Proyección a 20 años de flujo de caja e índice EBITDA de la alternativa de aprovechamiento en CDR (parte 1).	46
Tabla 21 Proyección a 20 años de flujo de caja e índice EBITDA de la alternativa de aprovechamiento en CDR (parte 2).	46
Tabla 22 Indicadores financieros de la alternativa de aprovechamiento en CDR.	47
Tabla 23 Proyección a 20 años de flujo de caja e índice EBITDA de la alternativa de horno con aprovechamiento energético (parte 1).....	48
Tabla 24 Proyección a 20 años de flujo de caja e índice EBITDA de la alternativa de horno con aprovechamiento energético (parte 2).....	48
Tabla 25 Indicadores financieros de la alternativa de horno con aprovechamiento.	49

Lista de Figuras

Figura 1 Relación porcentual de tratamientos de residuos sólidos por región.	12
Figura 2 Metodología.....	17
Figura 3 Comparación de resultados reales de poder calorífico inferior real y teórico.....	28
Figura 4 Cantidades de disposición promedio mensual de cada año y poder calorífico de cada subgrupo de residuos evaluado en laboratorio.....	29
Figura 5 Diagrama Entrada - Salida para el proceso de aprovechamiento de residuos en CDR..	32
Figura 6 BFD del proceso de aprovechamiento de residuos en CDR.....	33
Figura 7 Diagrama Entrada - Salida para el proceso de incineración con aprovechamiento energético.....	37
Figura 8 BFD del proceso de incineración con aprovechamiento energético.	37
Figura 9 Comparativa de flujo de caja neto de la alternativa de aprovechamiento en CDR e incineración con aprovechamiento energético.....	50

Apéndices

Apéndice A Proceso de trituración de muestras de residuos para análisis de poder calorífico y humedad.

Apéndice B Resultados de análisis de poder calorífico y humedad de las muestras de residuos.

Apéndice C Formulaciones de CDR con valores teóricos de poder calorífico y humedad.

Apéndice D Proceso de trituración y mezcla de residuos según las formulaciones para análisis de poder calorífico y humedad.

Apéndice E Resultados de análisis de poder calorífico y humedad de las formulaciones.

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

Resumen

Título: Evaluación técnico financiera de estrategias de valorización de residuos en una empresa de servicios públicos¹.

Autor: Luis Fernando Gamboa Fajardo²

Palabras Clave: Combustible derivado de residuos, aprovechamiento, residuos peligrosos.

Descripción: La crisis energético ambiental global lleva a buscar alternativas a las fuentes de energía comunes no renovables y buscar maneras de aprovechar los residuos generados día a día. Los residuos peligrosos en Colombia generalmente se envían a celdas de seguridad donde se tratan y disponen de manera segura, sin embargo, se generan pasivos ambientales al aglomerar residuos en un sitio y encapsularlos. A partir de esto, se buscan alternativas de aprovechamiento de residuos que logren incluirlos nuevamente en la cadena de valor y así generar un proceso circular y sostenible. Ante esto, este proyecto evalúa la prefactibilidad técnico financiera de la capacidad de capitalizar alternativas de aprovechamiento como el CDR y la incineración con aprovechamiento energético. Se realiza una evaluación de cantidad y características de los residuos peligrosos aprovechables, seguido de experimentación de fórmulas de residuos, evaluación de equipos y recursos necesarios y análisis financiero con proyección a 20 años de las dos alternativas. Por último, con el fin de sentar las bases para la implementación de un sistema de aprovechamiento de residuos peligrosos, se determina que la alternativa de aprovechamiento en CDR aporta mayores aportes económicos según la proyección e indicadores económicos.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. Ingeniero Químico, PhD.

Abstract

Title: Technical and financial evaluation of waste recovery strategies in a public services company³.

Author: Luis Fernando Gamboa Fajardo⁴

Keywords: Waste derived fuel, recycling, dangerous waste.

Description: The global environmental energy crisis is leading to the search for alternatives to common non-renewable energy sources and to find ways to take advantage of the waste generated every day. Hazardous waste in Colombia is generally sent to secure cells where it is treated and disposed of safely, however, environmental liabilities are generated by agglomerating waste in a site and encapsulating it. Based on this, waste utilization alternatives are sought that manage to include it again in the value chain and thus generate a circular and sustainable process. In light of this, this project evaluates the technical and financial pre-feasibility of the capacity to capitalize on utilization alternatives such as RDF and incineration with energy utilization. An evaluation of the quantity and characteristics of the hazardous waste that can be utilized is carried out, followed by experimentation with waste formulas, evaluation of necessary equipment and resources, and financial analysis with a 20-year projection of the two alternatives. Finally, in order to lay the foundations for the implementation of a hazardous waste utilization system, it is determined that the RDF utilization alternative provides greater economic contributions according to the projection and economic indicators.

³ Degree work

⁴ Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Giovanni Morales Medina. Chemical Engineer, PhD.

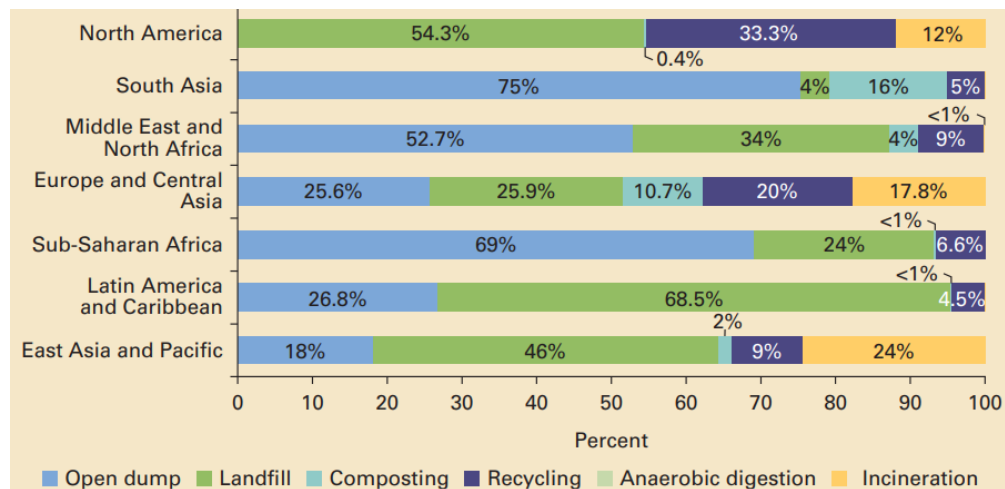
Introducción

Desde la industrialización de la sociedad, se ha venido incrementando la cantidad y la frecuencia de generación de residuos hasta alcanzar niveles alarmantes. Según Martínez et al., (2022) cada año se producen hasta 10.000 millones de toneladas de residuos a nivel mundial, entre los cuales 300 y 500 millones son residuos peligrosos tóxicos, inflamables, explosivos, corrosivos o con riesgo biológico (todos estos identificados con la sigla RESPEL).

Según Kaza et al., (2018) en todo el mundo, casi el 40% de los desechos se eliminan en vertederos. Alrededor del 30% de los desechos todavía se vierten a cielo abierto, el 19% se somete a recuperación de materiales mediante reciclaje y compostaje y el 11% se trata mediante incineración moderna. Adicionalmente, los desechos peligrosos, médicos y electrónicos suelen ser solo una fracción de los desechos sólidos municipales. Según los autores, se genera 0,32 kg per cápita/día a nivel mundial. En la Figura 1 se presenta la distribución de tratamientos para los residuos sólidos según la región.

Figura 1

Relación porcentual de tratamientos de residuos sólidos por región.



Nota. Tomado de *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management*

to 2050 por Kaza et al., 2018, Urban Development Series.

En la figura 1 se puede apreciar la relación porcentual de tratamientos para la región América Latina y el Caribe, siendo esta de 68,5% vertederos, 26,8% cielo abierto, 4,5% reciclaje y los demás tratamientos son menores al 1%.

Según el IDEAM (2019) en 2019 en Colombia, la disposición y manejo de los residuos RESPEL se realizó en su mayoría con celdas de seguridad, las cuales están diseñadas para minimizar los riesgos y el impacto medioambiental de dichos residuos. Sin embargo, a largo plazo no es una alternativa viable, ya que se reduce el territorio sobre el cual se pueden crear estas celdas y la eliminación del impacto ambiental de estos residuos es limitada. Para ralentizar el llenado de las celdas y mitigar dichos impactos, se puede implementar sistemas de aprovechamiento de residuos peligrosos como la generación de combustibles derivados de residuos (CDR) y/o la incineración de residuos para aprovechamiento energético. Según esto, los residuos RESPEL pueden ser capitalizados en una oportunidad de negocio obteniendo un beneficio financiero, ambiental y social.

Particularmente, el Centro de Gestión Sostenible S.A.S ESP (CGS) de Ciudad Limpia S.A.S ESP ubicado en el municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia) implementa un sistema de recepción, pretratamiento y disposición final en una celda de seguridad de residuos RESPEL. De estos, los residuos sólidos son dispuestos de manera escalonada con capas intermedias de cobertura (*i.e.* tierra con pH cercano a 8). CGS puede considerar como parte de su cadena de valor, uno de los sistemas de aprovechamiento mencionados arriba, los cuales se alinean con su misión “ser el Centro de Gestión Sostenible en soluciones de disposición final de residuos y materiales Peligrosos y No Peligrosos, a través de procesos circulares” y su visión “ser el principal aliado de sus clientes como parte de la cadena de valor de sus residuos y materiales,

buscando la eficacia en la producción y reducción de la huella de carbono a través de la construcción de relaciones sólidas, enmarcadas en la confianza, tranquilidad y coherencia”.

En consonancia con lo anterior, el presente documento expone resultados de relevancia de una evaluación técnico-financiera de las estrategias de valorización de residuos para una empresa de servicios públicos (Centro de Gestión Sostenible S.A.S E.S.P). Las estrategias de valorización consideradas fueron la generación de combustibles derivados de residuos (CDR) y la incineración de residuos para aprovechamiento energético. La pregunta directora fue, ¿cuál de las dos alternativas de aprovechamiento ofrece mayores beneficios técnicos y económicos para satisfacer las necesidades y objetivos de Centro de Gestión Sostenible (CGS)?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un estudio de prefactibilidad técnica-financiera de dos estrategias de valorización de residuos sólidos peligrosos en una empresa de servicios públicos en el municipio de Mosquera.

1.2 Objetivos Específicos

- Definir la prefactibilidad técnica de la formulación de un combustible derivado de residuos sólidos, identificando las variables representativas.
- Validar la prefactibilidad técnica de un horno incinerador de residuos con sistema de aprovechamiento de energía.
- Calcular un flujo de caja con proyección a 20 años para la implementación de dos sistemas de aprovechamiento de residuos, estableciendo los indicadores económicos de evaluación de las respectivas inversiones.

