

Diseño de un sistema ingenieril para la reducción de emisiones atmosféricas de la fuente fija
de una caldera pirotubular de combustión por carbón mineral

Jose Daniel Peñaloza Guzmán

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Prof. Jeferson Owaldo Ruiz Lizarazo

Magíster en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2023

Tabla de Contenido

Introducción.....	8
1 Justificación y planteamiento del problema	10
2 Objetivos	11
2.1 Objetivo general	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
3 Marco teórico	12
3.1 Emisiones atmosféricas	12
3.2 Marco normativo aplicable.....	13
3.3 Proceso Jerárquico Analítico.....	16
4 Metodología	17
4.1 Revisión bibliográfica	18
4.2 Consecución del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP).....	19
4.3 Diseño de la alternativa tecnológica en la reducción de contaminantes	19
4.4 Elaboración y socialización del informe final.....	19
5 Resultados y análisis	19
5.1 Alternativas tecnológicas para la mitigación de contaminantes en fuentes fijas	20
5.1.1 Control de gases	20
5.1.2 Control de partículas.	24
6 Selección de la alternativa tecnológica mediante el Proceso de Jerarquía Analítica	26
7 Diseño tecnológico para la reducción de contaminantes en fuente fija	30
7.1 Selección del tipo de ciclón.....	31

7.2	Cálculos de las medidas necesarias.....	31
7.2.1	Caracterización del carbón de la fuente fija.....	32
7.2.2	Condiciones de operación de la fuente fija.....	33
7.2.3	Medidas del ciclón.....	34
7.2.4	Cálculo de la eficiencia del ciclón.....	35
7.3	Diseño del ciclón mediante herramientas CAD.....	37
8	Conclusiones.....	39
9	Referencias bibliográficas.....	40
10	Apéndices.....	43

Lista de Tablas

pág.

Tabla 1 <i>Normas que regulan las emisiones de contaminantes por fuentes fijas</i>	13
Tabla 2 <i>Resumen de la información AHP</i>	29
Tabla 3 <i>Resumen de la información AHP</i>	29
Tabla 4 <i>Intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones</i>	31
Tabla 5 <i>Resultados granulometría informe técnico</i>	31
Tabla 6 <i>Parámetros de diseño para los ciclones entrada tangencial</i>	32
Tabla 7 <i>Caracterización carbono</i>	32
Tabla 8 <i>Medidas del ciclón</i>	34
Tabla 9 <i>Parámetros de diseño para los ciclones entrada tangencial</i>	36

Lista de Figuras

pág.

Figura 1. Metodología planteada para la realización del proyecto.....	18
Figura 2. Diagrama de flujo jerárquico para el estudio en el marco selección de la mejor tecnología para el control de emisiones	27
Figura 3. Dimensiones del ciclón.	35
Figura 4. Modelo tridimensional del ciclón diseñado con los parámetros teóricos calculados	38

RESUMEN

TÍTULO: Diseño de un sistema ingenieril para la reducción de emisiones atmosféricas de la fuente fija de una caldera pirotubular de combustión por carbón mineral*

AUTOR: Jose Daniel Peñaloza Guzmán**

PALABRAS CLAVE: Calderas pirotubulares, fuentes fijas, carbón, contaminantes, AHP.

DESCRIPCIÓN: En Colombia, el sector de pequeñas y medianas empresas presenta un acceso restringido a la tecnología y prima la utilización de máquinas y equipos de tecnologías atrasadas. El país posee las mayores reservas de carbón en Latinoamérica y es el cuarto exportador de carbón térmico del mundo. Los numerosos procesos de calentamiento que se utilizan en las refinerías para calentar las corrientes del proceso pueden ser fuentes potenciales de SO_x , NO_x , CO , emisiones de partículas e hidrocarburos. Los resultados del proyecto se dividen en tres partes, la primera corresponde a las alternativas tecnológicas para la mitigación de contaminantes en fuentes fijas, la segunda de la consecución del proceso de Jerarquía Analítica y la tercera del diseño del sistema seleccionado.

Mediante la implementación del Proceso Jerárquico Analítico (AHP) se llevó a cabo la selección de la tecnología más adecuada donde bajo los subcriterios de impacto energético, ambiental, técnico y económico, los ciclones obtienen el nivel más alto de preferencia con el 19% de priorización con el cual se plantea el diseño de un ciclón con eficiencia estimada de 82,7% a partir de parámetros operacionales (caudal, caída de presión, temperatura) de la chimenea de una caldera pirotubular de 80 BHP de capacidad y la caracterización fisicoquímica (Tamaño de partícula, humedad, % ceniza, volátiles) del combustible fósil usado como alimentación (carbón mineral).

ⁱ *Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

ABSTRACT

TITLE: Design of an engineering system for the reduction of atmospheric emissions from the stationary source of a pyro-tubular coal fired boiler*

AUTHOR: Jose Daniel Peñaloza Guzman **¹

KEY WORDS: Fire-tube boiler, fixed sources, coal, pollutants, AHP.

DESCRIPTION: In Colombia, the small and medium-sized business sector has restricted access to technology and the use of machines and equipment with backward technologies prevails. The country has the largest coal reserves in Latin America and is the fourth largest exporter of thermal coal in the world. The numerous heating processes used in refineries to heat process streams can be potential sources of de SO_x, NO_x, CO particulate emissions and hydrocarbons. The results of the project are divided into three parts, the first corresponds to the technological alternatives for the mitigation of pollutants in fixed sources, the second to the achievement of the Analytical Hierarchy process and the third to the design of the selected system.

Through the implementation of the Analytical Hierarchical Process (AHP), the selection of the most appropriate technology was carried out where under the subcriteria of energy, environmental, technical and economic impact, the cycles obtain the highest level of preference with 19% prioritization with which the design of a cyclone with an estimated efficiency of 82.7% is proposed based on operational parameters (flow, pressure drop, temperature) of the chimney of a fire-tube boiler of 80 BHP capacity and the physicochemical characterization (Size particle size, humidity, % ash, volatiles) of the fossil fuel used as feed (mineral coal).

¹ Degree work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Msc. Jeferson Owaldo Ruiz Lizarazo.

Introducción

De los 3.5 trillones de toneladas de reservas de combustibles fósiles del mundo, el carbón, el petróleo y el gas representan alrededor del 81%, 17% y 2% respectivamente (Corona et. al., 2014; Niño et. al., 2012). En Latinoamérica, Colombia es uno de los países con los mayores recursos y reservas de carbón bituminoso de excelentes calidades, que lo hace competitivo frente a otros mercados y es el cuarto exportador de carbón térmico del mundo. Este potencial energético debe buscar dar valor agregado a los recursos locales (Tamayo et. al., 2012; Muñoz & Quiroz, 2007; Niño et. al., 2012; Barrera, 2014).

Dada la abundancia y el reducido valor económico del carbón frente a los demás combustibles, este llega a ser utilizado a nivel industrial como materia prima en calderas de combustión², especialmente en medianas y pequeñas empresas (PYME), aprovechando su uso al convertir la energía química almacenada en el fósil, en energía térmica, mediante diversos mecanismos cinéticos de reacción química, denominados combustión (Tamayo et. al., 2012).

En Colombia se estima aproximadamente 15.000 calderas instaladas, de las cuales cerca del 62% funcionan bajo una configuración pirotubular, 12,5% en configuración acuotubular y cerca del 25% en configuración combinada, estas últimas exclusivamente en pequeñas empresas, con potencias que oscilan entre 50-120 BHP para combinadas y entre 100-1800 BHP para pirotubulares y acuotubulares, con mayor incidencia en PYME de 100 a 300 BHP de potencia (Hoyos-Barreto et. al., 2008; Toro-Cataño et. al., 2017).

² Calderas: equipos para generar vapor a partir de una fuente de calor. Comúnmente existen tres clasificaciones para las calderas según su configuración: las calderas pirotubulares, las calderas acuotubulares y las combinadas.

La operación de calderas mediante el uso de carbón como combustible presenta un impacto ambiental severo en la afectación del recurso aire y un impacto ambiental moderado en los recursos agua y suelo respectivamente (Toro-Cataño et. al., 2017; Alcaldía de Medellín, 2020), juicio por el cual el control de la emisión de agentes contaminantes en chimeneas de calderas (fuente fija), representan gran interés en la sociedad y las entidades gubernamentales como las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), las cuales han dispuesto reglamentación bajo el decreto 948 de 1995 y la Resolución 909 del 2008 para emisión a la atmosfera, basados en las directrices de la OMS de calidad del aire³ (Cepeda, 2019; Muñoz & Quiroz, 2007)

Dicha responsabilidad social y ambiental, frente al uso de carbón como materia prima en las diversas actividades industriales se han visto sesgadas de acuerdo a la envergadura de las empresas, es por eso que, las grandes empresas atiende desde la prevención hasta la mitigación y el control de sus fuentes fijas, incluso han podido migrar hacia el uso de combustibles “más” limpios como el gas natural o la biomasa, situación antónima a lo que sucede en las pequeñas y medianas empresas industriales, donde los bajos incentivos económicos gubernamentales, los moderados patrimonios empresariales y la baja supervisión de las entidades regulatorias, han minimizado la intervención y la evaluación de la responsabilidad operacional (Niño et. al., 2012; Cepeda, 2019).

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la implementación de tecnologías de mitigación de contaminantes ambientales, para chimeneas de calderas de combustión por carbón mineral de

³ En septiembre de 2021, la OMS actualizó las directrices mundiales sobre la calidad del aire, donde se recomiendan nuevos valores objetivos para PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, NO₂, SO₂ y CO para alcanzar una calidad del aire que proteja la salud de la población, sin embargo, aún no se han incorporado en la reglamentación nacional.

grandes, medianas y pequeñas empresas del país, surge a partir de la necesidad de cumplimiento de la reglamentación ambiental, la responsabilidad operacional y la intención de prolongar el uso de carbón mineral como combustible de la actividad industrial que se desarrolla (Uribe et. al., 2006).

1 Justificación y planteamiento del problema

Seleccionar la tecnología más ajustable para la mitigación de contaminantes en emisiones de calderas de combustión por carbón mineral debe ser basado en un método científico y no se debe llevar a juicios humanos y menos a experiencias de otras empresas con determinada tecnología, por tanto, el arbitraje recae bajo la categoría de una decisión de multi-criterio, con un número finito de alternativas disponibles y criterios de conflicto entre ellas. En la década reciente la inteligencia artificial (AI) basada en procesos de toma de decisiones poseen un gran atractivo a nivel mundial en las investigaciones. También, procesos similares de toma de decisiones basados en multi-criterio han sido resueltos por diferentes investigaciones usando técnicas como, *Multi Criteria Decision Making (MCDM)*, *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, *TOPSIS*, *optimization multi-criteria*, *Logical Decision (LD)*, *simple additive weighting (SAW)* entre otros.

El proceso de jerarquía analítica (AHP) es una de las metodologías MCDM de computación más famosa y ampliamente utilizada dada la versatilidad para resolver problemas complejos, basándose en la teoría de la prioridad, considerando múltiples criterios y alternativas de forma simultánea (Saaty, 1987; Garcia, et. al., 2006; Levent, 2016; Zhengmin, et. al., 2016).

El método de establecer prioridades para tratar la interdependencia de los elementos de un sistema permite revisar los juicios en un período de tiempo más corto para monitorear la consistencia en los juicios del tomador de decisiones. AHP estructura los problemas del mundo

real de forma jerárquica, por tanto, el cálculo cuantitativo de las clasificaciones para las alternativas tecnológicas de control emisiones depende de varios parámetros importantes, siempre que existen múltiples factores o criterios que afectan y tenemos varias alternativas para elegir. En este sentido, ¿será posible establecer la tecnología y el diseño de un sistema para ser implementado en la reducción de contaminantes de una caldera pirotubular de combustión por carbón mineral?

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar un sistema ingenieril que permita reducir las emisiones atmosféricas de la fuente fija de una caldera pirotubular de combustión por carbón mineral

2.2 Objetivos específicos

Realizar una revisión bibliográfica que permita comprender las diferentes tecnologías para el control de contaminantes, sus ventajas y desventajas, su tipo control y su eficiencia en la reducción de emisiones.

Utilizar un modelo multicriterio basado en un proceso de jerarquía analítica, el cual permita seleccionar la mejor alternativa que satisfaga al conjunto de criterios de evaluación.

Plantear el diseño del sistema de reducción de emisiones atmosféricas involucrando los parámetros operacionales (caudales, potencias, energías, tipo de fluido, temperatura, etc) en el dimensionamiento final del equipo.

3 Marco teórico

3.1 Emisiones atmosféricas

Los principales contaminantes de la producción de vapor en calderas son gases o partículas que provienen en su mayoría de la combustión, en particular de los combustibles fósiles. Teóricamente al quemar el carbón eficientemente con exceso de aire/oxígeno (combustión completa), los únicos productos generados serían el dióxido de carbono y el agua. Sin embargo, si no hay suficiente oxígeno presente para quemar completamente el combustible (combustión incompleta), se pueden formar otros productos que causan contaminación como las partículas de carbono (C) y el monóxido de carbono (CO). Los demás contaminantes provienen de impurezas del combustible fósil formando óxidos de Nitrógeno (NOx) y óxidos de Azufre (SOx).

Los principales efectos de los contaminantes de la combustión sobre el medio ambiente y las personas son los siguientes: (USP Agency, 1998; Cheremisinoff, 2002).

- Emisiones de CO₂: Sus emisiones alteran el ciclo natural del carbono de la tierra y aumentan el efecto invernadero.
- Emisiones de CO: Agente tóxico para el ser humano e implicado en la química del smog fotoquímico, una mezcla de cientos de productos químicos diferentes y peligrosos denominados contaminantes secundarios.
- Emisiones de partículas (Material particulado - PM): Puede causar una variedad de problemas de salud, incluyendo problemas respiratorios, reproductivos y mutaciones.
- Emisiones de Óxidos de Nitrógeno NOx: Engloban tanto Monóxido de nitrógeno (NO) como el dióxido de nitrógeno (NO₂), irritante para los pulmones y los ojos, y generadores de ácido nítrico. Los NOx están involucrados en la química del smog fotoquímico. El ácido nítrico se disuelve en el agua de lluvia, contribuyendo al fenómeno de la lluvia ácida.

- Emisiones de Óxidos de Azufre SO_x: Gas ácido que se disuelve en el agua de lluvia, reaccionando con la misma agua y el oxígeno para formar una solución de ácido sulfúrico contribuyendo a la lluvia ácida. También es un gas nocivo para la salud y un irritante pulmonar.

3.2 Marco normativo aplicable

El marco nacional que regula las emisiones por parte de fuentes fijas se resume en el siguiente cuadro.

Tabla 1

Normas que regulan las emisiones de contaminantes por fuentes fijas

Normativa fuentes fijas	
Resolución 1351 de 1995	Por medio de la cual se adopta la declaración denominada Informe de Estado de Emisiones.
Resolución 619 de 1997	Por la cual se establecen parcialmente los factores a partir de los cuales se requiere permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas
NTC ISO-IEC 17025:2005	Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
Resolución 2202 de 2006	Por la cual se adoptan los Formularios Únicos Nacionales de Solicitud de Trámites Ambientales.

Resolución 909 de 2008 Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.

Ley 1333 de 2009 Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones.

Resolución 760 de 2010 Por la cual se adopta el protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas.

Resolución 1280 de 2010 Por la cual se establece la escala tarifaria para el cobro de los servicios de evaluación y seguimiento de las licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y demás instrumentos de manejo y control ambiental para proyectos cuyo valor sea inferior a 2.115 smmv y se adopta la tabla única para la aplicación de los criterios definidos en el sistema y método definido en el artículo 96 de la ley 633 para la liquidación de la tarifa.

Resolución 2153 de 2010 Por la cual se ajusta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas, adoptado a través de la Resolución 760 de 2010 y se adoptan otras disposiciones.

Decreto 623 de 2011 Por medio del cual se clasifican las áreas-fuente de contaminación ambiental Clase I, II y III de Bogotá, D.C., y se dictan otras disposiciones.

Resolución 6982 de 2011	Por la cual se dictan normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y protección de la calidad del aire.
Resolución 5589 de 2011	Por la cual se fija el procedimiento de cobro de los servicios de evaluación y seguimiento ambiental.
Decreto 019 de 2012	Por el cual se dictan normas para suprimir o reformar regulaciones, procedimientos y trámites innecesarios existentes en la Administración Pública
Resolución 1541 de 2013	Por la cual se establecen los niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1076 del 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
Ley 1801 de 2016	Por la cual se expide el Código Nacional de Policía y Convivencia.
Resolución 2254 de 2017	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones
NTC ISO-IEC 17025:2017	Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.

Nota. Adaptado de la secretaria de ambiente, recursos naturales.

3.3 Proceso Jerárquico Analítico

El Proceso Jerárquico Analítico, conocido como AHP por sus siglas en inglés, permite de una manera eficiente y gráfica organizar la información respecto de un problema de decisión. El método AHP fue introducido por (Saaty, 1987) para el análisis de decisiones. El enfoque se ha aplicado ampliamente a varias áreas diferentes como el social, el sector manufacturero, la política, la ingeniería, la educación, la industria, el gobierno y otros sectores como el deportivo, la gestión y el sector de generación de energía. Sin embargo, aún no existe ningún estudio en la literatura que evalúe y priorice el sistema de control de emisiones.

Para evaluar y comparar ciertos factores, es necesario utilizar herramientas de toma de decisiones que puedan hacer frente a problemas cada vez más complejos que el cerebro humano no puede calcular. En este sentido, las herramientas MCDM (Multi-Criteria Decision Making) y los enfoques asociados se utilizan comúnmente para analizar y tomar decisiones, particularmente en relación con problemas que incluyen diferentes tipos de factores (Garcia, et. al., 2006; Levent, 2016; Zhengmin, et. al., 2016).

AHP es el método más común utilizado en la toma de decisiones, y es un método que se utiliza para seleccionar una alternativa de otra, o para clasificar todas las alternativas en vista de los criterios y subcriterios, que se conocen como factores. El primer paso en el método AHP es descomponer el problema en una estructura jerárquica que consta de todos los factores y alternativas. La idea de la estructura jerárquica (o de red) es establecer relaciones entre el objetivo, sus factores (criterios y subcriterios) y las alternativas, y presentarlas en un orden lógico dentro del proceso de decisión.

Se da paso a la segunda etapa del proceso, la valoración de los elementos. El decisor debe emitir sus juicios de valor o preferencias en cada uno de los niveles jerárquicos establecidos. El

AHP permite realizar las comparaciones binarias basándose tanto en factores cuantitativos (aspectos tangibles) como cualitativos (aspectos no tangibles), ya que presenta su propia escala de medida: la escala 1 – 9 propuesta por Saaty. El resultado de estas comparaciones es una matriz cuadrada, recíproca y positiva. Una vez formadas las matrices de comparación, el proceso deriva hacia la tercera etapa, la fase de priorización y síntesis.

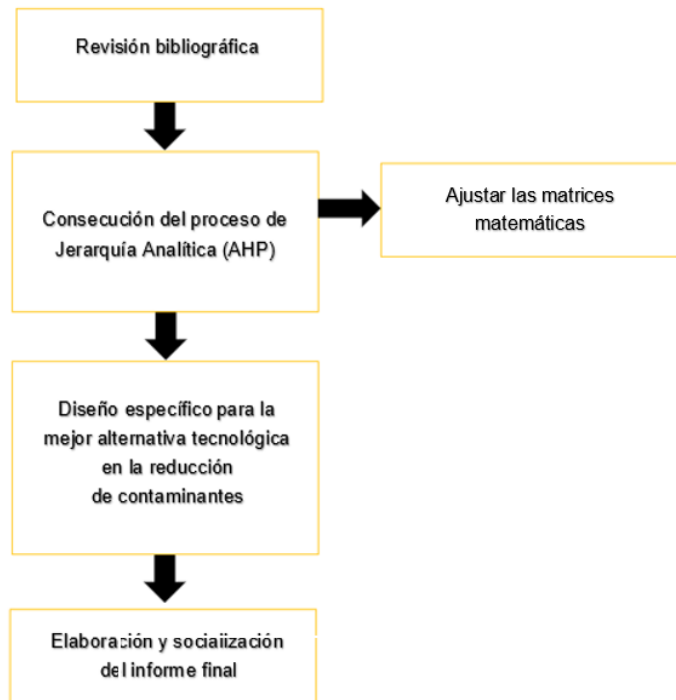
El objetivo de esta etapa es calcular la prioridad de cada elemento, entendida esta prioridad tal y como lo define Saaty: La última etapa de este proceso es el denominado análisis de sensibilidad. Son varios los factores a considerar al elegir cuál de las opciones de control de emisiones representa la mejor tecnología disponible. Desde una perspectiva ambiental, la mejor opción es la que reduce al mínimo los niveles totales de emisión del contaminante en cuestión. Sin embargo, el uso de la opción más eficaz para el control de la contaminación no siempre es viable, en virtud del impacto económico, energético, ambiental o técnico que puede entrañar. Por consiguiente, se utiliza un proceso descendente para determinar cuál tecnología o proceso sería el más adecuado para cada aplicación específica. Este método es relativamente rápido y simple, y puede reproducirse con facilidad para todos los contaminantes y fuentes examinadas (García, et. al., 2006; Huang et. al., 2010)

4 Metodología

La metodología utilizada en la realización de este proyecto se divide en cuatro etapas: Revisión bibliográfica; Consecución del proceso de Jerarquía Analítica (AHP); Diseño específico para la mejor alternativa tecnológica en la reducción de contaminantes; Elaboración y socialización del informe final. En la Figura 1, se presenta el esquema general de la metodología utilizada en el desarrollo de este proyecto.

Figura 1.

Metodología planteada para la realización del proyecto.