2. Estado del Arte

En la investigación realizada por Ramírez & Vargas (2014), se propuso la formulación de un combustible derivado de residuos (CDR) sólidos generados en la provincia de Guantán, del departamento de Santander. Utilizando la ecuación de Dulong modificada para calcular el poder calorífico de cada residuo, los autores desarrollaron un CDR teórico con poder calorífico de 8,542 MJ/kg para una futura aplicación en la industria del cemento. Según ellos, utilizando el CDR propuesto se emitirían 12.300,24 t menos de gases de efecto invernadero, comparado con la operación actual de la industria cementera de referencia.

Karpan et al., (2021) analizaron la generación de CDR a partir de RESPEL para su aprovechamiento en los hornos de la industria cementera. Para ello, realizaron análisis estadísticos de experimentos para determinar las mejores combinaciones posibles de los diferentes residuos sólidos y líquidos. A los residuos a utilizar se les realizó un proceso de secado, triturado y mezclado para crear la formulación del CDR. Según los autores, el uso de CDR en los hornos puede conducir a una factibilidad económica favorable, al obtener beneficios monetarios por la reducción en el costo de materia prima y en las emisiones atmosféricas.

Por su parte, Amulen et al., (2022) desarrollaron un estudio del potencial de recuperación de energía de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Kampala, Uganda. Ellos propusieron el uso de un horno incinerador de parrilla para los residuos sólidos dispuestos en rellenos a cielo abierto, como fuente de energía para la generación eléctrica. Asimismo, caracterizaron los residuos según su poder calorífico y codificaron una simulación del proceso de incineración en el programa comercial Aspen Plus. A nivel financiero, los autores concluyeron que el proceso resulta inviable, a menos que un cobro por incineración de residuos sea incluido en el flujo de caja del proyecto.

Por otro lado, Vasiliu et al., (2023) propusieron el reemplazo de carbón por residuos de neumáticos como combustible en los hornos cementeros de Rumania. Se utilizaron diferentes tamaños y tipos de neumáticos para realizar varias pruebas en un horno cementero y evaluar los resultados de su utilización, respecto a los contaminantes y la eficiencia del residuo para la generación de clinker. Según esto, los hornos del proceso de producción de clinker consumen entre 30-40% del costo de producción del cemento, por lo cual la reducción en el costo del combustible representa un beneficio adicional para esta industria.

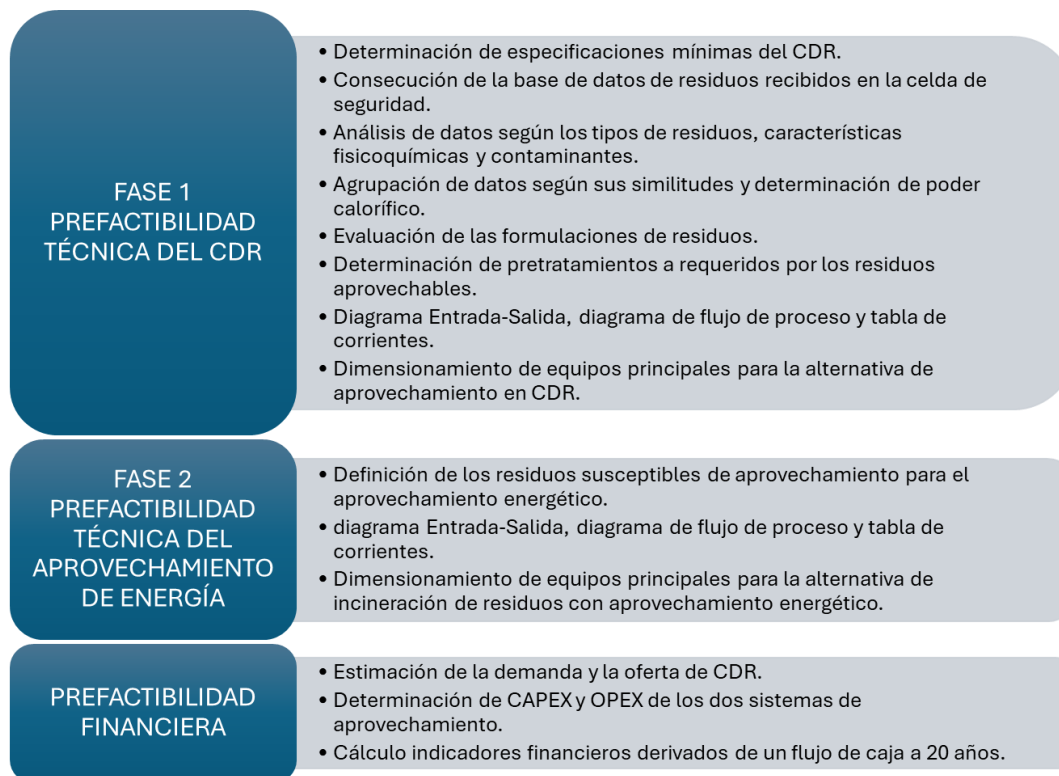
Finalmente, García & Thema (2023) desarrollaron un informe sobre la transición energética en Colombia. Según los autores, uno de los sectores que más contribuye a la emisión de gases invernadero es el sector energético, siendo este el responsable del 30,7% de las emisiones en Colombia. La propuesta se basó en el uso de biomasa/biocombustibles sostenibles o hidrógeno procedente de la electrólisis que son fuentes renovables de materia prima.

Las anteriores referencias obtuvieron resultados prometedores respecto al poder calorífico de los diferentes residuos que se evalúan; proponen formulas y métodos de experimentación óptimos para la formulación de mezclas de CDR; hacen evaluaciones financieras con software para determinar viabilidad económica de los proyectos propuestos y fundamentan la necesidad de las alternativas de aprovechamiento de residuos que aporten beneficios energéticos y económicos. Lo anterior corresponden a un soporte de la viabilidad de utilización de residuos peligrosos y no peligrosos en alternativas de aprovechamiento como CDR e incineración en hornos.

3. Metodología

Figura 2

Metodología.



3.1 FASE 1. Prefactibilidad Técnica del Combustible Derivado de Residuos

3.1.1 Actividad 1. Determinación de las especificaciones mínimas de CDR (%humedad, cenizas, metales pesados, contenido de cloro, azufre, etc.) para su comercialización.

3.1.2 Actividad 2. Consecución base de datos de residuos recibidos en la celda de seguridad.

3.1.3 Actividad 3. Análisis de datos según los tipos de residuos, características fisicoquímicas y contaminantes.

3.1.4 Actividad 4. Agrupación de los residuos según sus similitudes de material, contaminante y características fisicoquímicas y determinar el poder calorífico promedio teórico de cada grupo.

3.1.5 Actividad 5. Evaluación de formulaciones (mezclas) de las diferentes materias primas (residuos) para el cumplimiento de requisitos de poder calorífico mínimo para la comercialización.

3.1.6 Actividad 6. Determinación de pretratamientos requeridos por los residuos aprovechables.

3.1.7 Actividad 7. Propuesta de diagrama Entrada-Salida, diagrama de flujo de proceso y tabla de corrientes.

3.1.8 Actividad 8. Dimensionamiento de equipos principales para la alternativa de aprovechamiento en combustible derivado de residuos.

3.2 FASE 2. Prefactibilidad Técnica del Aprovechamiento de Energía.

3.1.2 Actividad 9. Definición de los residuos susceptibles de aprovechamiento para el aprovechamiento energético.

3.1.7 Actividad 10. Propuesta de diagrama Entrada-Salida, diagrama de flujo de proceso y tabla de corrientes.

3.1.8 Actividad 11. Dimensionamiento de equipos principales para la alternativa de incineración de residuos con aprovechamiento energético.

3.3 FASE 3. Prefactibilidad Financiera.

3.3.1 Actividad 12. Estimación de la demanda y la oferta de CDR.

3.3.2 Actividad 13. Determinación costos de CAPEX y OPEX de la implementación de los dos sistemas de aprovechamiento, combustible derivado de residuos (CDR) e incineración con aprovechamiento energético.

3.3.3 Actividad 14. Cálculo indicadores financieros derivados de un flujo de caja a 20 años.

4. Resultados

4.1 Prefactibilidad Técnica del CDR

4.1.1 Restricciones ambientales y técnicas

En la tabla 1 se presentan los valores para las emisiones máximas permisibles derivadas de actividades industriales, según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en la Resolución 909 del 2008. Los valores presentados en la tabla de dirigen a los contenidos de: azufre, nitrógeno, compuestos de flúor orgánico, compuestos de cloro inorgánico, hidrocarburos, ácido sulfúrico, plomo, cadmio, cobre y en general metales pesados. En la Resolución 909 de 2008 no se considera el material particulado para los componentes del CDR. El material particulado debe ser retenido en un proceso de limpieza del gas de emisión de la chimenea.

Tabla 1

Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para actividades industriales a condiciones de referencia (25 °C y 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 11%.

Contaminante	Estándares de emisión admisibles (mg/m³)
Material Particulado (MP)	50
Dióxido de Azufre (SO ₂)	500
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	500
Compuestos de Flúor Inorgánico (HF)	8
Compuestos de Cloro Inorgánico (HCl)	40
Hidrocarburos Totales (HO)	50

Neblina Ácida o Trióxido de Azufre expresados como H ₂ SO ₄	150
Plomo (Pb)	1
Cadmio (Cd) y sus compuestos	1
Cobre (Cu) y sus compuestos	8

Nota. Adatado de Resolución 909 de 2008 de Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.

Por su parte, en la tabla 2 se presenta las emisiones máximas permisibles para centrales térmicas con capacidad instalada inferior a 20 MW y plantas de cogeneración nuevas, en donde se diferencia por estado físico del combustible, para este caso, se tiene en cuenta el combustible en estado sólido. Estos estándares deben ser considerados en la estrategia del horno incinerador con aprovechamiento energético.

Tabla 2

Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para centrales térmicas nuevas con capacidad instalada inferior a 20 MW y plantas de cogeneración nuevas.

Combustible	Estándares de emisión admisible (mg/m ³)			Oxígeno de referencia
	MP	SO ₂	NO _x	
Sólido	50	2000	600	6%
líquido	50	2000	450	3%
gaseoso	NO APLICA	NO APLICA	300	3%

Nota. Tomado de Resolución 909 de 2008 de Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.

4.1.2 Determinación de Características Fisicoquímicas del CDR

4.1.2.1 Poder Calorífico. Principalmente se debe tener en cuenta el poder calorífico y la humedad del material, ya que estas características son las que determinan la calidad y potencial del residuo para su aprovechamiento en CDR. Partiendo de ello, se debe determinar cuál es el

límite de aceptación para dichas características principales en comparación con el carbón, el cual es el combustible comúnmente usado (para el caso de los clientes potenciales).

Según Holz et al., (2016) el poder calorífico del carbón en Colombia se estima en 6.375 kcal/kg ya que se considera de alta calidad, sin embargo, también expresa que la calidad del carbón puede disminuir con el tiempo, ya que, a mayor cantidad de carbón minado, menor calidad de este, por ende, se estima que el poder calorífico del carbón colombiano es aproximadamente de 6.000 kcal/kg. Para llegar a competir con el carbón, el poder calorífico del CDR debe ser como mínimo de 5.000 kcal/kg.