4.1 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica se realizó a través de diferentes bases de datos como AMPP, Science Direct, Knovel, Google Scholar, Ministerio de Minas y Energía, Corporaciones Ambientales Regionales, entre otras; los temas más relevantes para la búsqueda de información fueron el uso de calderas pirotubulares con carbón mineral, reglamentación ambiental para fuentes fijas, Tecnologías de mitigación y control de emisiones, así como dimensionamiento y diseño de equipos de ingeniería.

4.2 Consecución del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)

Implementar el modelo utilizando las fórmulas matemáticas para representar la relación entre distintas variables, parámetros y restricciones del análisis. Algunos de los pasos que permitió lograr la consecución de esta etapa fueron: Aplicación de los conocimientos matemáticos en el planteamiento y resolución de matrices y vectores; Realizar comparación e interpretación de datos, también, ajuste de matrices matemáticas respecto a su consistencia y aplicación en alternativas tecnológicas para el control de contaminantes usando parámetros múlti-criterios.

4.3 Diseño de la alternativa tecnológica en la reducción de contaminantes

Generar un diseño geométrico específico mediante el uso de herramientas computacionales de diseño asistido por computadora (CAD; *Computer Aided Design*) validando los resultados mediante su teoría de funcionamiento, dimensionando el equipo dependiendo de las condiciones generales para controlar la contaminación atmosférica.

4.4 Elaboración y socialización del informe final

Por último, en esta etapa se recopiló la información y los resultados del proyecto, con el fin de elaborar el documento final y permitir la socialización mediante sustentación oral.

5 Resultados y análisis

Los resultados del proyecto se dividen en tres partes, la primera corresponde a las alternativas tecnológicas para la mitigación de contaminantes en fuentes fijas, la segunda de la consecución del proceso de Jerarquía Analítica y la tercera del diseño del sistema seleccionado.

5.1 Alternativas tecnológicas para la mitigación de contaminantes en fuentes fijas

La eficiencia de la combustión en calderas oscila entre el 60 % para los modelos más antiguos e ineficientes y el 90 % para los últimos modelos. En función de esta medida se podrá ajustar estrategias y tecnologías para reducción de los contaminantes especificados, donde para formular una lista de opciones de control de emisiones es importante tener claro que las opciones no se limitan a aditamentos o dispositivos accesorios para controlar las emisiones, cualquier técnica que reduzca la emisión es una opción válida, incluidos cambios en los insumos o materias primas, cambios en las condiciones del proceso, o la incorporación de equipo de control de emisiones (Bradley, 2005). A continuación, se ejemplifican estas opciones.

5.1.1 Control de gases

5.1.1.1 **Control de emisiones de CO.** Catalizadores de oxidación: Los módulos de oxidación catalítica y los paquetes integrados son la forma económica de eliminar o reducir las emisiones de monóxido de carbono, además de que tienen el beneficio colateral de también reducir las emisiones de hidrocarburos no quemados. Los catalizadores clásicos se elaboran con un sustrato metálico y cerámico de estructura aplanada con recubrimientos catalíticos específicos para cada aplicación. El uso de formulaciones de alta actividad y resistencia permite la reducción de monóxido de carbono (CO), de hidrocarburos no quemados y de olores a temperaturas menores y con menor volumen de catalizador, lo que significa menores costos de operación y de capital, respectivamente (EPA 1991).

5.1.1.2 Control de compuestos orgánicos volátiles. Hay toda una variedad de controles de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), incluidas técnicas de condensación, oxidación térmica, biofiltración y adsorción en carbón. El control por condensación (refrigeración), que enfría la corriente de escape, dando lugar a que los compuestos volátiles se precipiten. La oxidación térmica es una forma simple y eficaz para la destrucción de COV; sin embargo, al tiempo que permite el control de COV, produce emisiones colaterales derivadas de la combustión (en especial NO_x y CO). Los biofiltros no han alcanzado una aplicación generalizada, y su uso se ha restringido fundamentalmente al control de olores en las operaciones de composteo. La adsorción en carbón es una de las técnicas de control de COV más eficaces. Su aplicación ideal se da con materiales que contienen COV recuperables. Los ejemplos comunes del uso de la adsorción en carbono mediante un sistema de recuperación se encuentran en las terminales de distribución de gasolina y en los establecimientos o procesos de recubrimiento que utilizan un único solvente. (EPA, 1998;).

Biorreactores: Los biorreactores emplean a microorganismos para consumir contaminantes de una corriente de aire contaminado. Casi cualquier sustancia, con la ayuda de microorganismos, se degrada, dado al medio ambiente apropiado. Esto es especialmente cierto para los COVs, sin embargo, ciertos microorganismos también pueden consumir compuestos inorgánicos, tales como el sulfuro de hidrogeno y los óxidos de nitrógeno. Dado que los biorreactores utilizan cultivos vivos, se ven afectados por muchas variables en su medio ambiente (EPA, 2003).

Antorchas: La eficiencia de destrucción de COV depende de una temperatura adecuada de la llama, el tiempo de residencia suficiente en la zona de combustión, y un mezclado turbulento (EPA, 1992). Una antorcha operada apropiadamente puede alcanzar una eficiencia de destrucción del 98% o mayor al controlar corrientes de emisión con contenidos de calor mayores a 11 *megajoules per standard cubic meter* (MJ/ sm³) (EPA 1992).

5.1.1.3 Control de óxido de azufre. La reducción de las emisiones de SO₂ se centra en las fuentes de combustión de combustibles fósiles. Las disminuciones pueden obtenerse mediante el uso de combustibles con menor contenido de azufre y la instalación de limpiadores o lavadores húmedos o secos. El análisis de impacto económico de una opción como el lavado húmedo posiblemente refleje un beneficio económico, en la medida en que los residuos pueden venderse para la manufactura de paneles de yeso para la construcción.

Desulfuración de gases de combustión: Un sistema de desulfuración de gases de combustión (FGD, por sus siglas en inglés) utiliza un reactivo alcalino para absorber el SO₂ en los gases de escape y producir sulfato de sodio y de calcio. Los compuestos sólidos de sulfato obtenidos se retiran hacia otro equipo que los procesa. Las tecnologías FGD se clasifican en húmedas, semisecas y secas, dependiendo del estado del reactivo al salir del recipiente de absorción. Se trata de procesos que pueden ser regenerativos (cuando el producto de la reacción puede tratarse y reutilizarse) o desechables (cuando los residuos se deshidratan y eliminan) (EPA, 2003).

5.1.1.4 Control de óxido de nitrógeno. El primer nivel del control de NO_x, en el caso de las calderas, sería un quemador de baja producción de NO_x. Estos quemadores están diseñados para operar a temperaturas más bajas, con el propósito de reducir al mínimo la formación térmica de NO_x; su efecto estriba en dar lugar, de manera deliberada, a una operación ligeramente ineficiente, por la que se produce un aumento en las emisiones de monóxido de carbono (CO) pero también una disminución en las de NO_x. Otras formas de controlar las emisiones de NO_x son:

Reducción catalítica selectiva (SCR): Un sistema de reducción catalítica selectiva es un dispositivo de tratamiento de gases que aprovecha la capacidad de ciertos compuestos, para reaccionar con las emisiones de NO_x y formar compuestos químicos benignos. Los sistemas SCR han constituido dispositivos muy eficaces para el control de emisiones de NO_x. Sus desventajas estriban en que sus costos de capital tienden a ser elevados y que los escapes deben cumplir con ciertos valores de temperatura y presión para el adecuado funcionamiento de los dispositivos. Los SCR puede alcanzar reducciones de NO_x de hasta 85% cuando se aplica en forma adecuada (Bradley, 2005).

Reducción selectiva no catalítica (SNCR): La SNCR es una técnica de tratamiento poscombustión en la que se inyecta amoníaco a la corriente de gases de combustión, el cual reacciona con los compuestos de NO_x, formando nitrógeno y agua. Si bien la aplicación de la SNCR en calderas no se ha generalizado tanto debido al problema de la compatibilidad de la temperatura de la corriente de escape, lo cierto es que, bien realizada, puede dar cuenta de reducciones de NO_x adicionales (25-40%) a las de cualquiera de los controles de combustión utilizado. Los sistemas SNCR pueden realizar reducciones de 60% en las emisiones de NO_x, pero sólo a temperaturas superiores a 925°C, a temperaturas menores, la reacción se produce en forma lenta, lo que da lugar a que el amoníaco no utilizado se emita por la chimenea (EPA, 2002; ICAC, 2000)

5.1.2 Control de partículas.

5.1.2.1 **Precipitadores electrostáticos.** Los precipitadores electrostáticos (PE) son una forma común de reducir las emisiones de Partículas sólidas producidas por calderas, hornos y motores. El sistema consiste en placas metálicas con carga eléctrica que atraen a las partículas cargadas, limpiando los gases de escape que se liberan por la chimenea. La eficiencia de recolección de los PE varía, dependiendo de su tamaño y calidad, pero en algunos casos se han registrado niveles de reducción superiores a 99% (EPA 1998).

5.1.2.2 **Filtros de tela.** Un sistema de filtros de tela es otra de las formas de control poscombustión de partículas sólidas conformado por varias capas de filtros, junto con un sistema de limpieza, su eficacia depende del tamaño, la consistencia y la resistencia de las partículas, así como de la cantidad de tela utilizada y la frecuencia con que se limpien los filtros. Una caldera con temperaturas más elevadas requerirá de fibras o materiales especiales para la construcción de los filtros. En muchos casos, estos sistemas han registrado niveles de eficiencia de 99% (EPA 1998).

5.1.2.3 **Cámaras de sedimentación.** Se puede emplear la fuerza gravitacional para la remoción de partículas en cámaras de sedimentación cuando la velocidad sea mayor a 13 cm/s. Se aplica para partículas mayores de 50 μm de diámetro, o para partículas de 10 μm si el material es razonablemente denso. Partículas más pequeñas requieren excesivas distancias de flujo lo que conllevaría al aumento del volumen de las cámaras. Las cámaras de sedimentación forman parte de los llamados equipos de precalentamiento ya que, de forma general, suelen ser empleados para reducir la carga inicial de partículas de una corriente gaseosa eliminando de la misma las partículas de mayor tamaño, así como las abrasivas (EPA, 1998).

5.1.2.0 **Ciclones.** Un ciclón consiste en inyectar aire a la corriente de escape para provocar que los gases de combustión se desplacen en espiral al interior de la chimenea. Ello da lugar a que las partículas de mayor tamaño se separen del gas y se adhieran a las paredes del conducto, en forma muy similar a lo que ocurre en una centrifugadora que separa el material más denso del fluido de menor densidad. Desafortunadamente, incluso los sistemas de ciclones más eficientes sólo tienen capacidad para eliminar las partículas de mayor tamaño y, por tanto, su uso se restringe a un control de emisiones de servicio previo al de sistemas de control de mayor eficiencia, pero también existen aplicaciones en las que muchos ciclones pequeños funcionan en paralelo, el sistema completo se denomina ciclón de tubos múltiples o multiciclón (ICAC, 2000.)