4.1.2.2 Tamaño de Partícula. Para el CDR se debe realizar un proceso de reducción de tamaño para facilitar su manejo, mezcla y empaquetado, así mismo como su utilización en los hornos, ya que, al tener tamaño reducido facilita la carga en la cámara de combustión. Se determina un tamaño de partícula máximo de 4 cm² para asegurar dichas características en el CDR. En la tabla 3 se pueden evidenciar las características fisicoquímicas del CDR. Para las demás características, se tiene en cuenta un valor máximo de metales pesados de 2500 ppm, contenido de mercurio máximo de 10 ppm, contenido máximo de Cadmio y Talio de 50 ppm, contenido máximo de azufre de 1% en masa, contenido de cloro máximo de 0,3% en masa, contenido máximo de cenizas de 15% en masa y un a humedad máxima del 15%.

Tabla 3

Criterio de aceptación de las características fisicoquímicas del CDR.

PARÁMETRO	CRITERIO DE ACEPTACIÓN
Tamaño de partícula (cm ²)	4
Poder calorífico Inferior (kcal/kg)	>5000
Sum. metales pesados (As, Co, Cu, Cr, Pb, Sn, Sb, Ni, Mn, V)	<2500 ppm

Contenido de Mercurio (Hg)	<10 ppm
Contenido de Cadmio + Talio (Cd+Tl)	<50 ppm
Contenido de Azufre	<1%
Humedad	<15%
Contenido de Cloro	<0,3%
Cenizas	<15%

4.1.3 Consecución, Segmentación, Clasificación y Análisis de la Base de Datos de Residuos










4.1.3.1 Base de Datos. En la empresa de disposición de residuos peligrosos y no peligrosos se maneja una plataforma de declaración, carga y descarga de residuos, donde cada uno de los clientes deben especificar, cual es el residuo por disponer, que características de peligrosidad posee, el estado fisicoquímico, contaminante (si tiene) que posee el residuo y la hoja de seguridad del residuo o el contaminante. Esto para tener la información completa de que es el residuo y poder darle una disposición adecuada. En la misma plataforma se diligencia la información de cantidad de residuo a entregar y fecha de entrega, donde se concilian tarifas y una vez dispuesto el residuo se genera el certificado de disposición final del residuo. Para lograr un análisis que ilustre la situación actual de los residuos que son aprovechables, se decidió analizar los años 2022 y 2023 haciendo el estudio en cada mes de estos años y clasificar y comparar los resultados.



4.1.3.2 Segmentación de Datos. En la empresa de disposición final de residuos peligrosos se manejan distintos tipos de disposición dependiendo el tipo, estado fisicoquímico y características de peligrosidad del residuo. Como se puede observar en la tabla 4, actualmente cuentan con estabilización de residuos inflamables, neutralización, óxido reducción, solidificación, estabilización de metales pesados, despresurización de aerosoles, aprovechamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEES), luminarias y baterías, disposición directa en celda de seguridad para peligrosos y no peligrosos, disposición en celda de residuos de alto volumen y finalmente encapsulamiento de líquidos

o sólidos. Para el caso de residuos que pueden ser aprovechables para CDR únicamente se tienen en cuenta los que se les asigna disposición directa en celda de seguridad y residuos de alto volumen, ya que, estos residuos están en estado sólido o semisólido y en su mayoría, sus características de peligrosidad (si las tienen) no se consideran de alto impacto en los seres vivos, ni en la fauna y flora, sin embargo, por seguridad ambiental y/o decisión del cliente se dispone en celda de seguridad.

Tabla 4

Tipos de disposición, característica de peligrosidad asociada y pictograma SGA disponibles en la empresa de disposición final de residuos peligrosos y no peligrosos.

Disposición	Característica de peligrosidad asociada	Pictograma SGA
Estabilización de residuos inflamables y disposición en celda de seguridad (solidifica)	Inflamable	
Neutralización y disposición en celda de seguridad (solidifica)	Tóxicos; Corrosivos	
Oxido reducción y disposición en celda de seguridad (solidifica)	Tóxico	
Solidificación y disposición en celda de seguridad	Tóxico	
Estabilización de metales pesados y disposición en celda de seguridad (solidifica)	Tóxico	
Despresurización y disposición en celda de seguridad	Inflamable; Tóxico	
Aprovechamiento de RAEES, luminarias y baterías	Tóxico	
Disposición directa en celda de seguridad para peligrosos	Tóxico	
Disposición directa en celda de seguridad para no peligrosos	No aplica	
Disposición directa en celda de seguridad de residuos de alto volumen	Puede o no ser tóxico	

Encapsulamiento de líquidos y disposición en celda de seguridad	Tóxico; corrosivo; inflamable	
Encapsulamiento de sólidos y disposición en celda de seguridad	Tóxico; corrosivo; inflamable	

4.1.3.3 Homologación de Datos. En los tipos de disposición seleccionados, hay una gran variedad de residuos que aplican a esos tipos de disposición, por tanto, es necesaria realizar una homologación de datos donde se agruparan en subgrupos dependiendo de sus similitudes básicas entre cada uno de los residuos. Como se evidencia en la tabla 5 se seleccionaron 9 subgrupos de residuos aprovechables para segmentar y agrupar dichos residuos. Esta agrupación busca facilitar el análisis de los datos y poder visualizar más fácilmente la tendencia de la cantidad y tipos de residuos que se disponen en la celda de seguridad.

Tabla 5

Subgrupos de homologación de residuos.

Subgrupos de homologación	Ejemplos de residuos
Sólido-hidrocarburo	Borras de hidrocarburos, sólidos impregnados con ACPM y aserrín con hidrocarburos.
Elementos de protección personal (EPP)	EPP que estén o no contaminados, guantes, overoles, cascos, media cara, gafas, botas y pijama.
Sólido-pintura	Canecas, plásticos, polisombra, pintura sólida o similares.
Trapos	Trapos que estén o no contaminados, estopas y retales de tela.
Madera	Madera que esté o no contaminada, tablas, estibas y residuos de construcción de madera.
Envases contaminados	Bidones, canecas y demás envases que estén o no contaminados.
Poliuretano	Poliuretano que esté o no contaminado.

Bolsas de cemento (papel)	Todo tipo de papel incluyendo el papel Kraft de las bolsas de cemento
Cartón	Cartón que esté o no contaminado

4.1.3.4 Análisis de cantidades y poder calorífico. Inicialmente se realiza la segmentación de la base de datos de acuerdo con los subgrupos establecidos y se establece las cantidades mensuales de cada uno para los años 2022 y 2023, se asigna un poder calorífico teórico para cada grupo para tener una referencia base de los potenciales de aprovechamiento de cada grupo y su viabilidad para proseguir con los análisis de laboratorio y verificar dichos datos.

Para el poder calorífico inferior teórico de cada uno de los materiales se tomó como referencia el compendio de materiales, residuos y combustibles de Rodríguez en su página Ingemecánica, en donde, presentan una variedad de tablas obtenidas de distintas fuentes listadas en dicha página. En la tabla 6 se presenta el poder calorífico inferior teórico de cada subgrupo, para el caso de sólido-hidrocarburos se toma el rango de valores de “Poliéster FR” y “coque de petróleo”, para EPP se toma el valor del promedio de “textil, calzado, artículos de piel” de su fracción degradable y no degradable, para sólido-pintura se toma el valor de “plásticos fracción no degradable”, para trapos se toma el valor de “Poliéster FR” asumiendo tela de poliéster, para madera se asume el valor de “madera y artículos derivados”, para envases contaminados se toma el valor de “envases compuestos fracción no degradable”, para poliuretano se toma el valor de “poliuretano”, para bolsas de cemento (papel) se toma el valor de “papel Kraft de densidad 0,04 kg/m³, para cartón se toma el valor de “papel y cartón fracción degradable”. Se opta por tomar estos valores ya que se aproximan a el material que compone cada uno de los subgrupos de residuos.

Tabla 6

Promedio mensual para 2022 y 2023 con poder calorífico teórico de cada subgrupo de residuos.

Subgrupos de homologación	Promedio mensual [kg]		Poder calorífico inferior teórico [kcal/kg]
	2022	2023	
Sólido-hidrocarburo	32.154,1	102.019,1	4900-7640
EPP	5.241,8	1.2611,1	6772
Sólido-pintura	9.135,8	9.003,8	7834
Trapos	2.689,8	8.346,3	4900
Madera	1.135,2	6.697,7	3689
Envases contaminados	1.574,6	6.646,0	7834
Poliuretano	2.919,1	2.753,7	6000
Bolsas de cemento (papel)	2.007,7	2.703,8	3900
Cartón	1.134,1	1.043,5	4550

Nota. Elaboración propia a partir de los datos de disposición final en celda de seguridad y de poder calorífico de Rodríguez en la página de Ingemecánica.

4.1.4 Resultados de Laboratorio y Análisis Global

Para tener un dato real de los valores teóricos de poder calorífico propuesto y de humedad se envían muestras para un análisis de poder calorífico inferior y humedad. Dado que dependía de la disposición de los residuos para enviar las muestras al laboratorio, tres (3) subgrupos de residuos no estuvieron disponibles en el momento. En la tabla 7 se presenta los promedios mensuales de cada año, el poder calorífico real y la humedad de cada subgrupo (a excepción de sólido-hidrocarburo, poliuretano y sólido-pintura, ya que, no hubo muestra disponible en el momento). Para enviar las muestras al laboratorio, fue necesario triturar manualmente cada uno de los materiales a evaluar, en el apéndice A se presenta la preparación que se le realizó a las muestras que se enviaron para análisis y en el apéndice B los resultados de laboratorio certificado.