5.1.2.1 **Lavadores.** Los lavadores húmedos de gases utilizan un rociador o atomizador de agua de diversos diseños y tamaños para lograr el control de emisiones de Partículas sólidas. Las partículas de agua se combinan con las partículas suspendidas, lo que da lugar a la formación de gotas de desecho que se condensan y caen, para su recolección, al fondo del lavador. Los lavadores húmedos pueden lograr reducciones en las emisiones de partículas sólidas de hasta 95%. Desafortunadamente, estos sistemas requieren de una fuente de suministro continuo de agua y crean residuos líquidos que deben manejarse con un sistema de tratamiento de aguas residuales (EPA, 1998)

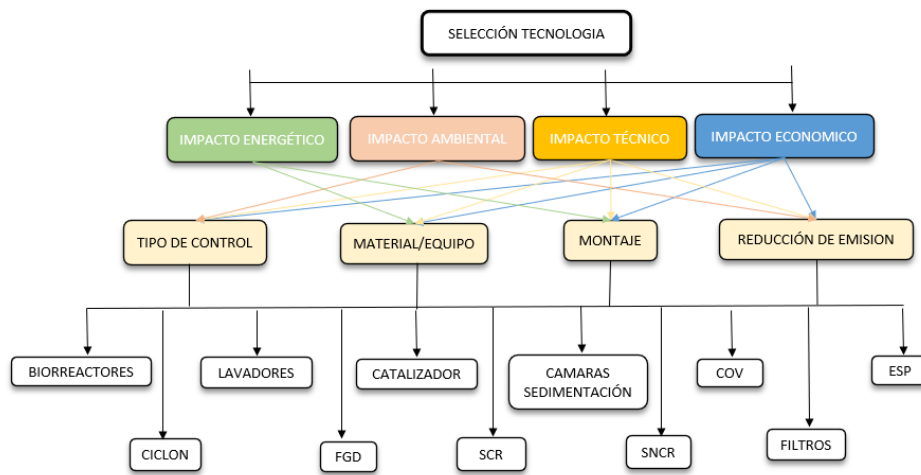
6 Selección de la alternativa tecnológica mediante el Proceso de Jerarquía Analítica

La estructura de jerarquía de decisión se presenta en la Figura 2, en relación con un análisis de prioridades aplicado a tecnologías de mitigación de contaminantes en fuentes fijas, el objetivo del problema se coloca en la parte superior de la jerarquía de decisiones como Meta, y se utilizan

cuatro factores (como criterios) en el proceso de toma de decisiones. En el caso discreto, estas comparaciones conducen a matrices de dominancia de los cuales se derivan escalas de razón en forma de vectores propios principales. Estas matrices, o núcleos, son positivas y recíprocas, $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Debe quedar claro desde el principio cuál es el enfoque de la jerarquía y cómo los elementos del segundo nivel sirven para cumplir ese enfoque o son su consecuencia, y así sucesivamente hacia abajo en la jerarquía para cada elemento padre y sus descendientes.

Figura 2.

Diagrama de flujo jerárquico para el estudio en el marco selección de la mejor tecnología para el control de emisiones



Para asegurar que las calificaciones de preferencia originales son consistentes o no AHP incorpora en el análisis un índice de consistencia (CI) y se calcula utilizando el valor propio máximo (λ_{max}) y el número de atributos (n).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - 1}{n - 1} \tag{Ec.1}$$

Las preferencias son aceptables si el índice de consistencia (CR) es inferior a 0,1, que viene dado por la Ecuación CR, donde RI es el índice aleatorio informado por Saaty.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Ec.2}$$

La aceptabilidad de los valores supuestos para cada comparación por pares se comprueba finalmente frente al CR, para valores mayores, no es lo suficientemente consistente y se necesita que el decisor revise las comparaciones.

En este caso se cuenta con un objetivo. A su vez, cada objetivo consta con 4 criterios: energético, ambiental, técnico y económico, que definen los aspectos principales en la evaluación de las tecnologías. Además, posee también subcriterios: Tipo de control, material/equipo, mantenimiento y reducción de emisiones. En el apéndice A se presenta el desarrollo completo del método AHP para la selección de la mejor tecnología de reducción para el control de emisiones atmosféricas. La Tabla 2 y la Tabla 3 resumen los resultados del proceso AHP para la evaluación de la mejor tecnología de mitigación. El análisis cuantitativo de todo el proceso jerárquico se describe en el apéndice A.

El vector de ponderación es (0,4590; 0,1311; 0,0808; 0,3291) valores que al sumarse dan como resultado la unidad. Así, el tipo de control tiene una ponderación o nivel de importancia del 45,9%, el material y equipo el 13.1% y así sucesivamente.

A continuación, se procede a la organización de la información con el fin de obtener la ponderación final correspondiente a cada una de las alternativas. La Tabla 3 indica el resumen de la información. Cada uno de los criterios posee su propia ponderación o importancia para el objetivo y cada una de las alternativas satisface de diferente manera el logro de los criterios.

Tabla 2

Resumen de la información AHP

Subcriterios	Tecnologías vectores de prioridad										
	Biorreactores	Filtros	COV	ESP	Cámaras	Lavadores	Ciclón	Catalizador	FGD	SCR	SNCR
Tipo de control (0.4590)	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180
Material/Equipo (0.1311)	0,0278	0,0633	0,1216	0,0278	0,1247	0,2991	0,2735	0,1101	0,1145	0,1047	0,1289
Mantenimiento (0.0808)	0,1412	0,0306	0,1145	0,0414	0,3292	0,1408	0,1184	0,0388	0,244	0,2398	0,2482
Reducción emisión (0.3291)	0,0315	0,0949	0,0499	0,1252	0,1468	0,307	0,1768	0,0656	0,0946	0,0381	0,0381

Tabla 3

Resumen de la información AHP

Subcriterios	Producto										
	Biorreactores	Filtros	COV	ESP	Cámaras	Lavadores	Ciclón	Catalizador	FGD	SCR	SNCR
Tipo de control (0.4590)	0,0083	0,0644	0,0103	0,0468	0,0737	0,0114	0,0955	0,0157	0,0514	0,0298	0,0518
Material/Equipo (0.1311)	0,0036	0,0083	0,0159	0,0036	0,0163	0,0392	0,0358	0,0144	0,0150	0,0137	0,0169
Mantenimiento (0.0808)	0,0114	0,0025	0,0092	0,0033	0,0266	0,0114	0,0096	0,0031	0,0197	0,0194	0,0200
Reducción de emisión (0.3291)	0,0104	0,0312	0,0164	0,0412	0,0483	0,1010	0,0582	0,0216	0,0311	0,0125	0,0125
Suma	0,0337	0,1064	0,0519	0,0950	0,1649	0,1630	0,1991	0,0548	0,1173	0,0754	0,1013

En las evaluaciones realizadas se observa que si se elige el tipo de control la tecnología de ciclones debe ser elegida, ya que tiene el nivel más alto de preferencia, pero si se elige el material y equipo debe ser elegida la tecnología de lavadores, si la decisión se basa en el mantenimiento solamente debería ser elegio las cámaras de sedimentación, en cambio, si se atiende a la reducción de la emisión solamente, la tecnología lavadores debe ser elegida y así sucesivamente. Sin embargo, AHP permite tomar decisiones con base en diferentes criterios, en este caso se evaluó simultáneamente 4 subcriterios y se observa que la tecnología de ciclones obtiene el nivel más alto de preferencia con el 19% del total, la segunda posición de preferencia es ocupada por las cámaras de sedimentación, la cual obtiene el 16% de las preferencias y finalmente la alternativa lavadores también con el 16% de las mismas; por lo que los ciclones deben ser elegidos bajo este método y criterios de evaluación.

7 Diseño tecnológico para la reducción de contaminantes en fuente fija

La caída de presión es un parámetro importante para los ciclones, ya que tiene relación con los costos de operación y la eficiencia de control. Para un ciclón determinado, se pueden obtener mayores eficiencias de control con velocidades de entrada más altas, pero esto también incrementa la caída de presión. En general, 18,3 m/s, es considerada la mejor velocidad de operación. Los rangos comunes de caídas de presión para los ciclones son de 0,5 a 1 kPa, para unidades de baja eficiencia (alta capacidad); de 1 a 1,5 kPa, para unidades de mediana eficiencia (convencionales); y de 2 a 2,5 kPa para unidades de alta eficiencia.

Tabla 4

Intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones

Familia de ciclones	Eficiencia de remoción (%)		
	PST	PM10	PM2.5
Convencionales	70-90	30-90	00-40
Alta eficiencia	80-99	60-95	00-40
Alta capacidad	80-99	10-40	00-40

Nota. (Lodoño, 2006)

7.1 Selección del tipo de ciclón

La proporción de partículas según el tamaño de abertura del tamiz utilizado según el informe técnico de caracterización mostrado en la Tabla 4 para la selección del tipo de ciclón con el 80% de las partículas por encima de las 361 μm se requiere un ciclón de alta capacidad, por lo tanto, se selecciona un ciclón de la familia de ciclones de alta capacidad (Tabla 4). Se selecciona un ciclón tipo Swift.

Tabla 5

Resultados granulometría informe técnico

Muestra	Tamaño granulométrico (# malla)	D80
Muestra mineral particulado	Malla # 47	361 micras

Nota. Adaptado de informe técnico de ensayos del Laboratorio de Servicios Químicos, Minero Metalúrgicos y Ambientales

7.2 Cálculos de las medidas necesarias

Se consideran variables que permiten diseñar un sistema eficaz por tal motivo se detallan los parámetros de suma importancia los cuales son: *Caudal del aire*, diámetro del ciclón, velocidad de

entrada y concentración de partículas (Bahamondes, (2008); Cerrada, 2017; Freire & Castillo, 2015; Londoño, 2006)

Los parámetros de diseño quedan resumidos de la siguiente manera en la Tabla 6.

Tabla 6

Parámetros de diseño para los ciclones entrada tangencial

Parámetro	Valor
Diámetro del ciclón	< 1,0 m
Caída de presión	< 2.488,16 Pa
Relación de velocidades (V_i/V_s)	< 1.35
Velocidad de entrada	15,2 – 27,4 m/s

Nota. Adaptado de Bahamondes (2008)

7.2.1 Caracterización del carbón de la fuente fija

El carbón se caracteriza por su alto contenido de carbón fijo, baja humedad (2.50%) y alto contenido de cenizas (35.69%). Asimismo, el carbón posee una densidad a granel cercana a los 779 kg/m. En la Tabla 7 se resume el informe técnico de ensayos del Laboratorio de Servicios Químicos, Minero Metalúrgicos y Ambientales (Apéndice B).

Tabla 7

Caracterización carbono

Muestra	Muestra Carbón MR
Humedad	2,50
Cenizas	35,69
Volátiles	61,81

Nota. Adaptado de informe técnico de ensayos del Laboratorio de Servicios Químicos, Minero Metalúrgicos y Ambientales

7.2.2 Condiciones de operación de la fuente fija

- Sea un ciclón tipo swift de alta capacidad
- Q aire 9000 m³/h (2,5 m³/s) diámetro de chimenea 380mm
- Velocidad de entrada 22 m/s (sugerida)
- Densidad del carbón mineral 779 kg/ m³
- Temperatura del gas 1022° F (550 ° C)
- Presión de Trabajo 101 Kpa (1 atm)
- Densidad del aire 0,411 Kg/m³ propiedades del aire a 550 ° C y 1 atm)
- Viscosidad del aire 3,57*10⁻⁵ Kg/m*s.

El caudal en la salida del ducto se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = \text{área} \times \text{velocidad} = \pi r^2 \times v = Q \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Ec.3

$$Q = \pi 0,125^2 \times 22 = 2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El diámetro de la chimenea es de 380 mm Y para cálculos de las dimensiones de los extractores ciclón de entrada tangencial se toma como velocidad promedio 22 m/s

$$r = 0,190 \text{ m}$$

$$V \text{ entrada} = 22 \text{ m/s}$$

Para calcular el diámetro del ciclón es importante seleccionar una velocidad de entrada que está en el intervalo de 15,2 a 27,4 m/s. Para este caso seleccionamos una velocidad de entrada de 22 m/s de acuerdo con los datos técnicos. De igual manera se determinó el valor del caudal es de 2,05 m³/s, con estos datos se determinó el diámetro del ciclón mediante la siguiente ecuación:

$$A_{De} = \frac{Q}{V_e} = \frac{2,5}{22} = 0,113 \text{ m}^2 \quad \text{Ec.4}$$

Estableciendo que:

A_{De} = Área de entrada del ducto (m²)

V_e = Velocidad de entrada (m/s)

De acuerdo con las características de diseño establecidas en el apéndice D para un ciclón de alta capacidad se tomó los datos de referencia para la altura de entrada y ancho de entrada arrojando la siguiente ecuación:

$$\text{Altura de entrada del ciclón (a):} \quad a = 0,8 Dc \quad \text{Ec.5}$$

$$\text{Ancho de entrada del ciclón (b):} \quad b = 0,35 Dc \quad \text{Ec.6}$$

$$a * b = 0.8 Dc * 0.35 Dc = \text{Área de entrada del ducto} \quad \text{Ec.7}$$

$$Dc = \sqrt{\frac{A_{de}}{0,8*0,35}} = \sqrt{\frac{0,113}{0,8*0,35}} = 0,64 \text{ m} \quad \text{Ec.8}$$

Los cálculos restantes se encuentran incluidas en el apéndice D:

7.2.3 Medidas del ciclón

Tabla 8

Medidas del ciclón

Abreviatura	Características	Medida (m)
Dc	Diámetro del ciclón	0,64
a	Altura de entrada	0,512
b	Ancho de entrada	0,224
S	Altura de salida	0,554
Ds	Diámetro de salida	0,48

la eficiencia del ciclón. (Esta teoría predice las eficiencias de colección de material particulado, basándose en las propiedades físicas del material particulado y el gas de arrastre, y en las relaciones entre proporciones del ciclón.)

Para hallar la relación de velocidades se requiere primero estimar la velocidad equivalente y luego la velocidad de saltación. Recordando los parámetros de diseño (Tabla 6), analizamos si los resultados son acordes a lo recomendado para un separador ciclónico. Se realizan las operaciones correspondientes (Apéndice E) para poder realizar las comparaciones y dan como resultado la Tabla 9.

Tabla 9

Parámetros de diseño para los ciclones entrada tangencial

Parámetro	Valor
Velocidad equivalente	$W = 1,29 \frac{m}{s}$
Velocidad de saltación	$V_s = 36,63 \text{ m/s}$
Relación de velocidades (V_i/V_s)	$\frac{V_i}{V_s} = \frac{22}{36,63} = 0,60$
Volumen del ciclón evaluado sobre la salida	$V_{sc} = 0,040 \text{ m}^3$
Longitud natural del ciclón	$L = 1,81 \text{ m}$
Factor de dimensiones lineales	$Kl = 0,30 \text{ m}$
Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural	$VR = 0,075 \text{ m}^3$
Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón	$Kc = 0,30 \text{ m}^3$
Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón	$Ka = 0,8$
Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón	$Kb = 0,35$
Factor de configuración	$G = 30,48$

Exponente de vórtice	$n = 0,49$
Tiempo de relajación	$Ti = 0,157 s$
Cálculo del número de cabezas:	$NH = 7,96$
Caída de presión	$\Delta P = 791,7175 Pa$
Eficiencia del ciclón	$\eta=82,7 \%$

El diámetro calculado cumple con la condición de diseño de los ciclones tangenciales, la cual establece que el diámetro debe ser menor a 1 metro, si por el contrario lo supera se considera instalar ciclones en paralelo. También como $V_i/V_s < 1,35$ no hay re-suspensión del material particulado y cumple con los parámetros de establecidos. Así mismo para la longitud natural del ciclón se define la condición: $L < H - S$, que para este caso es 1,81 m; por lo tanto, esta condición también se cumple ($1,68 < 1,81$).

El valor de la caída de presión es menor a 2.488,16 pascal lo cual cumple con los parámetros de los ciclones con entrada tangencial. La eficiencia del ciclón es de $\eta=82,7 \%$ y las dimensiones hacen que el ciclón sea funcional para el estudio.

7.3 Diseño del ciclón mediante herramientas CAD

Con los valores de Tabla 8, se procedió a realizar el diseño en el software Solidworks®, dando como resultado el modelo mostrado en Figura 4 y el plano del diseño se pueden encontrar en el apéndice G.

Figura 4.

Modelo tridimensional del ciclón diseñado con los parámetros teóricos calculados



Nota. Modelo geométrico del ciclón en Solidworks®

Para este modelo el material adecuado son las planchas de acero inoxidable AISI-SAE 304, este es un material de gran calidad que es utilizado en varios sectores de la industria. Es un acero inoxidable versátil que se usa ampliamente para fabricar equipos y piezas que requieren un buen rendimiento general (resistencia a la corrosión y ataques químicos del ambiente) (Apéndice C).

8 Conclusiones

Diversas alternativas tecnológicas podrían mitigar la contaminación ambiental de fuentes fijas de calderas operadas mediante carbón mineral, en el control de compuestos gaseosos (NO_x, SO_x, CO y CO₂) mediante equipos de alta eficiencia como los de Reducción Catalítica Selectiva con hasta 85% de eficiencia para mitigación de óxidos de Nitrógeno o las antorchas con 98% de eficiencia en el control de Compuestos Orgánicos Volátiles. Así mismo el control de material particulado mediante lavadores con eficiencias máximas cercanas al 95% o precipitadores electrostáticos, filtros de tela y ciclones con eficiencia reportadas hasta de 99%.

Mediante la implementación del Proceso Jerárquico Analítico (AHP) se llevó a cabo la selección de la tecnología más adecuada para la mitigación de contaminantes ambientales en fuentes fijas de calderas operadas mediante carbón mineral, donde bajo los subcriterios de impacto energético, ambiental, técnico y económico, los ciclones obtiene el nivel más alto de preferencia con el 19% de priorización, seguido de las cámaras de sedimentación y lavadores con 16% de priorización para cada uno, resultados que indican que implementar tecnologías ciclónicas representa la mejor alternativa para atender la responsabilidad ambiental y operacional de dichas fuentes fijas.

A partir de parámetros operacionales (caudal, caída de presión, temperatura) de la chimenea de una caldera pirotubular de 80 BHP de capacidad y la caracterización fisicoquímica (Tamaño de partícula, humedad, % ceniza, volátiles) del combustible fósil usado como alimentación (carbón mineral) se plantea el diseño de un ciclón con eficiencia estimada de 82,7%, bajo unas dimensiones aproximadas de 2,37 m de altura total y 0,64 m de diámetro mayor.

9 Referencias bibliográficas

- Alcaldía de Medellín: Guía de sistemas de vapor eficientes, 2020
- Bahamondes, J. (2008). DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SEPARADOR CICLONICO PARA LA INDUSTRIA NAVAL. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Barrera Zapata R, Pérez Bayer J.F, Salazar Jiménez C: Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas, rev.ion. 2014, pp 43-54.
- Bradley, M.J. (2005). Mejor tecnología disponible para el control de la contaminación atmosférica en América del Norte: directrices para el análisis y estudios de caso, *Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) de América del Norte*
- Cepeda Rincón O.L: Riesgos ocultos en el uso de calderas a carbón en empresas en Colombia en el siglo XXI, Artículo de investigación, 2019
- Cerrada Martínez P. (2017). Diseño y análisis de una planta de separación de aire, Tesis de grado. Escuela técnica superior de ingenieros industriales universidad politécnica de Madrid. pp 45-48
- Cheremisinoff, Nicholas P. (2002). Handbook of Air Pollution and Control - 2.3.4 Pollution Prevention and Control. (pp. 17-19). Elsevier.
- Corona M, Camporredondo J, García A, Camacho L, Servin R: (2014) Características de carbón de la región carbonífera de Coahuila (México), para la determinación de dispersión, formas geométricas, concentración y tipos de azufre presentes, *Revista Colombiana de Materiales* N.5, pp. 84-90
- EPA, (2003). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Air Pollution Control Technology Fact Sheet. Selective Non -Catalytic Reduction (SNCR), EPA 452/F-03-031.

Freire, G., & Castillo. A. (2015). DISEÑO Y CONTRUCCION DE UN SEPARADOR CICLONICO DE ENTRADA TANGENCIAL Y DESCARGA AXIAL PARA MATARIAL PARTICULADO DE TAMAÑO MENOS A 40 μ m. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS.

García, J. L., Noriega, S. A., Díaz, J. J., & de la Riva, J. (2006). Aplicación del proceso de jerarquía analítica en la selección de tecnología agrícola. *Agronomía Costarricense*, 30(1),107-114, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43630110>

Huang Y, Yang Y, Lian X, Hao Q. (2010). Method research on energy evaluation of thermal power based on AHP and entropy of the TOPSIS. *In: 2nd conference on environmental science and Information Application Technology*, Wuhan, China, 230-23.

ICAC, 2000. Institute of Clean Air Companies, Inc. “White Paper: Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) for Controlling NOX Emissions”. Washington, D.C. 2000.

Levent Yagmur, 2016. Multi-criteria evaluation and priority analysis for localization equipment in a thermal power plant using the AHP (analytic hierarchy process), *Energy*, Volume 94, pp 476-482.

Londoño, C. A. (2006). Diseño Óptimo de ciclones. *Revista ingenierías Universidad de Medellín*

Muñoz AM, Paz JJ, Quiroz CM: Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud en adultos que laboran a diferentes niveles de exposición. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*. 2007; 25 (2): 85-94

Niño N, Riaño J, Forero J, Ardila R, Manrique J. *La Cadena del Carbón.*, Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME, Ministerio de minas y energía, Bogotá, 2012.