Tabla 7

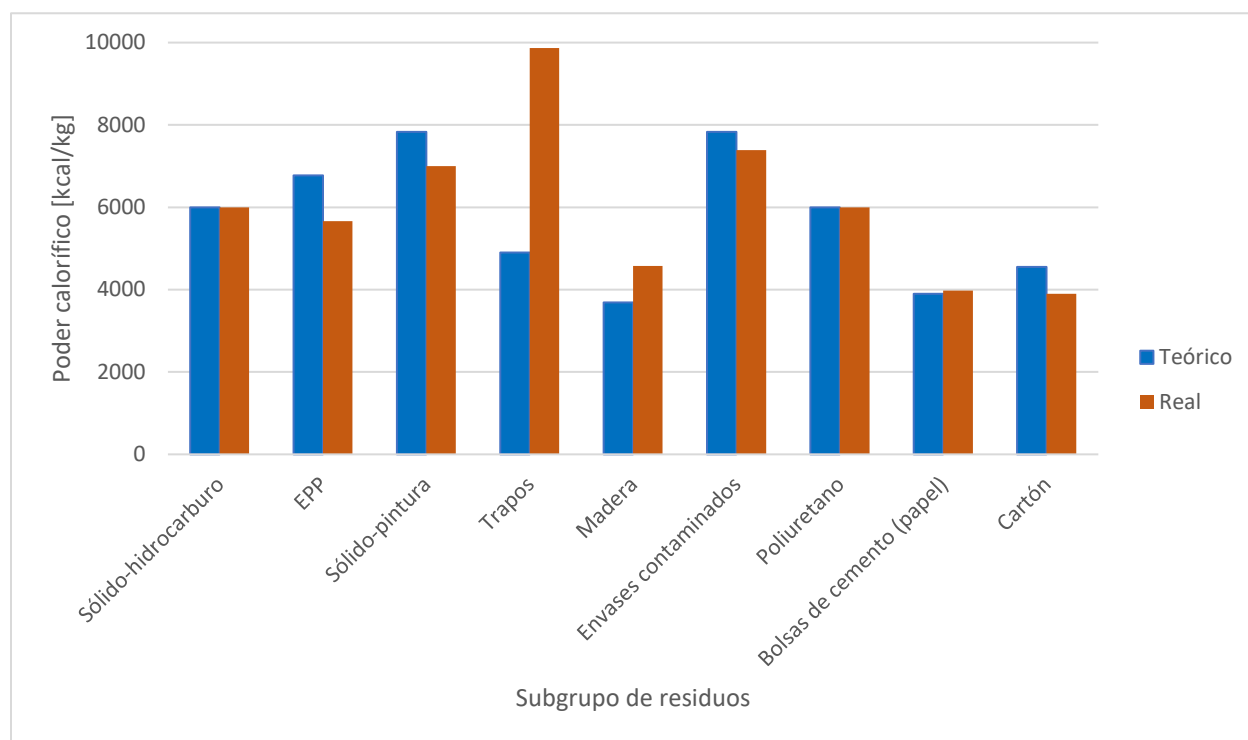
Cantidades, poder calorífico y humedad real de cada subgrupo de residuos.

Subgrupos de homologación	Promedio mensual [kg]		Poder calorífico inferior [kcal/kg]	Humedad %
	2022	2023		
Sólido-hidrocarburo	32.154,1	102.019,1	6.000	No disponible
EPP	5.241,8	12.611,1	5.660	0,4
Sólido-pintura	9.135,8	9.003,8	7.000	No disponible
Trapos	2.689,8	8.346,3	9.867	2,4
Madera	1.135,2	6.697,7	4.573	4,6
Envases contaminados	1.574,6	6.646,0	7.390	1,2
Poliuretano	2.919,1	2.753,7	6.000	No disponible
Bolsas de cemento (papel)	2.007,7	2.703,8	3.980	9,2
Cartón	1.134,1	1.043,5	3.902	4,9

En la figura 3 se puede apreciar la comparativa de los resultados de laboratorio del poder calorífico inferior real y el teórico. En su mayoría, el poder calorífico real es superior al mínimo de mezcla de 5.000 kcal/kg, sin embargo, en el caso de sólido-hidrocarburo se asume poder calorífico promedio de 6.000 kcal/kg por la falta de muestra. En el caso de EPP, el resultado real es 1.112 kcal/kg inferior al teórico. Para sólido-pintura se asume un valor 7.000 kcal/kg siendo prudentes con el valor teórico propuesto en la tabla 7. Para la muestra de trapos fue el mejor resultado del análisis, ya que, su valor real está 4.967 kcal/kg por encima del valor teórico. En la madera, también el valor real está 884 kcal/kg por encima del teórico. En los envases contaminados su valor real es 444 kcal/kg inferior en comparación con el valor teórico, sin embargo, es un muy buen resultado de alrededor de las 7.000 kcal/kg. En el caso del poliuretano, nuevamente se asume un valor de 6.000 kcal/kg al no tener disponible una muestra del residuo para enviar a laboratorio. En el residuo de bolsas de cemento (papel) el resultado del poder calorífico real es muy similar al teórico propuesto, siendo su diferencia de 80 kcal/kg. Finalmente, para el caso del cartón, el valor real es 648 kcal/kg menor al teórico.

Figura 3

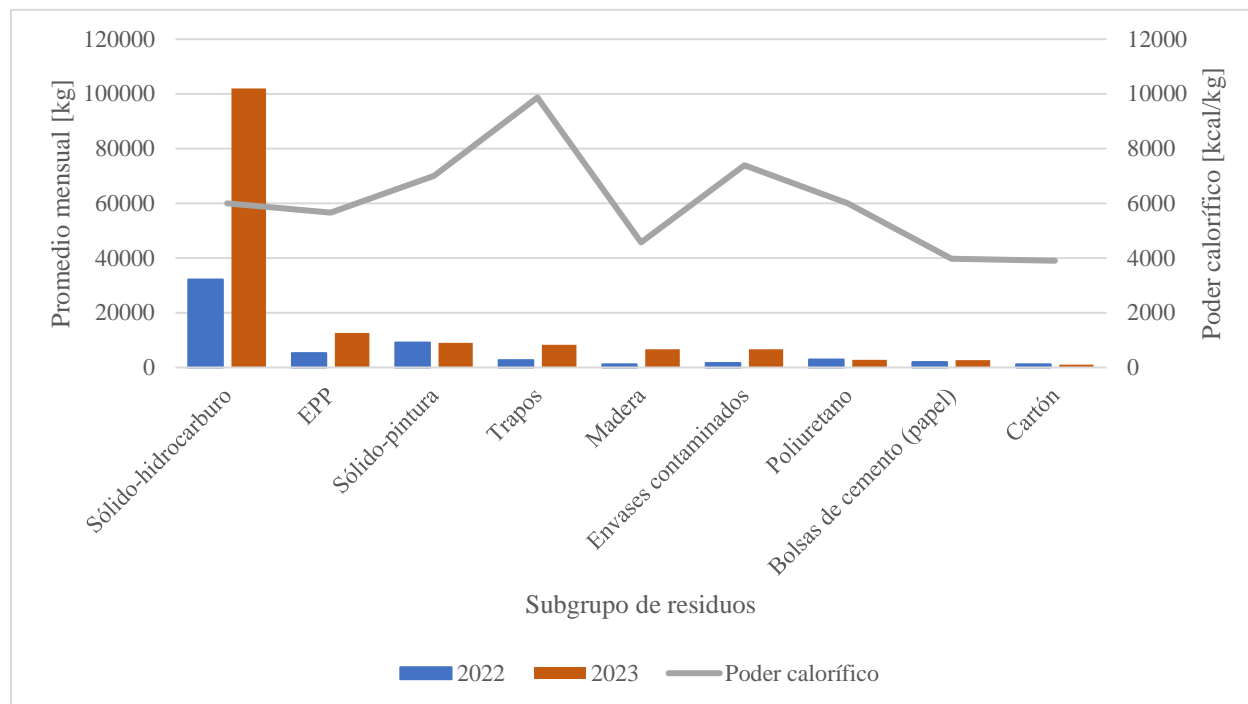
Comparación de resultados reales de poder calorífico inferior real y teórico.



En la figura 4 se presenta la comparación y agrupación global de los datos reales del cual se parte para la formulación de las mezclas de CDR. Se observa que la cantidad de residuos aprovechables dispuestos en 2023 es considerablemente mayor al 2022, el residuo que se entregó en mayor cantidad en ambos años fue el sólido-hidrocarburo y en general, todos los residuos tienen poder calorífico por encima de 4.000 kcal/kg, es decir, que es necesario verificar adecuadamente las mezclas para que cumplan con el estándar mínimo de poder calorífico de 5.000 kcal/kg.

Figura 4

Cantidades de disposición promedio mensual de cada año y poder calorífico de cada subgrupo de residuos evaluado en laboratorio.



4.1.5 Formulaciones de Mezclas Para Aprovechamiento en CDR

Se propone 6 formulaciones de mezclas de diferentes residuos que cumplan con el estándar mínimo de poder calorífico, para ello, se utiliza la ecuación 1, la cual es una ecuación empírica de aproximación de poder calorífico facilitada por la empresa de disposición final de residuos peligrosos.

$$PC_{i\text{ mezcla}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i}{M_{total}} * PC_i * \left(1 - \frac{H_i}{100} \right) \right)}{1 - \frac{\sum_{i=1}^n M_i * \frac{H_i}{100}}{M_{total}}} \quad (\text{Ec. 1})$$

En la tabla 8 se presenta los resultados de la aproximación de los poderes caloríficos de las formulaciones, a su vez, las tablas totales con las formulaciones se agregan en el apéndice C, se

propone implementar solvente como potenciador de poder calorífico de las mezclas, el solvente se obtiene de los mismos residuos dispuestos para pretratamiento.

Tabla 8

Poder calorífico aproximado de las formulaciones propuestas para CDR.

Mezclas	Composición %										Poder calorífico [kcal/kg]
	SH	EPP	SP	T	M	EC	P	BC	C	S	
Formula 1	30	20		30	10			10			6.394,5
Formula 2	30						25	15	20	10	6.634,3
Formula 3		25			30	20		15		10	6.547,1
Formula 4	40	20						10	20	10	6.274,1
Formula 5		40		20	15	20				5	7.177,3
Formula 6	40			30	10	10				10	6.595,0

Nota. Sólido-hidrocarburo (SH), elementos de protección personal (EPP), sólido-pintura (SP), trapos (T), madera (M), envases contaminados (EC), poliuretano (P), bolsas de cemento (BS), cartón (C), solvente (S).

Para asegurar que dichas mezclas cumplan con el criterio mínimo de poder calorífico se propuso como límite 6000 kcal/kg.

4.1.5.1 Resultados de Laboratorio de las Formulaciones. Para verificar los resultados de las formulaciones propuestas para aprovechamiento en CDR, se preparó y se envió cada una de estas muestras para el análisis de poder calorífico y humedad en laboratorio certificado, en el apéndice D se presenta la preparación de cada una de las formulaciones, en el apéndice E se presentan los resultados por parte del laboratorio certificado.

En la tabla 9 se presentan los resultados del análisis de laboratorio de cada una de las formulaciones y adicionalmente se evalúa una mezcla de borras de hidrocarburos y un residuo de

solvente que se utilizó para impregnar las muestras, sin embargo, se requería verificar el poder calorífico de este líquido.

Como se aprecia en la tabla, todas las formulaciones de residuos tienen una humedad total considerable, la cual, afecta negativamente a la mezcla. En los resultados de laboratorio se presenta el poder calorífico en base seca y para cada una de las muestras enviadas, todos los valores de poder calorífico inferior en base seca están por encima de las 5000 kcal/kg. Las borras de hidrocarburos poseen una alta humedad total y el solvente tiene un alto poder calorífico.

Tabla 9

Poder calorífico real de las formulaciones de CDR, borras y solvente.

Mezclas	Poder calorífico inferior [kcal/kg]	Humedad %
Formula 1	4.717,0	9,1
Formula 2	4.617,0	8,6
Formula 3	5.605,0	9,2
Formula 4	5.058,0	12,5
Formula 5	5.793,0	5,3
Formula 6	4.884,0	8,3
Formula 7 (Borras)	3.489,0	35,1
Solvente	9.507,0	No aplica

Nota. Elaboración propia

4.1.6 Pretratamientos Necesarios Para el CDR

Como se menciona anteriormente, dos requisitos principales para la preparación de CDR son la humedad y el tamaño de partícula. Para asegurar que la formulación cumpla con los estándares mínimos se debe realizar un pretratamiento al material a utilizar para la mezcla.