- Saaty, RW. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used, Salas, J., Leyva, M., Calenzani, A. (2014). Modelo del proceso jerárquico analítico para optimizar la localización de una planta industrial, *Revista de la facultad de ingeniería industrial*, 17(2), 112-119. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81640856014>
- Tamayo Marulanda T, López Gómez M.E, Serna Giraldo C: Estudio de la calidad del carbón de la empresa de Sabaleta S.A. con el fin de satisfacer la demanda industrial, *Revista Colombiana De Materiales*, 2012
- Toro Cataño D.A, Ramírez García J, Sepúlveda Mejía D.L: Riesgos ambientales y de seguridad en calderas a carbón de las pequeñas y medianas empresas «PYME», ubicadas en el municipio de Itagüí, Antioquia, Artículo de investigación, 2017, pp 437-445
- United States Environmental Protection Agency, Air Emissions Factors and Quantification, AP 42, Chapter 1: External Combustion Sources, Table 1.1-7. Cumulative particle size distribution and size-specific emission factors for wet bottom boilers burning pulverized bituminous coal, 1998
- Uribazó Díaz P. C, Tito F.D, Ochoa Estevez J.R. (2006). INFLUENCIA DE LAS CALDERAS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE, Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba, pp 1-13
- Zhengmin Liu, Di Wang, Xinya Wang, Xiaolan Zhao, Peide Liu, A generalized TODIM-ELECTRE II based integrated decision-making framework for technology selection of energy conservation and emission reduction with unknown weight information, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 101, 2021.

10 Apéndices

Apéndice A. Proceso jerárquico analítico (AHP)

Escala para mediciones (AHP)

Los niveles de importancia o ponderación de los criterios se estiman por medio de comparaciones apareadas entre estos. Esta comparación se lleva a cabo usando la escala de Saaty, el significado de cada uno de estos valores se encuentra en el cuadro A1.

Tabla A1

Valores de escala Saaty para comparaciones

Escala numérica	Escala Verbal	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre otro
5	Importancia fuerte	Un elemento es fuertemente favorecido
7	Importancia muy fuerte	Un elemento es muy dominante
9	Extrema importancia	Un elemento es favoreció por al menos un orden de magnitud de diferencia

2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Se usan como compromiso entre dos juicios
Incremento 0,1	Valores intermedios en incrementos	Utilización para graduación más fina de juicios

Nota. Fuente: Saaty, (1987).

Calculo y determinación de los vectores para los criterios

Volviendo a tomar como referencia la tabla A2. La cual indica los resultados numéricos de la comparación de pares frente a cada alternativa dando como resultado una matriz 4x4.

Tabla A2

Matriz de comparación de los criterios respecto al objetivo general

Criterios	Energético	Ambiental	Técnico	Económico
Energético	1	1/5	1/2	1/7
Ambiental	5	1	4	1/2
Técnico	2	1/4	1	1/5
Económico	7	2	5	1
$\sum r_i$	15	3,45	10,5	1,84

Nota: Fuente: Elaboración propia.

Se procede hacer la sumatoria de los resultados de pares para generar un porcentaje de importancia de acuerdo con cada pareja analizada dando como resultado tabla A2a. Se hace la ponderación de resultados para cada criterio dando como resultado un vector de prioridad para cada alternativa.

Tabla A3

Matriz de comparación de los criterios respecto al objetivo general,

CR=0.01479

Criterios	Energético	Ambiental	Técnico	Económico	Vector de prioridad
Energético	0,0667	0,0580	0,0476	0,0775	0,0624
Ambiental	0,3333	0,2899	0,3810	0,2713	0,3189
Técnico	0,1333	0,0725	0,0952	0,1085	0,1024
Económico	0,4667	0,5797	0,4762	0,5426	0,5163
$\sum r_i$	1	1	1	1	

Nota: Fuente: Elaboración propia

Para asegurar que las calificaciones de preferencia originales son consistentes o no, AHP incorpora en el análisis un índice de consistencia (CI) y se calcula utilizando el valor propio máximo (λ_{max}) y el número de atributos (n).

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

Las preferencias son aceptables si el índice de consistencia (CR) es inferior a 0,1, que viene dado por la Ecuación CR, donde RI es el índice aleatorio informado por Saaty.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Ec.2}$$

La aceptabilidad de los valores supuestos para cada comparación por pares se comprueba finalmente frente al CR, para valores mayores a 0.1, no es lo suficientemente consistente y se necesita que el decisor revise las comparaciones.

Tabla A4

*Vector de prioridad criterios,**CR=0.01479*

Criterios	λ_w	λ_i	n=	4
Energético	0,2512	4,0223	CI	0,01464
Ambiental	1,2988	4,0732	RI	0,99
Técnico	0,4103	4,0068	CR	0,01479
Económico	2,1031	4,0734		
	λ_{max}	4,0439		

Nota: Fuente: elaboración propia, n= número de atributos, CI= índice de consistencia, RI = índice aleatorio informado por Saaty.

Tabla A5

Vector de prioridad subcriterios, CR=0,09621

Subcriterios	Vector de prioridad
Tipo de control	0,4590
Material/Equipo	0,1311
Mantenimiento	0,0808
Reducción de emisión	0,3291

Nota: Fuente: elaboración propia

Tabla A6

Vector de prioridad tecnologías frente al subcriterio tipo de control, CR= 0,06413

Tipo de control	Vector de prioridad
-----------------	---------------------

Biorreactores	0,0180
Filtros	0,1404
COV	0,0225
ESP	0,1019
cámaras de sedimentación	0,1605
Lavadores	0,0248
Ciclón	0,2080
Catalizador	0,0342
FGD	0,1121
SCR	0,0649
SNCR	0,1128

Nota: Fuente: elaboración propia

Al tener todas las matrices resueltas con sus respectivos vectores de prioridad se decide a realizar la selección de la mejor alternativa, para esto se multiplica cada vector de prioridad de las tecnologías con el respectivo vector del subcriterio dando como resultado un porcentaje de prioridad que al ser sumando da como resultado la elección más consecuente y que cumple con todos los parámetros analizados mostrado en la tabla A8

Tabla A7

Resumen de la información

Subcriterios	Tecnologías vectores de prioridad										
	Biorreactores	Filtros	COV	ESP	Cámaras	Lavadores	Ciclón	Catalizador	FGD	SCR	SNCR
Tipo de control											
(0.4590)	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180	0,0180
Material/Equipo											
(0.1311)	0,0278	0,0633	0,1216	0,0278	0,1247	0,2991	0,2735	0,1101	0,1145	0,1047	0,1289
Mantenimiento											
(0.0808)	0,1412	0,0306	0,1145	0,0414	0,3292	0,1408	0,1184	0,0388	0,244	0,2398	0,2482
Reducción de emisión											
(0.3291)	0,0315	0,0949	0,0499	0,1252	0,1468	0,307	0,1768	0,0656	0,0946	0,0381	0,0381

Nota. Fuente. Elaboración propia

Tabla A8

Resumen de la información



Subcriterios	Producto										
	Biorreactores	Filtros	COV	ESP	Cámaras	Lavadores	Ciclón	Catalizador	FGD	SCR	SNCR
Tipo de control											
(0.4590)	0,0083	0,0644	0,0103	0,0468	0,0737	0,0114	0,0955	0,0157	0,0514	0,0298	0,0518
Material/Equipo											
(0.1311)	0,0036	0,0083	0,0159	0,0036	0,0163	0,0392	0,0358	0,0144	0,0150	0,0137	0,0169

Mantenimiento											
(0.0808)	0,0114	0,0025	0,0092	0,0033	0,0266	0,0114	0,0096	0,0031	0,0197	0,0194	0,0200
Reducción de											
emisión (0.3291)	0,0104	0,0312	0,0164	0,0412	0,0483	0,1010	0,0582	0,0216	0,0311	0,0125	0,0125
Suma	0,0337	0,1064	0,0519	0,0950	0,1649	0,1630	0,1991	0,0548	0,1173	0,0754	0,1013

Nota. Fuente. Elaboración propia

En las evaluaciones realizadas se observa que si se elige el tipo de control la tecnología de ciclones debe ser elegida, ya que tiene el nivel más alto de preferencia, pero si se elige el material y equipo debe ser elegida la tecnología de lavadores, si la decisión se basa en el mantenimiento solamente debería ser elegio las cámaras de sedimentación, en cambio, si se atiende a la reducción de la emisión solamente, la tecnología lavadores debe ser elegida y así sucesivamente. Sin embargo, AHP permite tomar decisiones con base en diferentes criterios, en este caso se evaluó simultáneamente 4 subcriterios y se observa que la tecnología de ciclones obtiene el nivel más alto de preferencia con el 19% del total, la segunda posición de preferencia es ocupada por las cámaras de sedimentación, la cual obtiene el 16% de las preferencias y finalmente la alternativa lavadores también con el 16% de las mismas; por lo que los ciclones deben ser elegidos bajo este método y criterios de evaluación.

Apéndice B. Informes técnicos de ensayo, laboratorio de servicios químicos

	INFORMES TÉCNICOS DE ENSAYO	CÓDIGO	FT-GL-01			
	LABORATORIO DE SERVICIOS QUÍMICOS MINERO METALÚRGICOS Y AMBIENTALES	VERSION	4			
		FECHA	2018	06	18	
		PAGINA	1	DE	3	

INF-G-22-341	INFORME TÉCNICO DE ENSAYO	FECHA	2022	10	21
			AA	MM	DD





"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 0991 del 09 de septiembre de 2019, en los parámetros metales totales: Cadmio, Cobre, Hierro, Níquel, Plata, Zinc, Cromo, Bario y Manganeso en aguas. Cianuro Total en aguas, suelos y Residuos sólidos. Determinación de Toxicidad por metales en Residuos sólidos Peligrosos TCLP: Cadmio, Níquel, Plata, Cromo y Bario."