4.1.6.1 Humedad. En el caso de la humedad, se debe reducir hasta estar por debajo del 15% (en caso de ser necesario). Para garantizar esta característica se debe someter el material a un

proceso de secado, para este caso se dispondrá el material a secar en rejillas metálicas y se expondrán a la luz solar directa, dado que, en la zona de la vereda balsillas del municipio de Mosquera (Cundinamarca) hay exposición prolongada a la luz del sol y por su característica árida y desértica el aire tiene baja humedad en la zona, por tanto, se puede aprovechar las características ambientales de la zona e incurrir en la inversión adicional de un proceso de secado de sólidos.

4.1.6.2 Tamaño de Partícula. Para la reducción de tamaño de partícula se debe adquirir una trituradora industrial que garantice el tamaño requerido. Se deberá realizar la adecuación, instalación y capacitación para el uso de la trituradora dispuesta para el proceso. Este proceso se realizará después de secar el material a utilizar.

4.1.7 Definición Técnica del Proceso y Equipos para Aprovechamiento en CDR

4.1.7.1 Diagrama Entrada – Salida. Para el caso de la alternativa de aprovechamiento en CDR, se propone un procesamiento de 100 toneladas mensuales de residuos aprovechables. Considerando una operación de medio tiempo, se espera operar 96 horas mensuales, lo que equivale a una producción de 1.041,67 kg/h de CDR. En la figura 5 se presenta el diagrama Entrada – Salida para el proceso considerando ninguna perdida de material en el proceso.

Figura 5

Diagrama Entrada - Salida para el proceso de aprovechamiento de residuos en CDR.

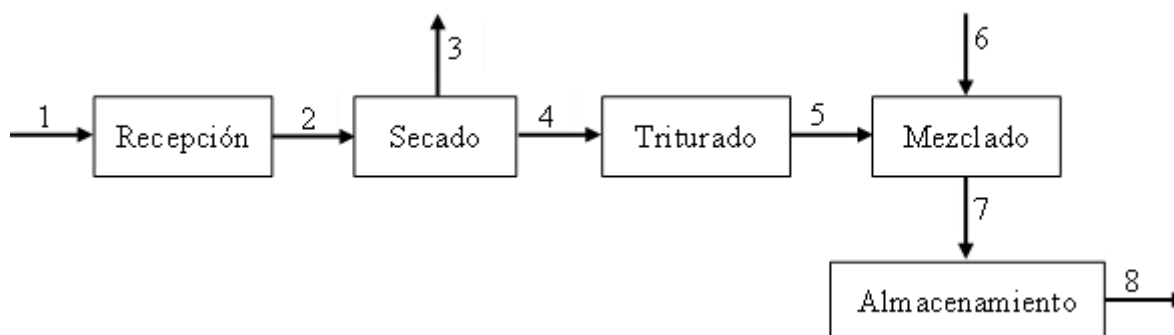


4.1.7.2 Diagrama de Proceso y Tabla de Corrientes. En la figura 6 se presenta el Block Flow Diagram (BFD) del proceso de aprovechamiento de residuos en CDR. Al igual que en el

anterior diagrama, se asume cero perdidas de materia prima y las mismas condiciones de operación.

Figura 6

BFD del proceso de aprovechamiento de residuos en CDR.



Se debe tener en cuenta que el BFD anterior, es el diagrama general del proceso, puede sufrir variaciones en la operación de secado y mezclado ya que puede o no necesitar disminuir su humedad y/o agregar aditivos inflamables. Para efectos prácticos del proyecto se opta por definir la tabla 10 de corrientes con una de las formulaciones propuestas anteriormente, en este caso, la fórmula 4. Dicha fórmula tiene humedad del 12,5%, es decir, cumple con el estándar mínimo de humedad para comercialización de CDR, sin embargo, se realiza el proceso de secado para representar el proceso general.

Tabla 10

Corrientes del BFD para el caso de aprovechamiento en CDR para la fórmula 4.

Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8
Flujo másico [kg/h]	1.041,7	1.041,7	77,0	964,7	964,7	115,8	1.080,4	1.080,4
T [°C]	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
P [atm]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Sólido-hidrocarburo [kg/h]	398,4	398,4	0,0	398,4	398,4	0,0	398,4	398,4
EPP [kg/h]	225,2	225,2	0,0	225,2	225,2	0,0	225,2	225,2

Bolsas de cemento [kg/h]	118,1	118,1	0,0	118,1	118,1	0,0	118,1	118,1
Cartón [kg/h]	222,9	222,9	0,0	222,9	222,9	0,0	222,9	222,9
Solventes [kg/h]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	92,6	92,6	92,6
Agua [kg/h]	77,0	77,0	77,0	0,0	0,0	23,2	23,2	23,2

Nota. Se asumen condiciones normales de T y P en el proceso.

4.1.7.3 Dimensionamiento de Equipos Principales para el Proceso de Aprovechamiento de Residuos en CDR. El equipo principal para utilizar en este proceso es una trituradora industrial, que permita disminuir el tamaño de los residuos hasta el estándar mínimo establecido.

Para el dimensionamiento del equipo, se recibió asesoramiento por parte de la empresa Termacol. En la tabla 11 se presenta las características del equipo triturador, los requerimientos para el funcionamiento y una imagen del equipo.

Tabla 11

Especificaciones técnicas e imagen del triturador UNTHA Longlife para alternativa de CDR.

Tritrador marca UNTHA Longlife	
Modelo	RS40/RS60-100
Capacidad	1000-2000 kg/h
Sistema motriz	Transmisión directa electromecánica mediante caja de cambios de piñones en 3 etapas
Potencia	2 motores x 25 HP / 2 motores x 40 HP
Potencia nominal	44 kW
Voltaje	480 V 60 Hz
Ancho sistema de corte	1000 mm
Tamaño de criba	40 mm
Sistema de control	SIEMENS SIMATIC S7-1200/CPU1214
Apertura boca de carga	1000 x 700 mm
Peso total	3600 kg



Nota. Elaborado a partir de los datos brindados por Termacol.

4.2 Prefactibilidad Técnica de Aprovechamiento Energético de Residuos

4.2.1 Criterios de Inclusión o Exclusión de Materiales Susceptibles para Aprovechamiento Energético.

En el caso de una empresa de disposición final de residuos peligrosos, las características de los residuos que se disponen varían mucho. Estos residuos presentan características RESPEL y por tanto se debe tener en cuenta la característica de el residuo o el contaminante de este.

En la tabla 12 se presenta los criterios iniciales de inclusión o exclusión de residuos dependiendo de sus características de peligrosidad, contaminante, características fisicoquímicas y potencial de aprovechamiento en incineración para aprovechamiento energético. Cabe aclarar que algunos de los residuos líquidos peligrosos pueden ser utilizados para la formulación de CDR, como, por ejemplo, combustibles, solventes, alcoholes y demás compuestos inflamables que al impregnar la formula sólida de CDR puede incrementar su poder calorífico para cumplir con el estándar mínimo.

Tabla 12

Criterios iniciales de inclusión o exclusión de materiales para aprovechamiento.

Inclusión	Exclusión
Residuos de tela (trapos, estopas y/o fibras), plásticos, caucho, o demás comprendidos como epp o similares que estén o no contaminados	Contaminado con sustancias nocivas como agroquímicos, pesticidas, sustancias corrosivas, compuestos que liberen sustancias peligrosas al incinerarse, con alto contenido de metales pesados, cloro o azufre.
Residuos de madera o derivados (aserrín) que estén o no contaminados	Residuos de vidrio o metálicos

Resido de envases plásticos que estén o no contaminados	Residuos con contenido de PCBs
Residuos de hidrocarburos en estado sólido o semisólido que estén o no contaminados	Residuos de medicamentos u hospitalarios que puedan tener riesgo biológico
Residuos lignocelulósicos (papel, cartón o demás similares) que estén o no contaminados	Residuos de envases presurizados que puedan causar riesgo de explosión
Residuos líquidos inflamables	Residuos líquidos contaminados con sustancias nocivas como agroquímicos o sustancias que generen gases tóxicos en la incineración

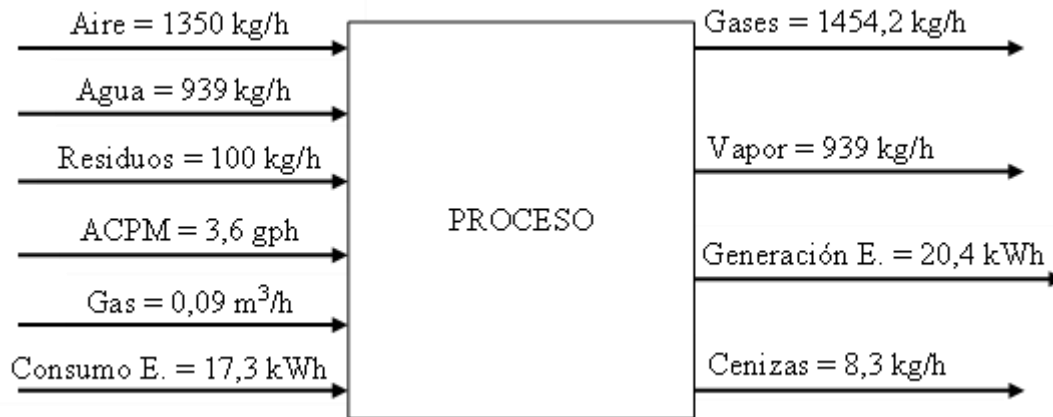
4.2.2 Definición Técnica del Proceso y Equipos para Aprovechamiento Energético

4.2.2.1 Diagrama Entrada – Salida. En el proceso de incineración con aprovechamiento energético según indicaciones de CGS de capacidad y disposición de residuos, se asume una capacidad de procesamiento de residuos de 9600 kg mensuales. Considerando una operación de media jornada laboral (96 horas mensuales) se obtiene un flujo de operación de 100 kg/h de procesamiento de residuos. En la figura 7 se presenta el diagrama Entrada – Salida del proceso de incineración con aprovechamiento energético.

Para las especificaciones del proceso, se recibió asesoramiento por parte de la empresa Termacol en el consumo, operación y producción del proceso de incineración con aprovechamiento energético, fundamentada en su equipo CVD para valorización energética de residuos y realizando el cálculo con las especificaciones de producción de CGS. El equipo CVD tiene incluido el sistema de aprovechamiento energético al tener una turbina de generación eléctrica, por ello, se incluye el flujo de energía eléctrica.

Figura 7

Diagrama Entrada - Salida para el proceso de incineración con aprovechamiento energético.