INFORMACIÓN DEL CLIENTE		
EMPRESA: -	CONTACTO: Jeferson Ruiz	FACTURA: -
NIT/CC:	CIUDAD/MUNICIPIO: Piedecuesta	Email: ingjefersonruiz@gmail.com jefersonruiz@gmail.com
DIRECCIÓN: -	TELÉFONO: 3214091373	SOLICITUD No: 341

INFORMACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S)			
TIPO DE MUESTRA	APTA O NO PARA ANÁLISIS	IDENTIFICACIÓN EXTERNA	IDENTIFICACIÓN INTERNA
LIQUIDA	APTA	Muestra Agua MR	G-517-A-22
SÓLIDA	APTA	Muestra Carbón MR	G-303-O-22
SÓLIDA	APTA	Muestra mineral particulado MR	G-304-O-22
FECHA DE RECEPCIÓN: 19/09/2022	RESPONSABLE DE LA RECEPCIÓN: Viviana Rojas / Coordinadora de Calidad	RESPONSABLE DEL MUESTREO: Jeferson Ruiz	
FECHA DEL MUESTREO: -	LUGAR Y PUNTO DEL MUESTREO:	FECHA REALIZACIÓN ENSAYO(S): 04/10/2022	

METODOLOGÍA Y MÉTODO UTILIZADO
<p>Metodología: Determinación de metales: La muestra fue sometida a una digestión con ácido nítrico concentrado SM 3030 F y posteriormente analizada por espectrofotometría de Absorción Atómica con llama (aire-acetileno-óxido nítrico), empleando patrones certificados marca CertiPUR® de Merck. Determinación de cloruros: El método se utiliza para determinar iones cloruro. Para analizar los cloruros en la muestra, se toma un peso exacto de la muestra, posteriormente se adiciona agua destilada- desionizada (Tipo I) en una relación 1:2 libre de cloruros, se coloca en agitación durante 4 horas y finalmente se filtra para obtener la solución lixiviante. Utilizando un equipo de titulación por potenciometría y utilizando como agente titulante nitrato de plata (AgNO₃), se determina la concentración de cloruros presente en la solución, la cual se extrapola y convierte a unidades de masa según, pero inicial de la muestra. Humedad: Determinación de cantidad de agua presente en el sólido (secado a temperatura 105°C según NTC 1495:2013). Cenizas: Calcínación total de la muestra a una temperatura aprox. de 550°C. Granulometría: gravimétrico tamizado mecánico (mallas certificadas ASTM)</p> <p>Método: Digestión: Estándar Métodos SM 3030 E Lecturas: Estándar Métodos SM 3111 B [Mg, Fe] y Estándar Métodos SM 3111 D [Ca] Cloruros: Potenciométrico - SM 4500 Cl⁻ Sulfuros: Potenciométrico - SM 4500 S²⁻ Sulfatos: Turbidimétrico SM 4500 SO₄²⁻ Humedad: Gravimetría, secado 105°C NTC 1495:2013 Cenizas: Gravimetría, calcínación 550°C</p>

Laboratorio de Servicios Químicos, Minero-Metalúrgicos y Ambientales.
UIS Sede Guatiguará. Transv. Guatiguará Calle 8N No. 3W-60, Barrio El Refugio
Tel: (57)634 4000 Ext: 3504 Email: gimba.lab@uis.edu.co

	INFORMES TÉCNICOS DE ENSAYO	CÓDIGO	FT-GL-01			
	LABORATORIO DE SERVICIOS QUÍMICOS MINERO METALÚRGICOS Y AMBIENTALES	VERSIÓN	4			
		FECHA	2018	06	18	
		PÁGINA	2	DE	3	

INF-G-22-341	INFORME TÉCNICO DE ENSAYO	FECHA	2022	10	21
			AA	MM	DD



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 0991 del 09 de septiembre de 2019, en los parámetros metales totales: Cadmio, Cobre, Hierro, Níquel, Plata, Zinc, Cromo, Bario y Manganeso en aguas. Cianuro Total en aguas, suelos y Residuos sólidos. Determinación de Toxicidad por metales en Residuos sólidos Peligros TCLP: Cadmio, Níquel, Plata, Cromo y Bario."

Conductividad: Estándar Métodos - SM 2510																	
LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN																	
(Ca): 0,05 mg/L (Mg): 0,05 mg/L (Fe): 0,08 mg/L																	
EQUIPOS UTILIZADOS																	
ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA ESPECTROFOTÓMETRO UV-VIS TITULADOR POTENCIOMÉTRICO BALANZA ANALÍTICA ESTUFA MUFLA PLANCHA DE CALENTAMIENTO Y AGITACIÓN																	
RESULTADOS																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>Ca mg/L</th> <th>Mg mg/L</th> <th>Fe mg/L</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Muestra Agua MR</td> <td>27,73</td> <td>0,74</td> <td>0,23</td> </tr> </tbody> </table>				Muestra	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Muestra Agua MR	27,73	0,74	0,23						
Muestra	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L														
Muestra Agua MR	27,73	0,74	0,23														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>Muestra Agua MR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cloruros [mg /l.]</td> <td>4,29</td> </tr> <tr> <td>Sulfuros [mg /l.]</td> <td>10,92</td> </tr> <tr> <td>Sulfatos [mg SO3-/L]</td> <td>8,99</td> </tr> <tr> <td>Dureza total [mg CaCO3/L]</td> <td>28,47</td> </tr> <tr> <td>Conductividad [uS/cm]</td> <td>80,65</td> </tr> <tr> <td>Fluoruros [mg/l.]</td> <td>0,0429</td> </tr> </tbody> </table>				Muestra	Muestra Agua MR	Cloruros [mg /l.]	4,29	Sulfuros [mg /l.]	10,92	Sulfatos [mg SO3-/L]	8,99	Dureza total [mg CaCO3/L]	28,47	Conductividad [uS/cm]	80,65	Fluoruros [mg/l.]	0,0429
Muestra	Muestra Agua MR																
Cloruros [mg /l.]	4,29																
Sulfuros [mg /l.]	10,92																
Sulfatos [mg SO3-/L]	8,99																
Dureza total [mg CaCO3/L]	28,47																
Conductividad [uS/cm]	80,65																
Fluoruros [mg/l.]	0,0429																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>Muestra Carbón MR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Humedad</td> <td>2,50</td> </tr> <tr> <td>Cenizas</td> <td>35,69</td> </tr> <tr> <td>Volátiles</td> <td>61,81</td> </tr> </tbody> </table>				Muestra	Muestra Carbón MR	Humedad	2,50	Cenizas	35,69	Volátiles	61,81						
Muestra	Muestra Carbón MR																
Humedad	2,50																
Cenizas	35,69																
Volátiles	61,81																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Muestra</th> <th>Tamaño granulométrico (# malla)</th> <th>D80</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Muestra mineral particulado MR</td> <td>Malla # 47</td> <td>361 Micras</td> </tr> </tbody> </table>				Muestra	Tamaño granulométrico (# malla)	D80	Muestra mineral particulado MR	Malla # 47	361 Micras								
Muestra	Tamaño granulométrico (# malla)	D80															
Muestra mineral particulado MR	Malla # 47	361 Micras															

L.C: Limite de Cuantificación <L.C: Resultado obtenido Inferior al limite de Cuantificación

*Laboratorio de Servicios Químicos, Minero-Metalúrgicos y Ambientales.
UIS Sede Guatiguará. Transv. Guatiguará Calle 8N No. 3W-60, Barrio El Refugio
Tel: (57)634 4000 Ext: 3504 Email: gimba.lab@uis.edu.co*

Apéndice C. Selección del material

Existe una gran variedad de materiales a utilizar en el diseño de un ciclón de partículas, el material adecuado para este tipo de ciclón son las planchas de acero inoxidable AISI 304, este es un material de gran calidad que es utilizado en varios sectores de la industria. Es un acero inoxidable versátil que se usa ampliamente para fabricar equipos y piezas que requieren un buen rendimiento general (resistencia a la corrosión y ataques químicos del medio ambiente). Para mantener la resistencia a la corrosión inherente del acero inoxidable, el acero debe contener más del 18% de cromo y más del 8% de níquel.

Tipo de estructura	Tipo de Composición	Descripción de acuerdo a JIS*	Descripción de acuerdo a AISI**	Descripción de acuerdo a DIN***	COMPOSICIÓN QUÍMICA %					
					C	Si max	Mn	P max	S max	Ni
Austenítico	17 Cr-5Ni-7Mn	SUS 201	201		0,15 max	1,00	5,50 ~ 7,50	0,06	0,030	3,50 ~ 5,5
	18 Cr-6Ni-10Mn	SUS 202	202		0,15 max	1,00	7,50 ~ 10,00	0,06	0,030	4,00 ~ 6,00
	17Cr-7Ni	SUS 301	301	4310	0,15 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	6,00 ~ 8,00
	18Cr-8Ni-highC	SUS 302	302	4300	0,15 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	8,00 ~ 10,00
	18Cr-8Ni	SUS 304	304	4301	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	8,00 ~ 10,50
	18Cr-8Ni-extra-low-C	SUS 304 L	304L	4306	0,030 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	9,00 ~ 13,00
	18Cr-12Ni	SUS 305	305	3955	0,12 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,50 ~ 13,00
	23Cr-12Ni	SUS 309 S	309 S	4845	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	12,00 ~ 15,00
	25Cr-20Ni	SUS 310 S	310 S		0,08 max	1,50	2,00 - max	0,04	0,030	19,00 ~ 22,00
	18Cr-12Ni-2,5Mo	SUS 316	316	4401	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,00 ~ 14,00
	18Cr-12Ni-7,5Mo-extra-low-C	SUS 316 L	316 L	4404	0,030 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	12,00 ~ 15,00
	18Cr-12Ni-2Mo-2Cu	SUS 316 J1		4505	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	10,00 ~ 14,00
	18Cr-13Ni-3,5Mo	SUS 317	317	4402	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	18,00 ~ 15,00
	18Cr-13Ni-3,5Mo-extra-low-C	SUS 317 L	317 L		0,030 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	11,00 ~ 15,00
	18Cr-8Ni-Ti	SUS 321	321	4541	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	9,00 ~ 13,00
	18Cr-9Ni-Nb	SUS 347	347	4550	0,08 max	1,00	2,00 - max	0,04	0,030	9,00 ~ 13,00
Ferrítico	13Cr-Al	SUS 405	405	4002	0,08 max	1,00	1,00 max	0,04	0,030	0,60 max
	16Cr	SUS 429	429	4009	0,12 max	1,00	1,00 max	0,04	0,030	
	18Cr	SUS 430	430	4016	0,12 max	0,75	1,00 max	0,04	0,030	0,60 max
	18Cr-Mo	SUS 434	434	4113	0,12 max	1,00	1,00 max	0,04	0,030	
Martensítico	13Cr-low Si	SUS 403	403	4024	0,15 max	0,50	1,00 max	0,04	0,030	0,60 max
	13Cr	SUS 410	410	4000	0,15 max	1,00	1,00 max	0,04	0,030	0,60 max
	13Cr-high C	SUS 420 J2	420	4021	0,26 ~ 0,40	1,00	1,00 max	0,04	0,030	
	18Cr-high C	SUS 440 A	440 A		0,60 ~ 0,75	1,00	1,00 max	0,04	0,030	
Endurecido por precipitación	17Cr-7Ni-1Al	SUS 631	631		0,09 max	1,00	1,00 max	0,04	0,030	6,50 ~ 7,75

Apéndice D. Características de los ciclones

Tabla 4

Características de los ciclones

Dimensión	Tipo de ciclón (Swift)		
	Alta eficiencia	Convencional	Alta capacidad
Diámetro del ciclón (Dc/Dc)	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada (a/Dc)	0.44	0.5	0.8
Ancho de entrada (b/Dc)	0.21	0.25	0.35
Altura de salida (s/Dc)	0.5	0.6	0.85
Diámetro de salida (Ds/Dc)	0.4	0.5	0.75
Altura parte cilíndrica (h/Dc)	1.4	1.75	1.7
Altura parte cónica (z/Dc)	2.5	2.0	2.0
Altura total del ciclón (H/Dc)	3.9	3.75	3.7
Diámetro salida de partículas (B/Dc)	0.4	0.4	0.4
Número cabezas de velocidad (NH)	9.24	8.0	7.96
Número de vórtices N	6.0	5.5	3.4

Nota. Fuente. Tomado de Londoño 2006

Apéndice E. Cálculo de la eficiencia del ciclón

Condiciones generales

- Sea un ciclón tipo swift de alta capacidad
- Q aire 9000 m³/h (2,5 m³/s) diámetro de chimenea 380mm
- Velocidad de entrada 22 m/s (sugerida)
- Densidad del carbón mineral 779 kg/ m³
- Temperatura del gas 1022° F (550 ° C)
- Presión de Trabajo 101 Kpa (1 atm)
- Densidad del aire 0,411 Kg/m³ propiedades del aire a 550 ° C y 1 atm)
- Viscosidad del aire 3,57*10⁻⁵ Kg/m*s.