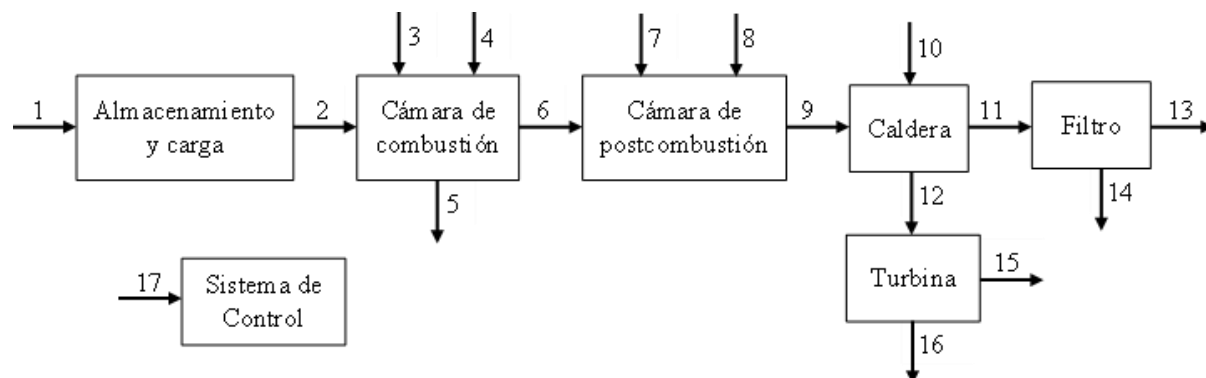


Nota. Elaborada a partir de los datos suministrados por la empresa Termacol.

4.2.2.2 Diagrama de Proceso y Tabla de Corrientes. En la figura 8 se presenta el Block Flow Diagram (BFD) del proceso de incineración con aprovechamiento energético

Figura 8

BFD del proceso de incineración con aprovechamiento energético.



Cenizas [kg/h]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gas combustión [kg/h]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gas postcombustión [kg/h]	581,7	0,0	581,7	0,0	0,0	290,8	0,0	0,0	0,0
Gas chimenea [kg/h]	0,0	0,0	0,0	0,0	290,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Vapor de agua [kg/h]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

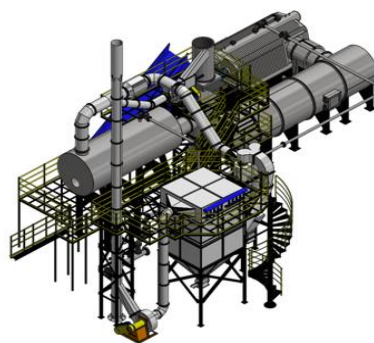
4.2.2.3 Dimensionamiento de Equipos Principales para el Proceso de Incineración con Aprovechamiento Energético. En este proceso el equipo principal es el horno de incineración y el sistema de aprovechamiento energético con una turbina. En Termacol tienen un equipo de valorización energética CVD que cumple con todos los requisitos de equipo.

Para el dimensionamiento del equipo, se recibió asesoramiento por parte de la empresa Termacol. En la tabla 15 se presenta las características técnicas del equipo de tratamiento térmico y aprovechamiento energético, los requerimientos para el funcionamiento y una imagen del equipo.

Tabla 15

Especificaciones técnicas del equipo de tratamiento térmico por combustión y aprovechamiento energético.

Equipo para tratamiento térmico por combustión y aprovechamiento energético	
Capacidad nominal	300 kg/h
Vapor generado	2817,4 kg/h
Consumo de aceite combustible	10,8 Gph
Aire requerido	4050,2 kg/h
Gases chimenea	4308 kg/h
Cenizas	25 kg/h
Consumo eléctrico	42,55 kWh
Consumo gas natural	0,28 m ³ /h
Generación eléctrica	50 kWh



Nota. Elaborado a partir de las especificaciones brindadas por la empresa Termacol.

4.3 Prefactibilidad Financiera

4.3.1 Estimación de la Demanda y Oferta de CDR

4.3.1.1 Oferta de CDR Según la Capacidad de Producción. La oferta de CDR se estima de acuerdo con la capacidad de producción de la planta, sin embargo, también es importante visualizar la producción de la materia prima que se espera sustituir, en este caso, el carbón. Siendo así, Según el Ministerio de Minas y Energía (2021) entre 2012 y 2020, la producción anual de Colombia promedió 83,9 millones de toneladas. Con estas cifras, Colombia se constituye como el principal productor de carbón en América Latina, el 11° a nivel mundial y el 5° mayor exportador de carbón del mundo. En 2020, en el marco de la pandemia mundial por Covid-19, se produjo una caída de 42% en la producción, llevando la producción nacional a los 49,5 millones de toneladas. En el primer trimestre de 2021, la producción se recuperó, creciendo 52% frente a lo observado en el último trimestre de 2020 y alcanzando los 13,9 millones de toneladas. No se tienen datos de la producción final de 2021 a 2023, sin embargo, por la reactivación económica del país en la postpandemia, se espera que la producción nacional de carbón se estabilice de acuerdo con la producción prepandemia.

Por otro lado, en Colombia, no hay establecido un mercado de CDR, pues es una tecnología relativamente nueva en la región. Según Centro RS (2022), Ática, la empresa pionera en producción de CDR en Colombia trató en 2019 un total de 14.825 toneladas en incineración en Colombia por cuenta de la tecnología CDR. Durante 2020 llevó 14.465 toneladas tratadas a sus hornos y CDR.

Finalmente, siendo moderado, se propone tomar el 65,8% de residuos aprovechables recibidos en la celda de seguridad en 2023, lo que equivale a 100 toneladas mensuales con la posibilidad de aumentar esta cantidad según el incremento en la recepción de residuos.

4.3.1.2 Demanda de CDR Respecto al Proceso Objetivo Comercial (Horno Cementero). Como se menciona anteriormente, el objetivo comercial inicial de la producción de CDR son los hornos cementeros colombianos, dichos hornos utilizan principalmente carbón para su funcionamiento. Para la estimación de la demanda de CDR se utilizará la demanda de carbón en dicho sector industrial en Colombia y se decidirá el porcentaje de demanda nacional a cubrir con la producción local de CDR.

Según FENALCARBÓN (2024) se estima que la demanda interna de carbón en Colombia es de 8 millones de toneladas. Esto comprende toda la demanda nacional, sin embargo, en este caso se debe sectorizar a la demanda en el sector cementero para tener un dato más exacto. No existe puntualmente la demanda de carbón por el sector cementero.

Ahora bien, según John (2020) la relación de producción de Clinker (que al realizarle un proceso de triturado y molido se obtiene el cemento) y consumo de carbón es de 9,5 kg Clinker/kg de carbón, existen factores que pueden variar este valor, sin embargo, es un valor promedio aproximado para poder calcular la demanda de carbón según la producción nacional de carbón.

Según el DANE (2024) el promedio anual de producción de cemento gris es de 14 millones de toneladas de cemento. Con la producción nacional de cemento y la relación de Clinker/carbón, se obtiene que el consumo de carbón para la producción de dicho cemento es de 1.473.684 toneladas.

Con la capacidad de producción de la planta de 1200 toneladas anuales, se espera abarcar el 0,081% de la demanda de carbón para el sector cementero colombiano.

4.3.2 Determinación del CAPEX y del OPEX de las Alternativas de Aprovechamiento

4.3.2.1 Costos Fijos de Implementación. Para cualquiera de los dos sistemas de aprovechamiento de residuos se contempla unos costos fijos de construcción y adecuación de infraestructura para instalación de maquinaria y accesibilidad a la zona.

La empresa cuenta con un predio de aproximadamente 19.920 m² vacíos actualmente, donde se planea implementar diferentes procesos. En dicho predio se propone implementar el sistema de aprovechamiento de residuos elegido.

Para la utilización del predio, se debe realizar una adecuación del terreno, construcción de vía de acceso, construcción de cuarto de mantenimiento, herramientas e insumos y la construcción de la bodega y/o edificación donde se instalará el sistema de aprovechamiento. Según una cotización realizada a la empresa Termacol, un valor del costo de construcción del predio con las especificaciones brindadas es de aproximadamente \$1.000.000.000 COP en obras civiles.

4.3.2.2 CAPEX y OPEX de la Alternativa de CDR. En la tabla 16 se presenta los costos de CAPEX según la cotización a la empresa Termacol para la alternativa de CDR.

Tabla 16

CAPEX de la alternativa de aprovechamiento en CDR.

Concepto	Valor [COP]
Ingeniería detalle de ubicación de equipo	\$ 30.000.000,0
Obras civiles	\$ 1.000.000.000,0
Triturador CDR	\$ 575.000.000,0
Transporte y nacionalización triturador CDR	\$ 34.500.000,0
Total	\$ 1.639.500.000,0

Nota. Elaborado a partir de la cotización suministrada por la empresa Termacol.

Según indicaciones de Termacol para el funcionamiento de la trituradora, en la tabla 17 se calcula el OPEX para la alternativa de CDR. En dicha tabla se tiene en cuenta el consumo nominal

de la trituradora y considerando una operación de 1.040 kg/h, se procesan las 100 toneladas de residuos en 96 horas mensuales, es decir, media jornada laboral. Adicionalmente, según las tarifas de consumo de ENEL S.A (empresa de energía de Mosquera, Cundinamarca), el costo en marzo 2024 es de \$1.012,0499 COP/kWh para horarios punta en sectores industriales.

Tabla 17

OPEX de la alternativa de CDR.

Concepto	Descripción	Valor mensual [COP]	Valor anual [COP]
Consumo energético	Según el consumo nominal, el tiempo de operación y el costo de energía de ENEL S.A, el consumo es de 4.224 kWh al mes	\$ 4.272.898,80	\$ 51.274.785,60
Personal	Auxiliar operativo, media jornada laboral	\$ 731.000	\$ 8.772.000,00
Mantenimiento	Bimensual, refacciones y personal	\$ 500.000	\$ 6.000.000,00
Total		\$ 5.503.898,80	\$ 66.046.785,60

Nota. Elaborado a partir de las especificaciones técnicas del equipo brindadas por Termacol y los datos de tarifas de ENEL S.A.

4.3.2.3 CAPEX y OPEX de la Alternativa de Horno con Aprovechamiento. En la tabla 18 se presenta el cálculo del CAPEX para la alternativa de horno con aprovechamiento. Al igual que en el CAPEX de la alternativa de CDR, se tiene en cuenta el valor de construcción total de obras civiles y el costo de ingeniería de instalación y alistamiento de los equipos.

Tabla 18

CAPEX de la alternativa de horno de incineración con aprovechamiento energético.

Concepto	Valor [COP]
Ingeniería detalle de ubicación de equipo	\$ 50.000.000,0
Obras civiles	\$ 1.000.000.000,0

Caldera valorización CDV 250	\$ 2.780.000.000,0
Turbina 125 KVA	\$ 557.500.000,0
Total	\$ 4.387.500.000,0

Nota. Elaborado a partir de la cotización suministrada por la empresa Termacol.