Cálculo de la eficiencia del ciclón

Para calcular la eficiencia del ciclón se requiere calcular primero si hay o no re-suspensión, ya que de presentarse re-suspensión en el ciclón, la ecuación de Leith y Licht estaría sobrestimando la eficiencia del ciclón. (Esta teoría predice las eficiencias de colección de material particulado, basándose en las propiedades físicas del material particulado y el gas de arrastre, y en las relaciones entre proporciones del ciclón.)

Para hallar la relación de velocidades se requiere primero estimar la velocidad equivalente y luego la velocidad de saltación.

Velocidad equivalente

$$\begin{aligned}
 W &= \sqrt[3]{\frac{4 \times g \times \mu \times (\rho p - p)}{3 \times \rho^2}} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{4 \times 9,8 \times 3,57 \times 10^{-5} \times (779 - 0411)}{3 \times 0,411^2}} \\
 &= 1,29 \frac{m}{s}
 \end{aligned}
 \tag{Ec.9}$$

ρp = Densidad de la partícula, Kg/m³. (779 Kg/m³)

ρ = Densidad del gas portador, Kg/m³. (0,411 Kg/m³ propiedades del aire a 450 C y 1 atm)

μ = Viscosidad del gas portador, Kg/m*s. (3,57*10⁻⁵)

Velocidad de saltación

$$\begin{aligned}
 V_s &= \frac{4,913 \times W \times Kb^{0,4} \times D_c^{0,067} \times \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - Kb}} \\
 &= \frac{4,913 \times 1,29 \times 0,35^{0,4} \times 0,64^{0,067} \times \sqrt[3]{22^2}}{\sqrt[3]{1 - 0,35}} \\
 &= 36,63 \text{ m/s}
 \end{aligned}
 \tag{Ec.10}$$

V_s = Velocidad de saltación, m/s

V_i = Velocidad de entrada del gas en el ciclón, m/s

D_c = Diámetro del ciclón

Kb = relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón:

$$Kb = \frac{b}{D_c} = \frac{0,224}{0,64} = 0,35
 \tag{Ec.11}$$

W = Velocidad equivalente em m/s

Relación entre velocidades

$$\frac{V_i}{V_s} = \frac{22}{36,63} = 0,60 \quad \text{Ec.12}$$

Como $V_i/V_s < 1,35$. No hay re-suspensión del material particulado.

Como ya estamos seguros de que no hay re-suspensión de las partículas, procedemos a calcular la eficiencia del ciclón. Para ello se necesita determinar el factor de configuración, el tiempo de relajación y el exponente de vórtice.

Volumen del ciclón evaluado sobre la salida

$$\begin{aligned} V_{sc} &= \frac{\pi}{4} \times \left(S - \frac{a}{2} \right) \times (D_c^2 - D_s^2) \\ &= \frac{\pi}{4} \times \left(0,554 - \frac{0,512}{2} \right) \\ &\quad \times (0,64^2 - 0,48^2) \\ &= 0,040 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad \text{Ec.13}$$

S = Altura de salida del sistema de extracción de partículas (m)

D_c = Diámetro del ciclón (m)

D_s = Diámetro de salida (m)

Longitud natural del ciclón

$$L = 2,3 \times D_s \times \sqrt[3]{\frac{Dc^2}{a \times b}}$$

$$= 2,3 \times 0,48$$
Ec.14

$$\times \sqrt[3]{\frac{0,64^2}{0,512 \times 0,224}} = 1,68$$

Condición: $L < H - S$

$$H - S = 2,63 - 0,55 = 1,81$$
Ec.15

$$1,68 < 1,81$$

Ya que se cumple esa condición, calculamos el volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón.

Factor de dimensiones lineales

$$Kl = Dc - (Dc - B) \times \left[\frac{S + L - h}{z} \right]$$

$$= 0,64$$

$$- (0,64 - 0,256)$$

$$\times \left[\frac{0,554 + 1,68 - 1,088}{1,28} \right]$$
Ec.16

$$Kl = 0,30 \text{ m}$$

Dc = Diámetro del ciclón (m)

B = Diámetro de salida de partículas (m)

S = Altura del ducto de salida (m)

L = Longitud natural del ciclón (m)

h = Altura de la parte cilíndrica del ciclón (m)

z = Altura de la parte cónica del ciclón (m)

Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural

$$\begin{aligned}
 VR &= \frac{\pi}{4} \times Dc^2 \times (h - S) \\
 &+ \frac{\pi}{12} \times Dc^2 \times (L + S - h) \\
 &\times \left[1 + \frac{Kl}{Dc} + \left(\frac{Kl}{Dc} \right)^2 \right] \\
 &- \frac{\pi}{4} \times Ds^2 \times L
 \end{aligned}
 \tag{Ec.17}$$

$$VR = 0,075 \text{ m}^3$$

Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón

$$\begin{aligned}
 Kc &= \frac{\left(Vsc + \frac{VR}{2} \right)}{Dc^3} = \frac{\left(0,042 + \frac{0,075}{2} \right)}{0,64^3} \\
 &= 0,30 \text{ m}^3
 \end{aligned}
 \tag{Ec.18}$$

Vsc = Volumen del ciclón evaluado sobre la salida

VR = volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural

Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón

$$Ka = \frac{a}{Dc} = \frac{0,512}{0,64} = 0,8 \tag{Ec.19}$$

Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón

$$Kb = \frac{b}{Dc} = \frac{0,224}{0,64} = 0,35 \tag{Ec.20}$$

Factor de configuración

$$G = \frac{8 \times Kc}{(Ka \times Kb)^2} = \frac{8 \times 0,30}{(0,8 \times 0,35)^2} = 30,48 \tag{Ec.21}$$

Cuando tenemos un ciclón de una familia de ciclones estandarizados, el factor de configuración G es común para cada familia de ciclones y puede leerse de la tabla 3.

G según la tabla es 30,48

Exponente de vórtice

Exponente del vórtice es el resultado de relacionar la velocidad tangencial y el radio de giro de un movimiento en forma de vórtice, los estudios dicen que este número debe ser 1 en un ciclón sin fricción en las paredes, pero estudios recientes han calculado que estos valores varían entre el rango de 0,5 y 0,7.

$$\begin{aligned}
 n &= 1 - (1 - 0,67 \times Dc^{0,14}) \times \left[\frac{T}{283} \right]^{0,3} \\
 &= 1 \\
 &\quad - (1 - 0,67 \times 0,64^{0,14}) \\
 &\quad \times \left[\frac{823,15}{283} \right]^{0,3} = 0,49
 \end{aligned}
 \tag{Ec.22}$$

n = exponente del vórtice, sin dimensiones

T = temperatura del gas portador en K, 550 grados centígrados es 823,15 K

Dc = diámetro del ciclón

Tiempo de relajación

El tiempo de relajación hace referencia al tiempo que se necesita para que el polvillo alcance la velocidad de caída. Para calcular la eficiencia trabajaremos con el diámetro de corte él es cual se determina como el 50 % de la dimensión de la partícula más grande en tamaño, por lo que el

diámetro de corte es 361 micras, y se asume que todas las partículas sobre este diámetro van a ser separadas del gas transportador al 100 % de eficiencia.

$$T_i = \frac{\rho p \times D_{pi}^2}{18\mu} = \frac{779 \times (361 \times 10^{-6})^2}{18 \times 3,57 \times 10^{-5}} \quad \text{Ec.23}$$

$$= 0,157 \text{ s}$$

Ti = tiempo de relajación en s

ρp = densidad de la partícula en kg/m³

Dpi = diámetro de la partícula en m

μ = viscosidad del gas portador en kg/ms

El valor Ti indica el tiempo en segundos que requiere una partícula para caer en el ciclón, cuando ya se encuentre en su interior.

Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño

$$\eta = 1 - e^{\left[-2 \times \left(\frac{G \times T_i \times Q(n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0,5}{(n+1)}} \right]} \quad \text{Ec.24}$$

η = Eficiencia

G = Factor de configuración del ciclón, adimensional

Q = Caudal del gas en m³/s

n = Exponente de vórtice, adimensional

Dc = Diámetro del ciclón en m

Ti = Tiempo de relajación en s

$$\eta = 1 - e^{\left[-2 \times \left(\frac{30,48 \times 0,157 \times 2,5(0,49+1)}{0,64^3} \right)^{\frac{0,5}{(0,49+1)}} \right]} = 0,99$$

$$\eta = 0,99 \times 100 = 99\%$$

Caída de presión

Para calcular la caída de presión se utiliza la siguiente formula y se necesita calcular el número de cabezas NH.

$$\begin{aligned}\Delta P &= \frac{1}{2} \times \rho \times Vi^2 \times NH \\ &= \frac{1}{2} \times 0.411 \times 22^2 \times 7,96 \\ &= 791,7175 Pa\end{aligned}\tag{Ec.25}$$

NH = número de cabezas de velocidad adimensional

deltaP = cambio de presión en Pa.

ρ = densidad del gas portador en kg/m³

Vi = velocidad inicial en m/s

Cálculo del número de cabezas:

$$\begin{aligned}NH &= k \times \frac{a \times b}{Ds^2} = 16 \times \frac{0,512 \times 0,224}{0,48^2} \\ &= 7,96\end{aligned}\tag{Ec.26}$$

K = constante que tiene el valor de 16 para los ciclones de entrada tangencial

a = alto de la entrada del ciclón en m

b = ancho de la entrada en m

Ds = diámetro de salida en m

Este valor es menor a 2.488,16 pascal lo cual cumple con los parámetros de los ciclones con entrada tangencial.

La eficiencia del ciclón es de $\eta=8,7\%$ y las dimensiones hacen que el ciclón sea funcional para la empresa.

Apéndice F. Tablas de las propiedades del aire a 1 atm de presión

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para gases ideales, c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de ρ a la temperatura dada por P (en atm) y cuando se dividen ν y α entre P (en atm).

Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, y P. Hestermanns, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

Fuente: CENGEL, Yunus A. y John M. CIMBALA. “Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones”, 1era edición. McGraw-Hill, 2006, Tabla A-

Apéndice G. Planos del ciclón