Considerando las indicaciones de la empresa Termacol, en la tabla 19 se presenta el OPEX para la alternativa de horno con aprovechamiento energético. Debido a que hay generación de energía y vapor que se aprovecharan en otros procesos (por confidencialidad no puedo nombrarlos) se incluirá en el balance del OPEX el costo de la energía generada y el apreciativo de la generación de vapor, ya que, se elimina la necesidad de una caldera adicional para la generación de vapor. Finalmente, se tienen las mismas consideraciones de operación y energéticas para el caso anterior, entendiendo que, los residuos que se utilizan en CDR particularmente no se incineran, otros en las mismas proporciones, si deben llevar este tratamiento físico para su correcta disposición final. Por tanto, se asume la cantidad nominal de operación de residuos del equipo.

El consumo mensual de ACPM del horno es de 1.036,8 galones. Según el Ministerio de Minas y Energía (2023) “el precio promedio de venta al público del ACPM a nivel nacional se mantiene sin ajustes en \$9.065 por galón”. Precio que se tomará para calcular el consumo de ACPM del horno. El consumo total de gas natural para operación de media jornada laboral (96 h mensuales) es de 26,88 m³. Según Vanti S.A ESP para enero de 2024 la tarifa de cobro de gas natural para consumo hasta 10.000 m³ al mes es de \$2.394,5 COP/m³.

Tabla 19

OPEX de la alternativa de horno con aprovechamiento energético.

Concepto	Descripción	Valor mensual [COP]	Valor anual [COP]
-----------------	--------------------	--------------------------------	------------------------------

Consumo energético	Según el consumo nominal, el tiempo de operación y el costo de energía de ENEL S.A, el consumo es de 4.134 kWh al mes	\$ 4.134.021,40	\$ 49.608.256,80
Consumo de ACPM	Según el tiempo de operación, consumo del horno y el valor del ACPM	\$ 9.398.592,00	\$ 112.783.104,00
Consumo de gas	Según el tiempo de operación, consumo del horno y el valor del gas	\$ 64.364,20	\$ 772.370,40
Personal	Técnico operativo, media jornada laboral	\$ 837.500	\$ 10.050.000,00
Mantenimiento	Bimensual, refacciones y personal	\$ 1.000.000	\$ 12.000.000,00
Generación	Apreciativa de generación de energía eléctrica y vapor	-\$ 5.000.000	-\$ 60.000.000,00
Total		\$ 10.434.477,60	\$ 125.213.731,20

Nota. Elaborado a partir de las recomendaciones de Termacol, el Ministerio de Minas y Energía y los precios del gas natural de Vanti S.A ESP para enero 2024.

4.3.3 Flujos de Caja e Indicadores Financieros de las Alternativas de Aprovechamiento.

4.3.3.1 Alternativa de Aprovechamiento en CDR. Para calcular las ganancias de la venta de CDR y obtener el flujo de caja, se compara con el precio del carbón colombiano y se ajusta dependiendo del valor. Según los datos del UPME (2023) el valor del carbón ha aumentado en los últimos años, sin embargo, el valor promedio del carbón es de \$177.000 COP/ton. Tomando en cuenta ese valor, para que el producto de CDR sea competitivo y atractivo para la industria, se opta por un valor del 85% del valor del carbón, siendo este \$150.450 COP/ton.

Según la producción propuesta de 100 ton mensuales de CDR, sería un total de 1.200 ton de CDR anuales, generando unas ganancias de \$180.540.000 COP para el primer año de venta.

Para la proyección de los valores se utilizará el promedio de la inflación nacional de los últimos 5 años. Según los datos del DANE (2024) publicados en el Banco de la República, la inflación promedio de los últimos 5 años es del 6,35%. Según la misma fuente, el promedio de

cobro de impuesto es de alrededor del 34%. Para el valor de la depreciación de los equipos, se asume una depreciación lineal en el periodo proyectado de 20 años.

En las tablas 20 y 21 se presenta el flujo de caja neto de la alternativa de aprovechamiento en CDR con el índice EBITDA en cada uno de los años de la proyección. Se evidencia un flujo de caja positivo, es decir, las ganancias superan la inversión operativa cada año. También, reporta un EBITDA positivo, lo cual implica que se obtienen beneficios económicos de la actividad.

Tabla 20

Proyección a 20 años de flujo de caja e índice EBITDA de la alternativa de aprovechamiento en CDR (parte 1).

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ganancias [MCOP]	0,0	180,5	192,0	204,2	217,2	231,0	245,6	261,2	277,8	295,4
OPEX [MCOP]	0,0	66,0	70,2	74,7	79,4	84,5	89,9	95,6	101,6	108,1
CAPEX [MCOP]	1.639,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EBITDA [MCOP]	-1.639,0	114,5	121,8	129,5	137,7	146,5	155,8	165,7	176,2	187,4
Depreciación [MCOP]	0,0	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8
Utilidad antes de impuestos [MCOP]	-1.639,0	85,7	93,0	100,7	109,0	117,7	127,0	136,9	147,4	158,6
Impuestos (34%)	0,0	29,2	31,6	34,3	37,0	40,0	43,2	46,5	50,1	53,9
FCN [MCOP]	-1.639,0	56,6	61,4	66,5	71,9	77,7	83,8	90,4	97,3	104,7

Tabla 21

Proyección a 20 años de flujo de caja e índice EBITDA de la alternativa de aprovechamiento en CDR (parte 2).

Año	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ganancias [MCOP]	314,2	334,2	355,4	377,9	401,9	427,5	454,6	483,5	514,2	546,8	581,5
OPEX [MCOP]	114,9	122,2	130,0	138,3	147,0	156,4	166,3	176,9	188,1	200,0	212,7
CAPEX [MCOP]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EBITDA [MCOP]	199,3	211,9	225,4	239,7	254,9	271,1	288,3	306,6	326,1	346,8	368,8
Depreciación [MCOP]	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8
Utilidad antes de impuestos [MCOP]	170,5	183,2	196,6	210,9	226,1	242,3	259,5	277,9	297,3	318,0	340,1
Impuestos (34%)	58,0	62,3	66,9	71,7	76,9	82,4	88,2	94,5	101,1	108,1	115,6

FCN [MCOP]	112,5	120,9	129,8	139,2	149,3	159,9	171,3	183,4	196,2	209,9	224,4
------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Ahora bien, para analizar la opción de inversión y sustentar el atractivo financiero de la alternativa, se calcula el VPN, ROI y *payback* para tener claridad en la viabilidad de la inversión. En la ecuación 2 del ROI se entiende como beneficio obtenido al total de beneficios económicos o flujo de caja neto (FCN) en el periodo a analizar. En la tabla 22 se presenta los indicadores financieros obtenidos a partir del flujo de caja.

$$\% ROI = \frac{\text{Beneficio obtenido}}{\text{Inversión}} * 100 \quad (\text{Ec.2})$$

Tabla 22

Indicadores financieros de la alternativa de aprovechamiento en CDR.

Índice	Valor
VPN	-918,3
ROI	-56%
PAYBACK [años]	-

El VPN reporta un valor negativo, es decir, no es rentable en la proyección a 20 años, el ROI, al igual que el VPN, reporta un valor negativo, lo cual indica que, según los beneficios económicos obtenidos, no es económicamente viable. Finalmente, no es posible calcular un valor del *payback* al tener un VPN negativo, es decir, en el periodo de evaluación del proyecto no es posible recuperar la inversión.

4.3.3.2 Alternativa de Horno con Aprovechamiento Energético. En este caso, las ganancias del proyecto son la tarifa de cobro de la empresa por el proceso de termodestrucción de residuos, la cual es de \$700.000 COP/ton y se comprende la cantidad de 345,6 ton anuales de residuos para este proceso.

Se toman las mismas consideraciones de proyección e impuestos. Según recomendación del productor Termacol, el equipo de valorización energética de residuos se deprecia a 30 años de forma lineal.

En las tablas 23 y 24 se presenta el flujo de caja y el EBITDA con proyección a 20 años para la alternativa de horno con aprovechamiento energético. Al igual que el caso anterior, el flujo de caja presenta valores positivos, es decir, cada periodo genera beneficio económico y el EBITDA igualmente es positivo.

Tabla 23

Proyección a 20 años de flujo de caja e índice EBITDA de la alternativa de horno con aprovechamiento energético (parte 1).

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ganancias [MCOP]	0,0	241,9	257,3	273,6	291,0	309,5	329,1	350,0	372,2	395,9
OPEX [MCOP]	0,0	125,2	133,2	141,6	150,6	160,2	170,3	181,1	192,6	204,9
CAPEX [MCOP]	4.387,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EBITDA [MCOP]	-4.387,5	116,7	124,1	132,0	140,4	149,3	158,8	168,9	179,6	191,0
Depreciación [MCOP]	0,0	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3
Utilidad antes de impuestos [MCOP]	-4.387,5	5,5	12,9	20,8	29,1	38,1	47,5	57,6	68,4	79,8
Impuestos (34%)	0,0	1,9	4,4	7,1	9,9	12,9	16,2	19,6	23,2	27,1
FCN [MCOP]	-4.387,5	3,6	8,5	13,7	19,2	25,1	31,4	38,0	45,1	52,6

Tabla 24

Proyección a 20 años de flujo de caja e índice EBITDA de la alternativa de horno con aprovechamiento energético (parte 2).

Año	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ganancias [MCOP]	421,0	447,8	476,2	506,4	538,6	572,8	609,2	647,8	689,0	732,7	779,3
OPEX [MCOP]	217,9	231,7	246,4	262,1	278,7	296,4	315,3	335,3	356,6	379,2	403,3
CAPEX [MCOP]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EBITDA [MCOP]	203,1	216,0	229,8	244,3	259,9	276,4	293,9	312,6	332,4	353,5	376,0
Depreciación [MCOP]	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3
Utilidad antes de impuestos [MCOP]	91,9	104,8	118,5	133,1	148,6	165,1	182,7	201,3	221,2	242,3	264,7

Impuestos (34%)	31,2	35,6	40,3	45,3	50,5	56,1	62,1	68,4	75,2	82,4	90,0
FCN [MCOP]	60,6	69,2	78,2	87,8	98,1	109,0	120,6	132,9	146,0	159,9	174,7

Finalmente, al igual que en el caso anterior, se calcula el VPN, ROI y payback para tener claridad en la viabilidad de la inversión. En la tabla 25 se presenta los indicadores financieros obtenidos a partir del flujo de caja.

Tabla 25

Indicadores financieros de la alternativa de horno con aprovechamiento.

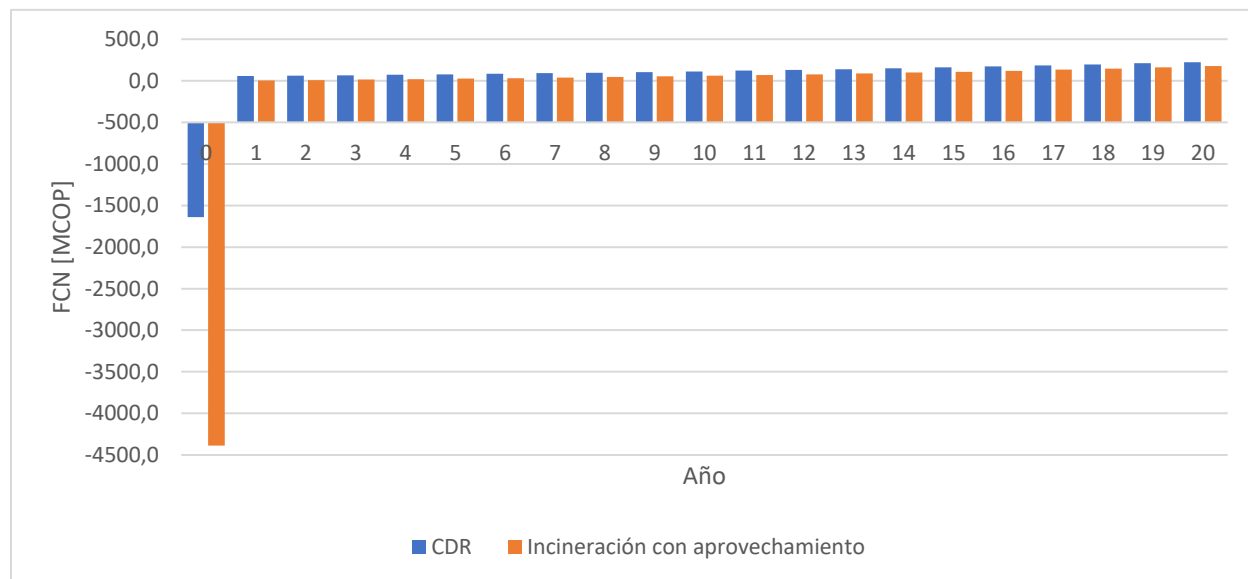
Indicador	Valor
VPN	-4056,7
ROI	-92%
PAYBACK [años]	-

Al igual que en el caso anterior, el VPN es un valor negativo, sin embargo, en este caso es de una magnitud mayor, el ROI, al igual que en el caso anterior, es negativo y de mayor magnitud, al acercarse al -100% financieramente indica que se acerca a la pérdida total de la inversión, finalmente, el *payback* no es posible calcularlo en ese periodo de tiempo, ya que, en la proyección de 20 años no es posible recuperar la inversión.

Para visualizar la comparativa entre las dos opciones de aprovechamiento de residuos, en la figura 9 se presenta los flujos de caja de la alternativa de aprovechamiento en CDR y de incineración con aprovechamiento energético (Tener en cuenta el posicionamiento del eje x para una correcta visualización). El beneficio económico de dichas alternativas podría mejorarse al aplicar a exención de impuestos por la contribución a la disminución de huella de carbono, además de incentivos y programas propios del gobierno que apoyan los sistemas de aprovechamiento de residuos.

Figura 9

Comparativa de flujo de caja neto de la alternativa de aprovechamiento en CDR e incineración con aprovechamiento energético.



5. Conclusiones

Según las características fisicoquímicas de la gran cantidad de residuos que se disponen en la celda de seguridad, es indispensable abordar una alternativa de aprovechamiento de dichos residuos. Con estos residuos y el análisis técnico, se determina que las variables representativas para el análisis de CDR son el poder calorífico y la humedad. Dichos residuos tienen un gran potencial de aprovechamiento como CDR ya que hay buena disponibilidad, necesita poco pretratamiento y una preparación simple, además, cumple con el estándar mínimo de poder calorífico para utilizar en la preparación y comercialización de este.

A partir del análisis de la base de datos de cantidades y características de los residuos que pueden ser aprovechables, existe la posibilidad de aprovechar alrededor de 100 toneladas mensuales de residuos sólidos. Particularmente, los sólido-hidrocarburo son el grupo con mayor

cantidad de disposición de residuos, sin embargo, son muy variables en cuanto a características fisicoquímicas entre cada residuo.

Las fórmulas de residuos planteadas para la generación del CDR cumplen con los requisitos mínimos en las muestras de laboratorio. En estas pruebas se evidenció la posibilidad de utilizar residuos líquidos inflamables como solventes para impregnar las fórmulas de CDR y así aumentar su poder calorífico, generando la opción de utilizar residuos con poder calorífico menor en las fórmulas y así, aumentar la gama de residuos que se pueden aprovechar.

El horno de incineración con aprovechamiento energético es viable técnicamente. El equipo de CVD de Termacol es mejor que los hornos de incineración convencionales, ya que, tiene ciclo de vapor, generación de energía eléctrica, reducción y captación de contaminantes ambientales. Adicionalmente, se puede obtener beneficio económico con la tarifa de termo-destrucción de residuos.

En el análisis económico de las dos alternativas de aprovechamiento, se observa una considerable inversión. Según los indicadores financieros la alternativa de CDR no recupera su inversión inicial en los 20 años proyectados, al igual que la alternativa del horno con aprovechamiento, en ambos casos es considerable el tiempo de espera. Esto sucede por la importante inversión en CAPEX, específicamente, en infraestructura y obras civiles para la adecuación del predio de construcción de ambos proyectos, dicho costo se puede reducir si se opta por medidas más conservadoras a la hora de la construcción (siempre cumpliendo con la normativa).

Finalmente, se determina que la alternativa más rentable económicamente y sencilla tanto de construcción como operación es el aprovechamiento de residuos con CDR para su

comercialización. A pesar de los valores negativos en el análisis económico, con una adecuada reevaluación económica podría ser viable económicamente. No requiere ingeniería especializada para su construcción e instalación, su operación es sencilla, la inversión es recuperable en un menor plazo y se logra un aprovechamiento de residuos óptimo, donde, se puede abordar la posibilidad de obtener beneficios económicos por parte del gobierno al contribuir con la reducción de huella de carbono y generación de tecnologías de aprovechamiento circulares y sostenibles.

6. Recomendaciones

Para cada lote de residuos que se pretenda aprovechar se le deben realizar los análisis pertinentes, pues como son residuos peligrosos, tienden a variar mucho en composición fisicoquímica aun siendo de la misma procedencia.

Se debe realizar una reevaluación de costos de infraestructura para lo estrictamente necesario para el funcionamiento de cualquiera de las dos alternativas. En este caso, algunas de las edificaciones que se tienen en cuenta son: construcción de vías, caseta de vigilante con palanquera, cuarto de herramientas y repuestos y zona de parqueo. Dichas obras pueden omitirse y optimizarse el costo de obras civiles para reducir el CAPEX de cualquiera de las dos alternativas.

En el caso de la alternativa de aprovechamiento en CDR no se tiene en cuenta el cobro a los clientes por la disposición de los residuos, es decir, si se considera un cobro por la gestión y aprovechamiento del residuo, implicaría una ganancia adicional, que puede aumentar los beneficios económicos en el FCN.

En el caso de la alternativa con aprovechamiento energético es considerable su inversión, para la implementación de esta alternativa se debe tener una base sólida de procesos donde se

pueda crear la sinergia del aprovechamiento energético del vapor de calentamiento generado en la caldera, al considerarse, implica beneficios económicos en el proceso por eliminar la necesidad de una caldera adicional de generación de vapor e igualmente verse reflejado en una contribución económica en el FCN.

Se debe tener en cuenta los beneficios económicos que el gobierno puede aportar a estos tipos de proyectos de aprovechamiento de residuos. Al igual que se debe tener en cuenta los costos de las licencias de construcción y ambientales, que deben ser tramitadas para llevar a cabo cualquiera de las dos alternativas de proyecto.

Se debe esperar a tener la suficiente capacidad de producción y procesamiento para poder operar los equipos a su capacidad nominal y así aprovechar al máximo la capacidad de producción, de esta forma, se incrementan los beneficios económicos.

Se debe evaluar la capacidad de sustitución parcial o total del CDR por el carbón utilizado en los hornos de las cementeras, para determinar su atractivo comercial.

Referencias Bibliográficas

- Amulen, J., Kasedde, H., Lwanyaga, J., & Serugunda, J. (2022). The potential of energy recovery from municipal solid waste in Kampala City, Uganda by incineration. *Energy Conversion and Management: X*, 14. doi:10.1016/j.ecmx.2022.100204.
- Centro RS. (2022). Colombia cuenta con primera planta de combustible derivado de residuos. Obtenido de <https://centrors.org/colombia-cuenta-con-primera-planta-de-combustible-derivado-de-residuos/>
- FENALCARBÓN. (2024). La demanda mundial de carbón llegó a sus máximos niveles en 2023. Obtenido de <https://fenalcarbon.org.co/2024/02/14/la-demanda-mundial-de-carbon-llego-a-sus-maximos-niveles-en-2023/>
- Holz, F., Haftendorn, C., Mendelevitch, R., & Von Hirschhausen, C. (2016). A model of the international steam coal market (COALMOD-World). *Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung*.
- IDEAM. (2019). Residuos peligrosos. Obtenido de <http://www.siac.gov.co/respell>
- John, J. P. (2020). Parametric Studies of Cement Production Processes. *Journal of Energy*. doi:10.1155/2020/4289043
- Karpan, B., Raman, A., & Taieb Aroua, M. K. (2021). Waste-to-energy: Coal-like refuse derived fuel from hazardous waste and biomass mixture. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 655-664. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.009>.

- Kaza, S., Lisa, Y., Perinaz, B. T., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *Urban Development Series*. doi:10.1596/978-1-4648-1329-0
- Martínez, J. H., Romero, S., Ramasco, J. J., & Estrada, E. (2022). The world-wide waste web. *Nature Communications*, 13(1615). doi:https://doi.org/10.1038/s41467-022-28810-x
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). Minería de carbón en Colombia. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/static/mineriaco/src/document/documento%20carbon.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). Precios de venta al público de la gasolina y del ACPM se mantienen sin modificación para octubre de 2023. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/precios-de-venta-al-p%C3%ABlico-de-la-gasolina-y-del-acpm-se-mantienen-sin-modificaci%C3%B3n-para-octubre-de-2023/>
- Ramírez, Y., & Vargas, F. (2014). Potencial de energía calorífica de los residuos sólidos municipales para reemplazar el carbón mineral. *Teknos Revista científica*, 14(2), 23-26. doi:https://doi.org/10.25044/25392190.467
- Resolución 909 del 2008. Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. 05 de Junio de 2008.
- Roa García, M. C., & Thema, J. (2023). *La transición energética en Colombia. Situación actual, proyecciones, desafíos, narrativas y políticas públicas – en relación con la transición energética en Alemania*.

UPME. (2023). Base de datos del carbón. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>

Vanti S.A ESP. (2024). Informe de tarifas para enero 2024. Obtenido de <https://www.grupovanti.com/servicios-gas/distribucion-de-gas/busqueda-de-distribucion-gas-tarifas?empresa=Vanti%20S.A.%20ESP&anio=2024>

Vasiliu, L., Gencil, O., Damian, I., & Harja, M. (2023). Capitalization of tires waste as derived fuel for sustainable cement production. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103104>.